



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS DE EMISIONES DE RUIDO POR EL USO DE GENERADORES
ELÉCTRICOS EN LA CRISIS ENERGÉTICA DE 2024 EN EL CANTÓN CUENCA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: GINGER ADRIANA GONZALEZ NIEVES

BRYAN FERNANDO GUAMÁN CASTILLO

TUTOR: ING. NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Ginger Adriana Gonzalez Nieves con documento de identificación N° 1900647874 y Bryan Fernando Guamán Castillo con documento de identificación N° 1900850213 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

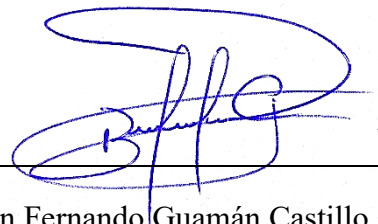
Cuenca, 30 de junio del 2025

Atentamente,



Ginger Adriana Gonzalez Nieves

1900647874



Bryan Fernando Guamán Castillo

1900850213

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Ginger Adriana Gonzalez Nieves con documento de identificación N° 1900647874 y Bryan Fernando Guamán Castillo con documento de identificación N° 1900850213, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis de emisiones de ruido por el uso de generadores eléctricos en la crisis energética de 2024 en el cantón Cuenca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

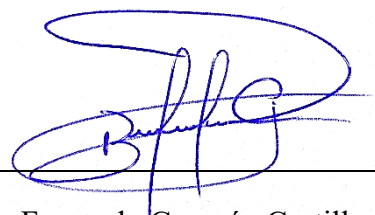
Cuenca, 30 de junio del 2025

Atentamente,



Ginger Adriana Gonzalez Nieves

1900647874



Bryan Fernando Guamán Castillo

1900850213

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Néstor Diego Rivera Campoverde con documento de identificación N° 0103898995, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE EMISIONES DE RUIDO POR EL USO DE GENERADORES ELÉCTRICOS EN LA CRISIS ENERGÉTICA DE 2024 EN EL CANTÓN CUENCA, realizado por Ginger Adriana Gonzalez Nieves con documento de identificación N° 1900647874 y por Bryan Fernando Guamán Castillo con documento de identificación N° 1900850213, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 30 de junio del 2025

Atentamente,



Ing. Néstor Diego Rivera Campoverde

0103898995

DEDICATORIA

Dedico este proyecto, a mis abuelitos María Sarmiento y Rubén González, y a mis bisabuelos María Morocho y Mariano Arpi, quienes dejaron una huella imborrable en mi vida. Siempre los recordaré con profundo amor. Aunque ya no estén físicamente, su recuerdo me acompaña cada día como una luz que guía mis pasos. Desde el cielo, sé que me cuidan y me dan fuerzas para seguir.

A mi hermano, Erik González, por ser mi apoyo incondicional. Te amo, y valoro cada palabra, cada gesto, cada muestra de cariño que me diste cuando decidí empezar este nuevo camino. A pesar de los caminos distintos que hemos tomado, nunca nos hemos fallado.

A mi padre, Ángel Iván González, le agradezco por haberme brindado la oportunidad de continuar con mis estudios. Este logro es también suyo. A pesar de nuestras diferencias, su respaldo ha sido esencial para alcanzar esta meta, y por ello le estaré eternamente agradecida.

A mis abuelos Zoila Arpi y Manuel Nieves, gracias por su constante aliento y por estar siempre pendientes de mí, incluso desde la distancia. Son un ejemplo de fortaleza, esfuerzo y amor. Gracias por enseñarme que rendirse no es una opción y por creer en mí desde el primer momento.

Gracias a todos, por formar parte de mi vida.

Ginger Adriana Gonzalez Nieves

DEDICATORIA

A Dios, por acompañarme en cada etapa, por darme fuerza cuando sentí que no podía más, por cada paso que logré dar aun con miedo. Gracias por sostenerme en silencio y por no soltarme nunca.

A mi padre Fernando, mi primer motor, mi estrella en el cielo, mi abrazo eterno. Aunque la vida me negó el privilegio de verte aplaudir este logro, tu voz sigue viva en mi mente, empujándome hacia adelante. Este título lleva tu nombre en cada letra, en cada esfuerzo. Este logro es, primero, para Ti. Te extraño con todo lo que soy, pero camino con la certeza de que aún me acompañas.

A mi madre Isabel, mi refugio constante, la fortaleza que no se quiebra. Gracias por ser la llama que no se apaga, por sostenerme cuando sentí que todo se derrumbaba. Este triunfo es tan tuyo como mío.

A mis hermanos Dody, Katty, Carlos y Sofía, por ser abrigo, raíces, memoria y empuje. En ustedes encontré consuelo, risas y fuerza para seguir.

A mis sobrinas Renata, Nathaly y Fernanda, por esos momentos sencillos y mágicos en los que sus bromas, risas y locas imaginaciones me sacaron sonrisas cuando más las necesitaba. No lo sabían, pero también fueron parte de mi fuerza.

A mi hija, por llegar cuando más te necesitaba. Gracias por existir. Te amo con todo lo que soy.

Todo lo que he logrado ha sido gracias a todos ustedes.

Bryan Fernando Guamán Castillo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme la fuerza interior necesaria para superar cada dificultad, por sostenerme en los momentos más duros y por haber sembrado en mí la perseverancia que me permitió llegar hasta aquí. Hoy, con el corazón sereno y lleno de agradecimiento, puedo decir que he cumplido este sueño.

Agradecer al Ing. Néstor Rivera, por haberme acompañado en este proceso, por su constante aliento y por motivarme cada día a ser mejor, evitando que me estancara o me conformara con menos de lo que realmente podía alcanzar. Gracias por su confianza y apoyo incondicional en este proyecto; gracias a usted, pude culminarlo con éxito y descubrir hasta dónde era capaz de llegar.

Ginger Adriana Gonzalez Nieves

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial al Ing. Néstor Rivera Campoverde, nuestro tutor, por su acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Su guía, paciencia y compromiso fueron clave para mantener el rumbo en momentos de duda y exigencia.

Quiero expresar mi agradecimiento a cada uno de los docentes que conforman la carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad Politécnica Salesiana, por su valioso aporte a mi formación profesional.

A mis compañeros y amigos Auz M, Díaz C y Ojeda M, por estar presentes en los momentos clave, compartiendo esfuerzos y motivación a lo largo del proceso. Compartir este camino con ustedes fue una parte valiosa de mi experiencia universitaria.

Bryan Fernando Guamán Castillo

RESUMEN

La crisis energética de 2024 en Ecuador, provocada por condiciones de sequía severas, afectó significativamente la generación de energía hidroeléctrica, lo que llevó a apagones prolongados en áreas urbanas como Cuenca. En respuesta, el uso generalizado de generadores eléctricos aumentó considerablemente, generando preocupaciones sobre sus impactos ambientales y en la salud. Este estudio presenta una metodología novedosa para estimar emisiones de contaminantes (específicamente CO₂, CO, HC y NO_x) basada únicamente en los niveles de la presión acústica. A través de un diseño de muestreo estratificado, se procedió a medir 248 generadores en diferentes zonas urbanas utilizando un sonómetro y un analizador de gases, conforme a las normativas ecuatorianas.

Se entrenaron y se validaron tres modelos de aprendizaje automático seleccionando el que mejores prestaciones tiene predecir emisiones a partir de datos de ruido. La arquitectura del árbol de decisión mostró la mejor capacidad predictiva, con un R² máximo de 0.66 para el CO₂, un valor que, si bien moderado, se considera aceptable en estimaciones ambientales que involucran una sola variable predictora. Luego, el modelo entrenado se aplicó a un conjunto de datos más amplio de 710 generadores para estimar las emisiones totales durante 691 horas de cortes de energía registrados en 89 días. Los resultados revelaron la emisión de 428 toneladas de CO₂, 14.91 toneladas de CO, 0.72 toneladas de HC y 7.6 toneladas de NO_x.

Paralelamente, los niveles de ruido superaron los límites regulatorios locales, especialmente en zonas céntricas y residenciales, lo que indica importantes incidencias para la salud de la población. Este estudio respalda la práctica de estrategias regulatorias, mejoras en la tecnología de los generadores y la evolución hacia un modelo energético ambientalmente responsable en contextos de emergencia.

ABSTRACT

The 2024 energy crisis in Ecuador, triggered by extreme drought conditions, severely affected hydroelectric power generation, resulting in extended blackouts across urban zones such as Cuenca. As a consequence, the widespread deployment of electric generators rose markedly, prompting worries regarding their consequences for both the environment and public health. This research proposes an innovative methodology to estimate pollutant emissions (specifically CO₂, CO, HC, and NO_x) using only environmental noise levels. A stratified sampling strategy was implemented to measure 248 generators across various urban locations using a sound level meter and a gas analyzer, in accordance with Ecuadorian environmental standards.

A set of three predictive models built using artificial intelligence approaches—namely, linear regression, decision tree, and neural network—were trained and evaluated to determine which provided the most accurate emission predictions from acoustic data. Among them, the decision tree model exhibited the strongest predictive capability, reaching a coefficient of determination (R²) of 0.66 for CO₂, a result considered acceptable for environmental estimations relying on a single input variable. This optimized model was subsequently applied to a broader dataset of 710 generators to estimate total emissions over a period of 691 operational hours distributed across 89 blackout days. The estimation indicated the release of approximately 428 metric tons of CO₂, 14.91 metric tons of CO, 0.72 metric tons of HC, and 7.6 metric tons of NO_x.

Simultaneously, noise levels were found to exceed local regulatory thresholds, particularly in central and residential areas, suggesting relevant implications for public health. The findings of this study support the need for reinforced regulatory policies, enhancements in generator technologies, and a transition toward environmentally responsible energy alternatives during emergency scenarios.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO.....	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PROBLEMA	2
2.1. Antecedentes.....	2
2.2. Importancia y alcance	3
2.3. Delimitación	4
3. OBJETIVOS.....	5
3.1. Grupo Objetivo.....	5
3.2. Objetivo General.....	5
3.3. Objetivos específicos.....	5
4. ESTABLECER EL ESTADO DEL ARTE MEDIANTE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS Y VARIABLES UTILIZADAS POR OTROS AUTORES.	6
5. EVALUAR LOS DATOS DE COORDENADAS GEOLOCALIZACIÓN, EMISIONES CONTAMINANTES Y RUIDO, MEDIANTE MUESTREO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS, PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS EFECTOS EN LA CONTAMINACIÓN AMBIENTA.....	28
5.1. Coordenadas de geolocalización.....	28
5.2. Referencia horaria para la recolección de datos en campo	29
5.3. Equipos e Instrumentación Utilizada.....	30
5.4. Diseño del estudio	35
5.5. Tamaño de la Muestra.....	36
5.6. Normativa Aplicable.....	38
6. OBTENER RESULTADOS DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GENERADORES ELÉCTRICOS EN FUTURAS CRISIS ENERGÉTICAS.	40
6.1. Análisis de datos.....	40
6.2. Análisis de resultados de campo en 248 generadores eléctricos.....	42
6.3. Evaluación del ajuste predictivo de los modelos	47
6.3.1. Dióxido de carbono (CO ₂)	48

6.3.2. Monóxido de carbono (CO).....	48
6.3.3. Óxidos de nitrógeno (NOx)	48
6.3.4. Hidrocarburos no quemados (HC).....	48
6.4. Evaluación del comportamiento de los residuos en los modelos predictivos	49
6.4.1. Dióxido de carbono (CO ₂)	50
6.4.2. Monóxido de carbono (CO).....	50
6.4.3. Óxidos de nitrógeno (NOx)	50
6.4.4. Hidrocarburos no quemados (HC).....	50
6.5. Validación y modelado final	52
6.6. Estimación de emisiones mediante norma EURO 6	58
6.7. Resultados y análisis.....	61
7. CONCLUSIONES.....	63
8. RECOMENDACIONES	64
9. REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1	4
FIGURA 2	9
FIGURA 3	16
FIGURA 4.....	19
FIGURA 5.....	20
FIGURA 6	28
FIGURA 7.	29
FIGURA 8.	30
FIGURA 9	31
FIGURA 10	32
FIGURA 11.	34
FIGURA 12	36
FIGURA 13.	40
FIGURA 14.	41
FIGURA 15	42
FIGURA 16	43
FIGURA 17	44
FIGURA 18	45
FIGURA 19	46
FIGURA 20.....	47
FIGURA 21	49
FIGURA 22.....	53
FIGURA 23	54
FIGURA 24.....	55
FIGURA 25	56
FIGURA 26	57
FIGURA 27.....	71
FIGURA 28.....	72
FIGURA 29.....	73
FIGURA 30.....	74
FIGURA 31.....	75
FIGURA 32.....	75
FIGURA 33.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	8
TABLA 2	12
TABLA 3	13
TABLA 4	18
TABLA 5	32
TABLA 6	33
TABLA 7	34
TABLA 8	38
TABLA 9	39
TABLA 10	51
TABLA 11	60
TABLA 12	61

1. INTRODUCCIÓN

La emergencia energética que enfrentó Cuenca, Ecuador en 2024, y que afectó de forma directa al cantón Cuenca, evidenció la alta dependencia del país de la generación hidroeléctrica. La prolongada sequía y las fallas en el sistema eléctrico nacional provocaron cortes prolongados de energía, lo que llevó a que hogares, comercios e industrias recurrieran de forma masiva a la utilización de generadores eléctricos de combustión interna como recurso temporal para mantener sus actividades fundamentales. Este escenario generó una alta demanda de generadores, sin que existieran previamente estudios locales que evaluaran su impacto ambiental.

El uso de generadores eléctricos, especialmente aquellos que funcionan con gasolina, contribuyó significativamente al incremento de emisiones contaminantes de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y hidrocarburos (HC), así como al aumento de la contaminación acústica. Estos factores representan una amenaza directa hacia la calidad del aire, el equilibrio ambiental y la salud de la población, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas donde se concentró su utilización.

En este contexto, resulta de vital importancia abordar esta problemática desde un enfoque técnico y sistemático que permita medir, analizar e interpretar el impacto ambiental ocasionado por los generadores eléctricos en momentos críticos. Generar evidencia científica a través de métodos de medición y análisis propios de la Ingeniería Automotriz, los cuales permite no solo entender la magnitud del problema, sino también plantear soluciones viables que minimicen los efectos negativos.

Por lo tanto, esta tesis busca llenar un vacío en el conocimiento local mediante el análisis de emisiones contaminantes y niveles de ruido generados por el uso masivo de los generadores eléctricos en Cuenca durante la emergencia del 2024. Los resultados permitirán formular recomendaciones orientadas a la optimización del uso de estos equipos y al desarrollo de normas gubernamentales que consideren tanto la necesidad energética como la protección ambiental y la calidad de vida de la salud pública.

2. PROBLEMA

2.1. Antecedentes

En la crisis energética de 2024 en Ecuador, Cuenca sufrió cortes prolongados por una fuerte sequía que afectó la generación hidroeléctrica y fallas en la infraestructura eléctrica (Pérez et al., 2024) . En respuesta, muchos hogares, comercios e industrias recurrieron a generadores de combustión interna para sostener sus actividades esenciales.

Estudios realizados en Quito evidenciaron que el uso extendido de generadores eléctricos durante la crisis energética provocó un incremento del 180 % en dióxido de azufre (SO₂), 43 % en monóxido de carbono (CO) y 38 % en dióxido de nitrógeno (NO₂), debido al uso de diésel de alto contenido de azufre (Primicias, 2024). Según los valores guía establecidos por la OMS, los niveles máximos recomendados para la exposición a corto plazo son de 40 µg/m³ para SO₂, 4 mg/m³ para CO y 25 µg/m³ para NO₂ (Organización Mundial de la Salud, 2021). Por tanto, los incrementos reportados podrían haber superado estos umbrales, representando un riesgo para la salud pública en áreas de uso intensivo de generadores.

El uso creciente de generadores eléctricos en zonas con suministro inestable impacta la salud ambiental. Estudios sobre generadores diésel en áreas urbanas revelan la relación entre demanda energética y contaminación (Newcomer, 2008). Los estudios muestran que las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas empeoran las afecciones respiratorias y la salud pública, resaltando la urgencia de alternativas más limpias y regulaciones más estrictas.

El estudio sobre la contaminación acústica de los generadores evidencia riesgos para la salud por exposición prolongada, afectando la calidad de vida con trastornos del sueño y aumento del estrés (Husain, 2024) . Las soluciones como recintos cerrados o barreras acústicas han demostrado reducir el ruido de los generadores, destacando la importancia de controlar la contaminación acústica tanto como la del aire.

En Cuenca no hay estudios que analicen el impacto ambiental del uso de generadores eléctricos en momentos críticos. Esta falta de información dificulta la creación de políticas y estrategias para regular su uso en emergencias.

2.2. Importancia y alcance

La presente investigación es necesaria porque, pese al uso generalizado de generadores eléctricos durante la crisis energética de 2024 en Cuenca, no existen estudios locales que analicen de forma técnica y sistemática su impacto ambiental y en la salud pública. La generación de evidencia científica sobre las emisiones contaminantes y el ruido producido por estos equipos permitirá comprender mejor los riesgos asociados a su uso masivo.

Este proyecto se enmarca en el Objetivo de Aprendizaje 4, que fomenta la capacidad de realizar pruebas, mediciones y experimentos para analizar e interpretar resultados, habilidad fundamental para cuantificar el impacto ambiental de los generadores eléctricos en contextos de emergencia. Además, se alinea con el Objetivo 12 del Plan Nacional de Desarrollo, que promueve modelos de desarrollo sostenible mediante la implementación de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. También se relaciona con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), al promover alternativas más limpias y sostenibles. Esta información servirá como base para formular recomendaciones que orienten la toma de decisiones por parte de autoridades locales, instituciones técnicas y la ciudadanía en general.

2.3. Delimitación

El proyecto se desarrollará en el cantón de Cuenca, en la capital de la provincia del Azuay, Ecuador, ubicado en la región sur andina, a una altitud de aproximadamente 2 538 m s.n.m., con un clima templado andino ≈ 16 °C promedio. Según el censo de 2022, la ciudad de Cuenca cuenta con 596 101 habitantes, siendo la tercera más poblada del país; si se incluye su área metropolitana (que abarca parroquias rurales y ciudades cercanas), la cifra asciende a alrededor de 762 581 habitantes.

Figura 1

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador.



Fuente: Google Maps.

3. OBJETIVOS

3.1. Grupo Objetivo

Este proyecto de titulación va dirigida a la ciudadanía en especial a los que viven en el cantón Cuenca.

El proyecto tiene como iniciativa beneficiar al Grupo de Investigación en Ingeniería del Transporte (GIIT) resaltando a la línea de Investigación en Eficiencia Energética y Contaminación Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.2. Objetivo General

Estudiar el impacto ambiental causado por el uso de generadores eléctricos, mediante el análisis de datos estadísticos, para la determinación de la contaminación al aire durante la crisis energética en la ciudad de Cuenca.

3.3. Objetivos específicos

- Establecer el estado del arte mediante la revisión bibliográfica, para la identificación de las metodologías y variables utilizadas por otros autores.
- Evaluar los datos de coordenadas geolocalización, emisiones contaminantes y ruido, mediante muestreo y análisis estadísticos, para la determinación de sus efectos en la contaminación ambiental.
- Obtener resultados de contaminación ambiental mediante análisis estadístico para la optimización del uso de generadores eléctricos en futuras crisis energéticas.

4. ESTABLECER EL ESTADO DEL ARTE MEDIANTE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS Y VARIABLES UTILIZADAS POR OTROS AUTORES.

En todo el mundo la mayoría de los motores dependen de combustibles fósiles, los cuales significan un alto costo económico de la energía generada, no solo por el combustible, sino también por los costos de transporte y mantenimiento. También, están relacionados con el inclemente cambio climático, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la disminución de las reservas de petróleo fósil, junto con la inestabilidad de los precios (Barbosa et al., 2022).

Igualmente, en Latinoamérica los efectos del cambio climático son cada vez más evidentes por las crisis que genera en la modernidad de las ciudades, debido a la creciente necesidad de energía eléctrica que necesitan, lo que, en algún momento, esa relación revela la vulnerabilidad de los sistemas de generación eléctrica en la región. Particularmente, en el año 2024, Ecuador enfrentó el déficit de energía eléctrica más significativo de las últimas décadas, que afectó a casi un 70% del país (dependiente de hidroelectricidad). Así, en 2024, la crisis climática global, provocó una severa caída en los caudales de los ríos que alimentan las principales centrales; ocasionando reducción en la capacidad de generación, bajó la oferta de energía eléctrica y generó una crisis eléctrica que se agravó por la falta de alternativas para salir de esta crisis. Las interrupciones de energía eran frecuentes y programadas, causando importantes pérdidas económicas en la industria, el comercio y el turismo (Casares Molina y Calle García, 2024).

Estos sectores afectados buscaron alternativas en el mercado actual, donde optaron por adquirir motores de combustión interna (MCI), para la generación de energía usando un combustible fósil, convirtiendo la energía mecánica (giro del alternador) en electricidad. Estos generadores emplean motores de gasolina y o de gasoil, siendo, estos últimos los más utilizados en los grupos electrógenos por sus prestaciones mecánicas, ecológicas y económicas (Rojas, 2015).

Aunque un MCI es poco eficiente, porque ocasiona pérdidas mecánicas, térmicas, de bombeo y de postcombustión, pero, aunque en la actualidad han mejorado su tecnología y su eficiencia se ha elevado, siguen sin mitigar esas pérdidas. Sin embargo, muchas actividades humanas demandan el uso de generadores que utilizan MCI para generar energía eléctrica y son esenciales ante las carencias o limitaciones de la red eléctrica principal. Pero, el uso prolongado de MCI a niveles cercanos a su capacidad nominal puede generar elevadas Emisiones Contaminantes Tóxicos (ECT) y el motor en funcionamiento constante, manteniendo 1800 rpm, aumenta el consumo de combustible y el desgaste de las piezas móviles. Además, la compresión y expansión en el motor son los más afectados, donde una parte sustancial de la mezcla aire-combustible no se quema en la cámara de combustión y es expulsada por el escape, generando muchos componentes tóxicos, como CO₂, HC, NOX, MP y SOX, que, con el medio ambiente, forman smog, lluvias ácidas y efectos adversos en la salud humana (Torres Obregón, 2024).

En ciudades ecuatorianas como Quito, Cuenca, Guayaquil, entre otras; era común observar la abundante operación cotidiana de generadores eléctricos durante los periodos de crisis de energía hidroeléctrica. Hubo un excesivo uso de esos generadores durante meses, lo que causó preocupación por sus potenciales impactos ambientales y en la salud pública, por los elevados niveles de contaminantes atmosféricos antes mencionados.

Al respecto, Parra (2024) realizó un estudio en Quito, Ecuador, denominado “Metodología para el cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero producidas por generación Térmica”, donde analizó comparativamente, las principales metodologías para el cálculo de GEI en la generación térmica; seleccionó la denominada Tool 07 de la UNFCCC para calcular y evaluar el factor de emisión de CO₂. Además, calculó las emisiones y desarrolló un aplicativo que automatiza y facilita el proceso para el análisis. Refiere que todo proceso de generación de energía a partir de centrales termoeléctricas libera GEI a la atmosfera: material particulado (PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO) monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂).

También, Parra (2024) expone que los principales organismos desarrolladores de metodologías para garantizar el cálculo de las emisiones de GEI son los expresados en la tabla 1:

Tabla 1

Metodologías para calcular las emisiones de GEI

DESARROLLADOR	METODOLOGÍA	PASOS	PROCEDIMIENTO
Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)	IPCC	Nivel 1	Recolectar datos, Seleccionar el factor de emisión, Cálculo de emisiones de CO ₂ , Cálculo de emisiones de otros gases (CH ₄ y N ₂ O), Conversión a CO _{2eq} y Sumatoria de emisiones totales.
		Nivel 2	Recolección de datos sobre la actividad, Selección de Factores de Emisión y Cálculo de emisiones de CO ₂ .
		Nivel 3	Recolección de datos sobre la actividad, Aplicación de métodos avanzados y Cálculo de emisiones.
GHG Protocol (GreenHouse Gas Protocol)	GHG	Alcance 1	1. Definir los límites organizacionales.
		Alcance 2	2. Identificar las fuentes de emisión. 3. Recolección de datos sobre la actividad.
		Alcance 3	4. Seleccionar factores de emisión. 5. Cálculo de las emisiones. 6. Cálculo de emisiones de CO _{2eq}
Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)	EPA		1. Identificar las fuentes de emisiones. 2. Recolección de datos sobre la actividad. 3. Seleccionar los factores de emisión apropiados. 4. Calcular las emisiones. 5. Conversión a CO _{2eq} .
Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	Tool 07		1. Margen Combinado. 2. Margen Operativo (OM). 3. Margen de Construcción.

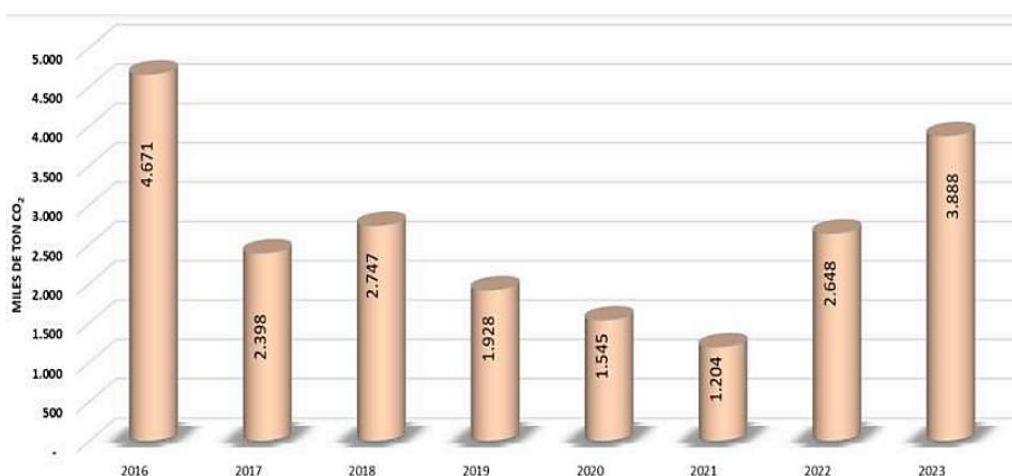
Nota: La tabla muestra información obtenida de Parra (2024). Elaboración propia.

Al respecto, la Metodología GHG *Protocol* fue aplicada por Banguera (2021) en el estudio que realizó en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, para estimar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de las actividades de una consultora ambiental, mediante el cálculo de la huella de carbono. Primero, identificó las fuentes de emisión directas e indirectas de la empresa, clasificándolas según el tipo de alcance (1, 2 y 3); luego, calculó el índice de huella de carbono. Finalmente, analizó la variación temporal de las emisiones en los años evaluados. Como resultado obtuvo que, el 84,09% de la generación de GEI procede del consumo eléctrico, seguido del combustible (15,90%) y papel (0,0585%). De igual modo, en 2019 los alcances 1 y 2 denotaron una curva decreciente de generación respecto al 2018. Concluye en que las actividades empresariales estudiadas mostraron ligeras variaciones estadísticamente no significativas, pero, precisa que en 2018 el índice de huella de carbono fue 11,92% superior al 2019, con 2,328 tCO_{2eq}, versus 2,080 tCO_{2eq}.

Un detalle que no se puede dejar de lado, es el publicado por la Comisión Técnica de determinación de Factores de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (CTFE-GEI) en su informe de julio de 2024 determinó que la emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador al 2023, se ha presentado tal como se puede observar en la figura 2:

Figura 2.

Emisiones de CO₂ en el S.N.I. del 2016 al 2023.



Nota: La figura muestra cómo la tendencia de las emisiones de CO₂ que estaban disminuyendo hasta el 2021, empezaron a incrementarse a partir del 2022. Figura tomada de (Gutiérrez, 2024).

Esa tendencia creciente de las emisiones de CO₂ y otros contaminantes es precisada de forma preocupante por Zalakeviciute et al. (2024), en su estudio denominado “Impacto del uso de generadores diésel en la calidad del aire en Quito - Ecuador, durante una crisis eléctrica nacional”, donde informa que el caluroso año 2023 y la sequía en la amazonía derivaron en una crisis hidroeléctrica, que motivó a adquirir generadores de energía de respaldo perjudiciales para la calidad del aire y el medio ambiente, durante la crisis hidroeléctrica de 2024. Las concentraciones de CO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₂ se midieron cada hora con equipo estándar de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), siguiendo las directrices de la EPA. El impacto de los apagones en la contaminación atmosférica se evaluó comparándolo con un período de referencia anterior a la crisis y con un año anterior con condiciones climáticas similares. Los hallazgos indican que los apagones de hasta 8 horas al día aumentaron considerablemente las concentraciones de SO₂ (180%), CO (43%), NO₂ (39%) y PM₂ (20%) en comparación con condiciones normales. Por el contrario, los niveles de contaminación por O₂ disminuyeron (-6%). Estos hallazgos sugieren la posibilidad de riesgos para la salud respiratoria y cardiovascular de la población urbana, lo que demanda mejorar la infraestructura energética y que las soluciones de energía de respaldo sean más limpias, para garantizar un futuro urbano más saludable y sostenible en medio del evidente e implacable cambio climático.

Esta preocupación también es destacada por Ifeanyi y Nnaji (2023) quienes dicen que estas “emisiones de los generadores eléctricos son una epidemia silenciosa y generalizada debido a sus componentes químicos, tóxicos y cancerígenos para los humanos. Los informes de muertes por humos eléctricos y otros contaminantes ambientales” son cotidianos en Nigeria. Ante las fallas de los sistemas eléctricos principales, muchas personas se orientan a depender de generadores de energía de todo tipo, con graves consecuencias. Por tal motivo, se necesitan constantes evaluaciones de la calidad del aire, tanto en las zonas urbanas como rurales, para eliminar contaminantes tóxicos del medio ambiente. En este sentido, los autores precisan que en Nigeria la contaminación del aire genera más muertes prematuras por año que el agua potable insegura o la desnutrición.

Esos contaminantes en los humos de los generadores eléctricos son la principal fuente de contaminación ambiental, “son asesinos silenciosos, y muchas personas expuestas a sus emisiones no toman las precauciones necesarias. Los generadores eléctricos deben ubicarse lejos de las viviendas y con suficiente ventilación”, lo cual nadie cumple y los gobiernos no implementan políticas sobre la importación, venta, uso y disposición de generadores eléctricos, a pesar de que las investigaciones demuestran que son la principal causa de contaminación ambiental. Por este motivo, los investigadores deben trabajar más en el “monitoreo de la calidad ambiental mediante la evaluación de los humos de los generadores eléctricos y otros contaminantes para lograr un ambiente amigable y libre de toxicidad” (Ifeanyi y Nnaji, 2023).

En realidad, esto es muy preocupante y así lo confirma un docente investigador de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), que fue entrevistado por Vivanco (2024), precisando que, por ejemplo, un generador a gasolina de 3500 W puede operar hasta 8 horas de manera continua y es suficiente para que funcionen simultáneamente un refrigerador grande (800-1200 W), focos LED, un televisor, un router y cargadores de laptop y celular. Sin embargo, la combustión del generador eléctrico libera dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO), dos sustancias que contaminan el aire, de forma preocupante, porque un generador, en un edificio estándar, emite 80 toneladas de CO_2 a la atmósfera, lo que casi equivale a las emisiones anuales de 17 autos que recorren 20.000 kilómetros cada uno. Además, los generadores eléctricos suelen operar entre 90 y 110 dB, lo cual supera los 85 dB que es el máximo permitido para que el ruido no afecte la salud humana.

Una similar situación de deficiencia eléctrica sucedió en Cuba en el año 2007, lo que condujo al uso de generadores eléctricos con el objetivo del “ahorro energético”. Se instalaron grupos electrógenos (GE), motores que al funcionar desprenden sustancias tóxicas como: “óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, compuestos de azufre y plomo. La evaluación de la contaminación atmosférica, mediante un estudio descriptivo de las concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mediante muestreo instantáneo de dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2)”. Para las bases de datos se utilizó dBase y se procesaron con el programa SPSS v.X. El análisis estadístico incluyó indicadores de trasgresión de las concentraciones máximas admisibles (CMA). Además, se evaluó la correlación entre contaminantes usando el Rho de Spearman. Los valores de

las medias aritméticas para NO₂ fueron superiores a las CMA, y se determinó que no hay correlación entre el SO₂ y el NO₂ (Martínez et al., 2007).

De la misma manera, Ahmed et al. (2020) estudiaron el impacto ambiental del empleo de grandes generadores eléctricos en la Universidad Tecnológica de Irak, ante la falta de suministro eléctrico de la red nacional. Encontraron que las emisiones son muy elevadas y superan los límites aceptables establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Norma Iraquí N° 4950. También, estudiaron el impacto de la transición al uso de sistemas de células fotovoltaicas y el impacto ambiental de esta transformación. Los resultados indican que, el uso de generadores, libera altas concentraciones de PM₁, PM_{2,5} y PM₁₀, exponiendo a estudiantes y personal a riesgos para la salud. Existen elevadas cantidades de contaminantes de SO₂, H₂S, NO_x y compuestos orgánicos volátiles por el alto contenido de azufre del combustible diésel iraquí. El ruido de los generadores es muy alto, lo que también supone graves riesgos para la salud del personal y los estudiantes de la universidad. Pero, el uso del sistema fotovoltaico reduce las concentraciones de PM_{1.0} y PM_{2,5} en un 85,6 % y un 52,4 %, respectivamente. Los niveles de CO₂, CO, H₂S y SO₂ disminuyen en un 60,5 %, un 49,6 %, un 91,7 % y un 95,3 %, respectivamente. El ruido en el interior se reduce en un 29 % en comparación con el del exterior.

Tabla 2

Especificaciones de instrumentos de medición usados en la Universidad Tecnológica de Irak.

No.	Device name	The measured pollutant	Made in	Range	Uncertainty
1	G460	CO, CO ₂ , H ₂ S, NO _x , SO ₂ , O ₃	Germany	0-55 ppm	0.14
2	G460	Ozone, VOC	Germany	0-500 ppm	0.12
3	AEROCET	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₇ , PM ₁₀ , TPS	USA	5-250 ppm	0.2
4	Sound level meter	Sound level	Japan	0-120 dB	0.23

Nota: La tabla especifica los instrumentos utilizados en la investigación de Ahmed et al. (2020).

Tabla 3

Comparación de los límites de contaminantes según la EPA, la OMS e Irak vs el estudio en la Universidad Tecnológica de Irak.

No.	The pollutant	Exposure time (h)	Concentrations			
			EPA	WHO	Iraqi Standard	Recent study
1	CO	8	0.09	0.011	0.035	0.23
		1	20	-	15	17.34
2	SO ₂	24	0.04	0.06	0.05	0.61
		1	0.25	0.75	0.60	0.445
3	NO ₂	24	0.099	-	0.067	0.15
		1	0.018	0.021	0.021	0.1213
4	VOC	8	0.080	0.060	0.057	0.25
		1	0.09	-	.088	0.167

Nota: La tabla muestra los límites máximos para las concentraciones de las emisiones contaminantes establecidos por la EPA, OMS e Irak, en comparación con los datos del estudio de Ahmed et al. (2020).

Por su parte, Shakya et al. (2022) calcularon las emisiones de contaminantes atmosféricos de generadores diésel cautivos y la manera de cómo mitigarlos a través de microrredes y energía solar. Estos autores refieren que el suministro de energía de la red en muchos países en desarrollo es escaso e irregular, lo que obliga a muchos usuarios comerciales a depender de generadores diésel cautivos (GD) fuera de la red. A pesar de la ineficiencia y alta contaminación del aire, los usan como energía de respaldo. Las variables investigadas fueron el consumo de combustible y el nivel de emisiones de dichos GD. Se explora la manera de reducirlos con la formación de una microrred de GD y energía solar fotovoltaica en una zona comercial en Katmandú, Nepal. Diseñaron un sistema de microrred utilizando el marco HOMER para sistemas de GD y de energía solar fotovoltaica. La microrred mejorada basada en GD redujo el consumo específico de combustible en un 19% y el costo en un 5%. También, bajaron las emisiones de contaminantes atmosféricos clave (PM, PM₁₀, CO y COV) entre 21% y un 92% en comparación con la línea de base. En cambio, al utilizar la microrred basada en energía solar fotovoltaica, las emisiones pueden reducirse en un 100%, pero el costo sube 27%. Sin embargo, el beneficio económico para el país sería considerable porque bajarían los costos externos de importación de combustibles fósiles y generadores, bajarían los niveles de contaminación atmosférica y los efectos adversos para la salud de las personas.

También, Husain (2024) evaluó el impacto ambiental de las emisiones de gases tóxicos de los generadores eléctricos privados, que afectan al medio ambiente. Se registraron 15 generadores diésel confinados en áreas residenciales específicas en la ciudad de Kirkuk (Irak). El estudio de campo se orientó a las mediciones de las cantidades de HCl, H₂S, SO₂, NO₂, NO₂, CO₂, CO, O₂, la temperatura y la humedad relativa en los gases de escape para compararlos. Encontró que las concentraciones variaban dependiendo de los parámetros de los generadores y eran altas. Los valores de difracción se distinguieron en la ubicación A4, caracterizada por mayores concentraciones de contaminantes que el caso estándar, esto debido a la antigüedad operativa del generador y la mayor cantidad de viviendas a las que servía en relación con su capacidad de generación, que excedía su límite de diseño.

Por su parte, Yousefi y Mokaramian (2025) en Irán realizaron una investigación estadística correlacional respecto a los contaminantes atmosféricos como el gas natural, fueloil y diésel entre 2000 y 2017. Determinaron que, entre los años evaluados, el gas natural fue el principal productor de CO₂, mientras que el diésel fue responsable de una mayor contaminación general, a pesar de su bajo consumo. Además, hallaron correlaciones significativas entre los niveles de contaminación y los tipos de combustible, donde el diésel es el que produce mayores emisiones de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono en comparación con el gas natural, lo que demanda la necesidad de regulaciones más estrictas y la búsqueda de alternativas de combustibles más limpios. Sobre estos resultados, los autores recomiendan invertir en tecnologías avanzadas para controlar las emisiones, como aquellas para la reducción catalítica selectiva (SCR) y los filtros de partículas diésel (DPF), las cuales pueden bajar significativamente las emisiones, convirtiendo los óxidos de nitrógeno y capturando las partículas del escape. Además, precisan que es fundamental el monitoreo y seguimiento de los consumos y emisiones, para informar periódicamente sobre el consumo y para la formulación de políticas informadas, que incluyan la identificación de tendencias para evaluar si las metodologías estratégicas son exitosas con la calidad del aire y la salud.

Igualmente, Garg et al. (2022) encontraron menos contaminantes en las emisiones del gas natural, siguiendo la metodología de inventarios horarios de las emisiones tóxicas atmosféricas para generadores de electricidad del este de Australia, derivados de datos de distribución energética entre 2010 y 2019 para dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, material particulado (PM) y mercurio (Hg). Encontraron que las emisiones de las centrales eléctricas de gas son significativamente más bajas que las de las centrales eléctricas de carbón para todos los contaminantes, por ejemplo, en 2019, las centrales eléctricas de carbón en Australia emitieron cantidades significativas de SO₂, (485,7 kT) y NO₂ (452 kT), ante la falta de controles de dióxido de azufre u óxido de nitrógeno. Por el contrario, las emisiones de PM son mitigadas con dispositivos de control de PM, y las centrales eléctricas de carbón emiten un estimado de 27,48 y 13,46 kT de PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente. El análisis temporal detalla que las emisiones de las centrales eléctricas de carbón y gas varían bastante marcadamente durante el día y la semana, determinando que la existencia de un fuerte ciclo diurno en las emisiones de las centrales eléctricas de gas, que, de ignorarse asumiendo emisiones constantes, ocasionaría errores significativos en la contaminación atmosférica modelada.

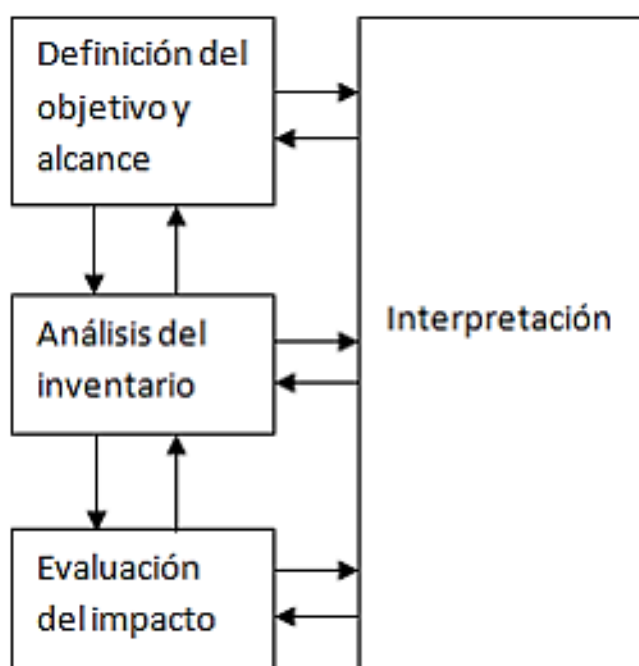
También, Al Rashdi et al. (2024) realizaron una evaluación comparativa del impacto ambiental con diferentes estrategias de generación de energía en Omán. La metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y la herramienta Open LCA se usó para analizar y evaluar los diversos aspectos ambientales para cubrir la brecha de investigación con la sustitución de generadores diésel convencionales por alternativas de gas natural en Omán. Los resultados indicaron que el uso de gas natural baja significativamente el impacto ambiental, incluyendo una reducción del potencial de calentamiento global a 2,27 millones de kg de CO₂ eq, el agotamiento de combustibles fósiles a 34,5 millones de kg de petróleo eq y el agotamiento de la capa de ozono a 0,13 kg de CFC-11 eq. Estos detalles pueden contribuir a la toma de decisiones políticas para respaldar un posible cambio en el sistema de generación de energía, cambiando el uso actual de grupos electrógenos diésel al gas natural de las plantas de procesamiento de petróleo crudo. Así, disminuirían costos operativos y mejoraría la eficiencia para el desarrollo sostenible.

Además, se destaca la implementación de acciones energéticas más sostenibles que respalden la aplicación amplia del ACV en la evaluación del impacto ambiental industrial. Estos resultados se alinean con los recientes compromisos globales sobre cambio climático y la Visión 2040 de Omán, bajar el daño ambiental del sector petrolero y el gas, con fuentes de energía más limpia.

En la figura 3 podemos observar el método del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) también fue aplicado por Garzón (2010), para evaluar el impacto ambiental de la generación de energía, renovables y no renovables, con enfoque cuantitativo para comparar las diferentes tecnologías en la fase de generación de electricidad. Utilizó el software profesional SimaPro 7.1, de Pré Consultant, para evaluar el impacto ambiental; la metodología incluyó las fases de la producción de electricidad para su evaluación ambiental mediante el Ecoindicador 99, donde observó los procesos que mayor influyen en el Ciclo de Vida. Se destaca que en energías no renovables influye mucho el combustible fósil (diesel) para la generación eléctrica con un GE, lo cual genera muchos contaminantes que se expulsan a la atmósfera.

Figura 3

Fases del ACV de un producto o proceso.



Nota: La figura se tomó de la investigación de Garzón (2010).

Además de los gases contaminantes lanzados al entorno medio ambiental, también se contamina con el ruido que generan los motores, que es una de las principales fuentes de molestia para la ciudadanía y el medio ambiente, causando problemas de salud y alterando las condiciones naturales de los ecosistemas. Esta contaminación se presenta a mayor escala en las grandes ciudades, ocasionando lesiones fisiológicas y psicológicas (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2023). A pesar de que en Ecuador existe la Ley de Gestión Ambiental y su Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental; normativa jurídica sobre la cual, la Cámara de Industrias y Producción del Ecuador, ha establecido la “Norma Técnica que establece los límites permisibles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles” (CIP.org.ec, 2015).

El Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE) es la institución encargada del control y seguimiento del ruido, mediante auditorías ambientales y teniendo en cuenta el Plan de Manejo Ambiental con el que cuentan los distintos proyectos y actividades, luego de lo cual elabora reportes de monitoreo ambiental, con metodología estandarizada y mediante laboratorios acreditados. El MAE expresa que los sonidos con mayor intensidad provienen de: industrias; tráfico de vehículos; construcciones y eventos deportivos recreativos, entre otras. Para lo cual ha expedido la normativa sobre “Límites permisibles de niveles de ruido ambiente para fuentes fijas, fuentes móviles y vibraciones”, la “Norma de Ruido de Aeropuertos”, presentes en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) (Registro Oficial Edición Especial N° 2, 2017).

Para las mediciones del ruido existe la norma jurídica dispuesta en el Registro Oficial - Año II - Edición Especial N° 270 (2015), que establece los niveles máximos de emisión de ruido los cuales se detallan en la tabla 4:

Tabla 4

Niveles máximos de emisión de ruido (LKeq) para fuentes fijas de ruido

NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN DE RUIDO PARA FFR		
Uso de suelo	LKed (dB)	
	Periodo Diurno	Periodo Nocturno
	07:01 hasta 21:00 horas	21:01 hasta 07:00 horas
Residencial (R1)	55	45
Equipamiento de servicios Sociales (EQ1)	55	45
Equipamiento de servicios Publico (EQ2)	60	50
Comercial (CM)	60	50
Agrícola Residencial (AR)	65	45
Industrial (ID1/ID2)	65	55
Industrial (ID3/ID4)	70	65
Uso Múltiple	Cuando existen usos de suelo múltiple o combinados se utilizará el LKeq más bajo de cualquiera de los usos de suelo que componen la combinación. Ejemplo: Uso de suelo: Residencial + ID2 LKeq para este caso = Diurno 55 dB y Nocturno 45 dB	
Protección Ecológico (PE) Recursos Naturales (RN)	La determinación del LKeq para estos casos se lo llevara a cabo de acuerdo al procedimiento descrito en el Anexo 4	

Nota: La tabla se tomó del Registro Oficial - Año II - Edición Especial N° 270 (2015).

De manera particular, en la ciudad de Cuenca – Ecuador, el Concejo Cantonal aprobó la Ordenanza de Control, Regulación y Sanción de la Contaminación Ambiental Originada por la Emisión de Ruido Proveniente de Fuentes Fijas y Móviles, para regular y controlar los niveles de ruido, lo cual significa un gran avance para la ciudadanía, que demanda un ambiente más tranquilo y saludable. De esta manera, un operador tiene la obligación de presentar un Plan Preventivo de Contaminación Acústica requerido por la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) en el plazo de diez días, contados desde la respectiva notificación. (Alcaldía de Cuenca, 2024).

Hasta el año 2021, el GAD del Cantón Cuenca y la Universidad del Azuay realizaron mediciones del ruido en el cantón, dividiéndolo por zonas:

- Zona de equipamientos de servicios sociales (EQ1)
- Zona Residencial (R1)
- Zona Comercial (CM)
- Zona Industrial (ID3/ID4)

De acuerdo con el propósito de la presente investigación, a continuación, en la figura 4 se muestran los valores de mediciones de ruido en la Zona Comercial (CM). A pesar de que los valores en dB para las zonas comerciales son más permisibles que para las zonas residenciales, se observa que todos los registros obtenidos se encuentran sobre los valores máximos admisibles, de conformidad con las normativas jurídicas (GAD Cantón Cuenca y Universidad del Azuay, 2022).

Figura 4.

Valores promedio (dB) promedio de mediciones de ruido en la zona comercial (CM).

COLOR EN LA TABLA	PUNTO DE MEDICIÓN	SECTOR	2021 RUIDO PROMEDIO (Decibeles)						2020 RUIDO PROMEDIO (Decibeles)						2019 RUIDO PROMEDIO (Decibeles)					
			07h01	10h00	13h00	15h00	18h00	21h01	07h01	10h00	13h00	15h00	18h00	21h01	07h01	10h00	13h00	15h00	18h00	21h01
	R-01	El Estadio	65,0	67,5	69,9	68,9	71,9	64,5	64,3	69,4	70,6	69,1	70,8	65,3	69,3	72,4	70,0	68,9	69,1	67,8
	R-03	Aeropuerto Mariscal Lamar	64,4	65,8	66,8	67,6	69,8	58,9	68,8	67,4	72,5	67,9	67,2	60,8	69,2	68,2	68,4	68,8	71,2	65,0
	R-05	Remigio Crespo	67,3	70,0	73,1	74,0	73,1	70,4	68,5	71,3	72,1	70,3	74,0	74,0	72,2	71,4	74,0	71,6	71,1	71,9
	R-19	Redondel Paseo de los Cañaris	70,6	72,7	72,3	73,0	74,7	70,6	69,2	72,0	71,9	71,9	72,2	71,9	73,4	72,1	73,6	72,7	73,2	69,8
	R-21	Feria libre	69,9	72,5	69,9	70,3	70,9	65,4	70,5	70,4	69,3	68,0	68,9	65,9	72,0	68,8	71,4	70,4	70,7	67,0
	R-23	Av. de las Américas y Don Bosco	71,3	72,7	71,5	70,2	70,4	69,9	70,4	72,0	70,9	71,3	73,4	69,1	73,1	72,4	72,6	72,4	72,4	70,1
	R-24	Control Sur	79,0	75,2	73,9	72,7	75,2	72,1	75,3	75,8	74,8	74,1	74,2	70,2	73,9	78,1	74,0	74,4	71,0	70,8
	R-25	Gran Colombia	70,1	69,1	69,6	70,7	69,9	66,7	67,6	68,8	68,6	69,7	71,8	67,0	72,9	70,5	72,5	72,8	70,8	67,8
	R-27	Chola Cuencana	65,4	67,6	67,9	69,8	70,5	69,5	66,9	69,9	68,4	73,6	68,2	68,2	72,2	71,5	72,4	71,5	72,0	65,6
	R-29	Bajada del Centenario	69,6	70,4	70,9	71,3	70,0	70,3	71,6	70,1	70,1	72,3	71,4	68,8	75,7	74,5	74,9	73,6	74,6	71,1
	R-32	Autopista y Felipe Segundo	77,8	77,4	77,1	76,7	78,1	76,3	77,7	76,8	76,6	77,1	77,6	73,0						
	R-35	Redondel Simón Bolívar	68,4	71,0	70,3	73,4	70,4	67,4												
	R-39	Parque Calderón	60,9	66,8	65,2	62,9	71,3	66,5												

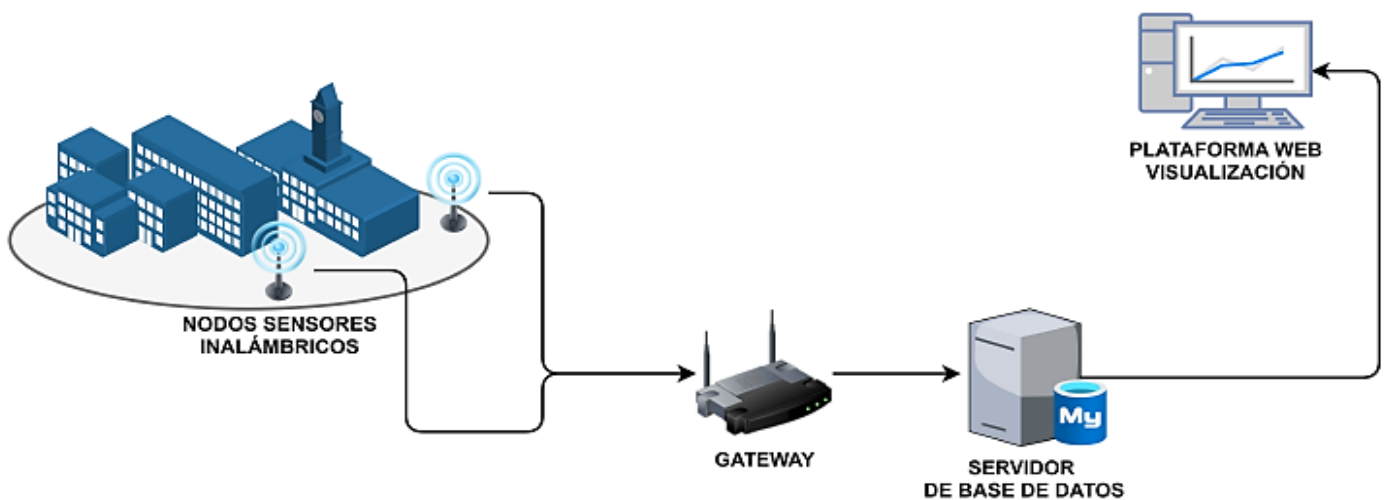
Nota: La tabla fue publicada por el GAD Cantón Cuenca y la Universidad del Azuay (2022).

Después, Martínez et al. (2024), refieren que el aumento de emisiones sonoras se relaciona con la actividad antrópica y el centro urbano es donde se presentan afectaciones a la población y al entorno. Evaluaron dos componentes, primero el comportamiento sonoro en el área urbana de Cuenca-2019, donde monitorearon 31 puntos en la ciudad en función del tráfico promedio diario, uso del suelo y dinámicas de la población; se ajustaron a la norma ambiental TULSMA. Los resultados indican que el ruido sobrepasa los límites de la norma en el 100% para la zona EQ1, 96% en la zona R1, 100% en la zona CM y 72% en la zona ID3/ID4. En el segundo componente, compararon los datos levantados con sensor y sonómetro, en seis nuevas estaciones de monitoreo (denuncias de ruido que hizo la ciudadanía al GAD de Cuenca). Se obtuvo un alto coeficiente de correlación ($r = 0,8$) y de determinación ($R^2 > 0,6$), entre los datos medidos con sensor y sonómetro.

La investigación de Martínez et al. (2024), se desarrolló en el área urbana de Cuenca, donde su metodología se orientó a levantar información con Sonómetro modelo SOUNDPRO DL-2-1/3 SLM, serie BCQ120001, Clase 1 integrador y debidamente certificado, que permite obtener el nivel promedio equivalente de manera automática sobre la base de todas las muestras que se registren en el período determinado (15 minutos). El dato levantado por cada punto de monitoreo fue el nivel de sonido equivalente (Leq) con escala A/C, apropiado para el monitoreo de ruido ambiental, ya que mide el nivel constante de ruido con el mismo contenido de energía, que la variación acústica de la señal sonora calculada. Para los sensores de ruido se sigue el modelo de internet de las cosas, constituido por un conjunto de nodos sensores inalámbricos que forman una red y tienen la capacidad de procesamiento, almacenamiento y comunicación; dotados de una batería, como se puede observar en la figura 5:

Figura 5.

Esquema de la red de sensores inalámbricos y transmisión de datos establecidos.



Nota: La figura muestra la metodología seguida para el levantamiento de datos en la investigación de Martínez et al. (2024).

En síntesis, el uso de generadores de electricidad durante la crisis energética en Ecuador se generalizó tanto en los comercios como en los hogares, sin considerar que estos motores al funcionar con combustibles fósiles (diésel o gasolina), expulsan GEI como CO₂, CO y NO, que contribuyen al cambio climático. Por lo menos, uno de estos motores de uso doméstico, aproximadamente, consume dos litros de diésel por hora; lo que significa 52 Kg de dióxido de carbono (CO₂). Además, el ruido que generan los motores produce contaminación ambiental perjudicial para los ciudadanos y los propios dueños de esos generadores (Crónica.com.ec, 2024).

Esos contaminantes del medio ambiente impactan mucho en la salud humana, por ejemplo, los GEI como NO y NO₂, producen inflamación de las vías aéreas, afecciones al hígado o el bazo, e incluso problemas en el sistema circulatorio e inmunológico, lo que aumenta la susceptibilidad a infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias. El SO₂, puede producir irritación e inflamación del sistema respiratorio y dolores de cabeza o ansiedad. Las PM₁₀ y PM_{2,5} pueden ser inhaladas, penetrar en el sistema respiratorio y llegar a los alveolos pulmonares, agravando las afecciones respiratorias y cardiovasculares, y en algunos casos, pueden causar una muerte prematura. El CO, puede entrar a los pulmones y disminuir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, provocando disfunciones en órganos y tejidos, además daña el sistema nervioso y cardiovascular, causando fatiga, mareos y dolores de cabeza (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España [MITECO], 2022).

Al respecto, los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), toxicológicamente, son los más importantes a considerar; no son inflamables y son incoloros a pardo en apariencia a temperatura ambiente y son liberados desde el escape de los motores, por la combustión de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón). Los niveles bajos de NO y NO₂ en el ambiente pueden irritar los ojos, nariz, garganta, pulmones, y posiblemente causar tos, falta de aire, cansancio y náusea. También, puede producir acumulación de líquido en los pulmones hasta dos días después de la exposición. En cambio, los altos niveles de NO y NO₂ puede producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en las vías respiratorias superiores, bajando la oxigenación de los tejidos del cuerpo, generando acumulación de líquido en los pulmones y la muerte (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR / CDC], 2016).

También, el dióxido de azufre (SO₂) irrita los ojos, garganta y vías respiratorias. La sobre exposición inflama e irrita provocando ardor en los ojos, tos, dificultades respiratorias y tensión en el pecho. Las personas asmáticas son especialmente sensibles al SO₂ reaccionando ante concentraciones bajas como 0.2 a 0.5 ppm, además, el SO₂ puede ser peligroso para personas con enfermedades cardíacas o pulmonares previas. La exposición prolongada a concentraciones por encima de 20 ppm podría causar parálisis o muerte (International Volcanic Health Hazard Network [IVHHN], 2025).

El Monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que puede entrar al cuerpo de los animales vivos, como las personas, a través de los pulmones y disminuir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, provocando disfunciones en órganos y tejidos, dañando el sistema nervioso y cardiovascular, causando fatiga, mareos y dolores de cabeza. Sus efectos son devastadores para la salud. Además, contribuye a la formación de GEI. Este CO en la atmósfera tiene una vida media de casi tres meses, durante los cuales se oxida lentamente para formar CO₂, liberando además ozono (MITECO, 2022). Cada año, aproximadamente 420 personas mueren en EEUU por intoxicación accidental por CO. En este mismo país, cada año más de 100.000 personas entran a la sala de emergencias debido a intoxicación accidental por CO (Centers for Disease Control and Prevention [CDC], 2023).

Así mismo, las partículas suspendidas en el aire (PM) son contaminantes muy peligrosos para la salud, especialmente las PM₁₀ (de 10 micras o menos) y las PM_{2,5} (de 2,5 micras o menos), porque pueden ser inhaladas y penetrar en el sistema respiratorio, llegando hasta los alvéolos pulmonares. Estas partículas finas pueden transportar sustancias dañinas que agravan problemas respiratorios y cardiovasculares, y pueden provocar una muerte prematura. “Las partículas ultrafinas (UFP), que son menores de 0,1 micras, pueden ingresar al torrente sanguíneo y afectar varios órganos, incluido el sistema nervioso central y el reproductivo” (MITECO, 2022).

Ese material particulado es de muchos tamaños y formas, contiene cientos de diferentes químicos. Algunos se emiten directamente desde una fuente, como motores de combustión, obras en construcción, caminos sin asfaltar, campos, chimeneas o incendios. Sin embargo, es preciso considerar que la mayoría de PM se forma en la atmósfera por las reacciones complejas de químicos, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, ambos contaminantes emitidos por los automóviles, centrales eléctricas, industrias, entre otros. Son sólidos microscópicos y gotas de líquido muy pequeños que pueden inhalarse y poner en peligro la salud de las personas. Las partículas menores a 10 micrómetros de diámetro causan mayores problemas, porque pueden llegar hasta la profundidad de los pulmones, inclusive pueden alcanzar el torrente sanguíneo, como las partículas finas (PM_{2,5}), que son la causa principal de visibilidad reducida (bruma) en partes de los EEUU, como sucede en muchos de los apreciados parques nacionales y áreas silvestres (Agencia de Protección Ambiental de EEUU [EPA], 2025).

A pesar del generalizado uso por su alto contenido energético y bajo costo, los combustibles fósiles, como el diésel y la gasolina, contribuyen drásticamente a la contaminación del aire y al efecto invernadero. La gravedad de los contaminantes ambientales y las regulaciones de esas emisiones son cada vez más rigurosas y se orientan a lograr avances importantes con las tecnologías de control de emisiones para motores de combustión interna. Así los estudiaron Fayyazbakhsh et al. (2022) abordando los principales contaminantes liberados por los motores diésel y de gasolina, incluyendo material particulado (PM_{2,5}, PM₁₀), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos no quemados (UHC), y su formación. También examinaron las tecnologías actuales para controlar tanto los contaminantes atmosféricos como los GEI (vapor de agua, CO₂, y N₂O), con un enfoque particular en el período de la pandemia de COVID-19. La investigación también exploró los desafíos que presentan estas emisiones y las estrategias utilizadas para reducir las, ofreciendo una base para investigaciones futuras, sobre cómo disminuir la contaminación del aire y los gases de efecto invernadero de estos motores.

También, Razek et al. (2025), precisan que, indudablemente, el calentamiento global o cambio climático impulsado principalmente por el incremento de las emisiones de combustibles fósiles, está generando graves repercusiones en el medio ambiente y la agricultura. Para avanzar hacia un crecimiento sostenible, es crucial implementar soluciones de manera urgente. Por tal razón, es importante considerar que los métodos de limpieza de los gases de escape diésel, los sistemas de postratamiento de emisiones pierden eficacia con el tiempo, lo que puede afectar el rendimiento del motor y bajar los estándares de purificación para cumplir con las normativas y los objetivos ambientales. En este sentido, existen sistemas avanzados como la Reducción Catalítica Selectiva (SCR) y los Filtros de Partículas Diésel (DPF), aunque esenciales para la eficiencia y la durabilidad, representan una inversión significativa en costos. A estos se suman los gastos de instalación, especialmente en proyectos de modernización, así como los continuos costos de mantenimiento y piezas de repuesto. Pero, a pesar de estos considerables desembolsos iniciales y operativos, la implementación de estas unidades es vital para cumplir con las regulaciones ambientales y mitigar los riesgos para la salud derivados de las emisiones diésel. Para aliviar la carga económica, se podrían explorar incentivos y subsidios gubernamentales que fomenten la adopción de tecnologías más limpias. Lo mismo, deberían estructurarse políticas públicas para todo tipo de contaminación ambiental, con los ruidos.

El ruido o contaminación acústica, puede generar problemas de salud como: cardiovasculares, estrés, depresión, acúfenos, socioacusia (pérdida auditiva causada por la exposición prolongada al ruido ambiental), perturbaciones del sueño, pérdida auditiva, problemas de comunicación, daños al sistema nervioso y bajo rendimiento laboral (Obra Social del Personal de la Actividad del Turf [OSPAT], 2025). En el ámbito laboral, Argudo y Pérez (2022), encontraron que los trabajadores expuestos al ruido tienen 4,2 veces más probabilidad de sufrir ansiedad, de leve a extremadamente grave, que aquellos trabajadores que no están expuestos a laborar con sonidos molestos, lo cual confirma la existencia de una prevalencia de ansiedad asociada al ruido.

Así, en el ámbito laboral la exposición al ruido representa un riesgo significativo para la salud de los trabajadores, porque puede generar diversas afecciones físicas como trastornos respiratorios, cardiovasculares, digestivos y visuales. Además, contribuye al estrés y aumenta la probabilidad de accidentes. También, puede haber pérdida de audición inducida por el ruido, afección que se desarrolla por la exposición prolongada a ruidos intensos, afectando inicialmente la percepción de sonidos agudos y, después, la de tonos más bajos en ambos oídos. Es importante destacar que este tipo de pérdida auditiva es irreversible. Pero, una exposición breve e intensa a ruidos impulsivos, como los de armas de fuego o herramientas de remachado, puede causar daños permanentes como la pérdida de audición y el tinnitus (zumbido constante en los oídos), e incluso la perforación del tímpano, aunque esta última suele ser dolorosa pero curable (European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA], 2005).

La exposición de mujeres embarazadas a altos niveles de ruido puede perjudicar al feto, además de provocar un aumento de la presión arterial y fatiga en la madre. Estudios sugieren que la exposición prolongada a ruidos fuertes durante el embarazo podría afectar el oído del bebé, siendo las bajas frecuencias las más propensas a causar daño. Además, es fundamental recordar que el equipo de protección personal de la madre no resguarda al feto de los riesgos físicos (EU-OSHA, 2005).

Por otra parte, el ruido incrementa el riesgo de accidentes laborales, porque dificulta la escucha y comprensión de voces y señales; enmascara sonidos de peligros inminentes o advertencias; distrae a los trabajadores, como conductores y contribuye al estrés laboral, lo que sobrecarga cognitivamente y eleva la probabilidad de errores. El estrés laboral puede depender de varios factores, como: la naturaleza del ruido (volumen, tono, previsibilidad); la complejidad de la tarea (el habla de otros puede ser estresante si se requiere concentración); la profesión del trabajador (músicos preocupados por la pérdida auditiva) y el estado individual del trabajador (el cansancio puede hacer que ruidos normalmente inofensivos se vuelvan estresantes) (EU-OSHA, 2005).

También, la comunicación efectiva es crucial en todo entorno laboral. El ruido ambiental puede obstaculizarla, especialmente si es constante, si el oyente tiene alguna pérdida auditiva previa, si el idioma no es su lengua materna o si su estado físico o mental está comprometido por enfermedad, fatiga o estrés. Las consecuencias de una deficiente comunicación varían según el entorno; por ejemplo, los docentes pueden forzar la voz, lo que deriva en problemas en las cuerdas vocales, y los operadores de maquinaria pesada pueden malinterpretar instrucciones, resultando en accidentes (EU-OSHA, 2005).

En general, la *European Environment Agency* (EEA) precisa que la exposición continua al ruido puede impactar la salud de diversas maneras, generando incomodidades, alteraciones del sueño, efectos negativos en los sistemas cardiovascular y metabólico, así como déficits cognitivos en niños. Los datos recientes sugieren que el ruido ambiental contribuye anualmente a 48.000 nuevos casos de cardiopatía isquémica y 12.000 muertes prematuras. Además, se estima que 22 millones de personas experimentan molestias crónicas significativas, y 6,5 millones sufren alteraciones graves y crónicas del sueño. En relación con el ruido producido por aeronaves, se estima que 12.500 niños en edad escolar enfrentan dificultades en la lectura (EEA, 2020).

Existe gran variedad de investigaciones sobre la contaminación acústica, a nivel internacional y nacional, como, por ejemplo, la realizada por Menéndez-Tóala y Osejos-Merino (2024), quienes indagaron sobre la contaminación acústica y su incidencia en la salud de los habitantes de Sancan (1.225 habitantes), ubicado en el Cantón Jipijapa – Ecuador; con una metodología basada en la observación previa y la aplicación de varios instrumentos, así como encuestas para determinar el conocimiento de la población sobre la contaminación acústica y las afectaciones que causa en la vida diaria. Realizaron monitoreos para medir los decibelios del ruido en tres diferentes puntos, durante tres meses, en los días laborables (jueves y viernes) y días no laborables (sábado y domingo) entre las 07:30 - 08:00, 12:30 - 13:00 y 17:30 - 18:00 (horas pico). El punto más alto registrado tuvo un valor de 100,01 decibelio dB(A), lo cual estaba por encima del valor permisible en el Ecuador, según lo establecido por el TULSMA que es de 60 dB (A) para la zona comercial por el uso del suelo. El impacto ambiental que origina el ruido es alto causando efectos nocivos para la salud del hombre.

Estos mismos autores, refieren que el ruido en el área investigada es generado en un 53% por el tráfico vehicular mientras, un 40% por el paso de las motocicletas y el 7% por el sector comerciales. Además, la encuesta aplicada reveló que un 38% mencionan que la contaminación acústica produce pérdida auditiva, 33% dijo que produce estrés y un 29% dolores de cabeza. Sobre estos porcentajes se puede percibir que el tráfico de los vehículos motorizados (autos y motos) originan el 93% del ruido en el estudio realizado y que esto conduce a la pérdida auditiva, estrés y dolores de cabeza (Menéndez-Tóala y Osejos-Merino, 2024).

5. EVALUAR LOS DATOS DE COORDENADAS GEOLOCALIZACIÓN, EMISIONES CONTAMINANTES Y RUIDO, MEDIANTE MUESTREO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS, PARA LA DETERMINACIÓN DE SUS EFECTOS EN LA CONTAMINACIÓN AMBIENTA

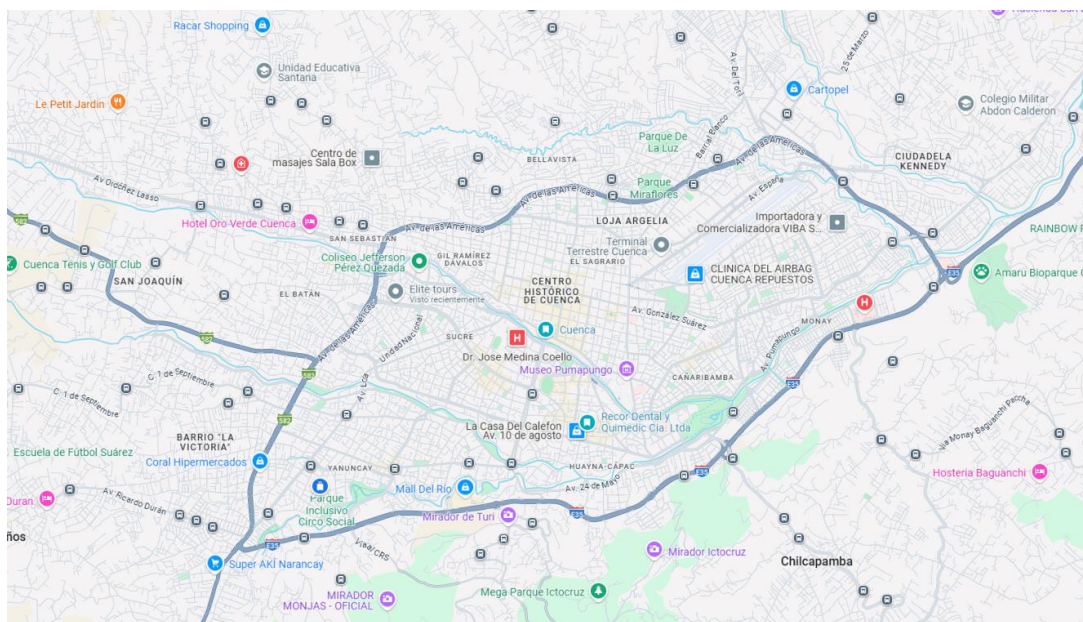
5.1. Coordenadas de geolocalización

Para el levantamiento de datos de coordenadas geográficas, se utilizó un receptor GPS Garmin GPSMAP 66sr, con precisión de ± 3 metros y datum WGS84. Las coordenadas de cada generador fueron registradas durante la medición en campo, la cual se realizó en días laborales, se estimó un total 710 generadores en contabilizados en la ciudad de Cuenca.

En la figura 6, se observa el cantón Cuenca, distribuido en cuatro zonas representativas: centro histórico, áreas residenciales, corredores comerciales y zonas industriales. La geolocalización de los generadores permitió no solo vincular espacialmente los niveles de ruido y emisiones contaminantes con su ubicación, sino también identificar patrones de concentración en distintos sectores de la ciudad. Esta distribución espacial facilitó un análisis más detallado del impacto ambiental según las características urbanas de cada zona.

Figura 6

Delimitación urbana del cantón de Cuenca.



5.2. Referencia horaria para la recolección de datos en campo

La Figura 7 muestra una de las programaciones oficiales de cortes del servicio eléctrico emitida por la empresa CENTROSUR durante el mes de noviembre de 2024. Esta información fue clave para la planificación de las mediciones en campo, ya que los datos de ruido y emisiones contaminantes de los generadores fueron recolectados de lunes a domingos, siguiendo los horarios reales de los cortes programados. Noviembre de 2024 fue seleccionado intencionalmente para el estudio por tratarse del mes con mayor frecuencia e intensidad de interrupciones eléctricas, lo que generó un uso elevado de generadores eléctricos en zonas urbanas de Cuenca, permitiendo obtener registros representativos del impacto ambiental de estas fuentes alternativas de energía.

Figura 7.

Programación oficial de cortes de energía eléctrica, emitida por CENTROSUR.

Programación
cortes del servicio
de energía eléctrica
Azúay



Lunes 25
de noviembre de 2024

06:00 a 10:00

16:00 a 19:00

RECUERDA QUE DEBIDO A LA MEJORA DE LAS CONDICIONES HIDROLÓGICAS, LOS CORTES DE ENERGÍA PUEDEN REDUCIRSE DENTRO DEL PERIODO DE CORTE PROGRAMADO

CANTÓN	ZONA DE CORTES	SECTORES
CUENCA	0203: SAN SEBASTIAN/CRUZ DEL VADO	BOLÍVAR ENTRE MIGUEL VELEZ Y JUAN MONTALVO, CLINICA BOLÍVAR, SUCRE SENTRE MIGUEL VELEZ Y GENERAL TORRES, PLAZA SAN FRANCISCO, LA CONDAMINE
CUENCA	0325: SECTOR TOTORACOCHA / CEMENTERIO / AV.PASEO DE LOS CAÑARIS / AV. HURTADO DE MENDOZA / YANAHURCO	HURTADO DE MENDOZA, CDLA. TOSI, CDLA. BANCO DE LA VIVIENDA, CENTRAL TELEFÓNICA ETAPA, YANAHURCO, RÍO CURARAY, FASAYÑÁN, SARAURCO, ALLCUQUIRO, BUERÁN, CORDILLERA, ANTISANA, PARQUE CURIQUINGA, AV. LOS ANDES, COMPLEJO TOTORACOCHA, PASEO MILCHICHIG, CALLES DEL CÓNDR, DE LOS HUANCABILCAS, YAGUARCOCHA, TOTORACOCHA, HUILA, PAN DE AZÚCAR, REVENTADOR, PASEO MILCHICHIG.



5.3. Equipos e Instrumentación Utilizada

La figura 8 corresponde a una de las jornadas de recolección de datos en campo. En ella se puede observar el procedimiento técnico aplicado durante las mediciones, el cual contempla el posicionamiento correcto del operador respecto a la fuente emisora. Este proceso fue fundamental para validar la precisión de los resultados, siguiendo los criterios técnicos establecidos por la normativa nacional vigente. La toma adecuada de distancias, ángulos y condiciones ambientales se respetó rigurosamente para cada uno de los 710 generadores.

Figura 8.

Proceso de mediciones.



La figura 9 representa el analizador de gases KANE AUTOPlus 4.2, fue el equipo utilizado con el objetivo de cuantificar los gases contaminantes emitidos por los generadores eléctricos evaluados. Este dispositivo portátil permite registrar concentraciones de gases como el CO, CO₂, HC, O₂ y el NO_x.

Figura 9

KANE AUTOPlus 4.2.



Antes de presentar las especificaciones técnicas de los instrumentos, es necesario contextualizar su relevancia. El grado de fiabilidad de las mediciones se relaciona directamente con la precisión técnica, sensibilidad y robustez de los equipos empleados. En este sentido, se utilizaron instrumentos certificados que permiten obtener datos válidos bajo condiciones reales de campo.

La Tabla 5 presenta las características más relevantes del analizador de gases KANE AUTOPlus 4.2, incluyendo los rangos de medición, tiempos de respuesta y tipo de sensores. Esta información permite comprender las capacidades del instrumento y validar su idoneidad para evaluar emisiones contaminantes en fuentes móviles como generadores eléctricos.

Tabla 5*Característica del analizador de gases KANE AUTOPlus 4.2.*

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Modelo	AutoPlus 4-2 / AutoPlus 5-2
Tipo de sensores	Infrarrojo (CO, CO ₂ , HC), celda electroquímica (O ₂ , NO – sólo en 5-2)
Gases medidos	CO, CO ₂ , O ₂ , HC, NO (5-2), Lambda o AFR, COK
Resolución	CO: 0.01% / O ₂ : 0.01% / HC: 1 ppm / NO: 1 ppm
Rangos típicos	CO: 0–10% / O ₂ : 0–21% / HC: 0–5000 ppm / CO ₂ : 0–16% / NO: 0–1500 ppm (5-2)
Exactitud (precisión)	±5% lectura o ±valor fijo (según gas), en condiciones normales (STP)
Tiempo de respuesta (T95)	Aproximadamente 20 segundos
Tiempo de calentamiento	< 2 minutos
Registro de datos	Hasta 500 pruebas almacenadas
Interfaz de comunicación	Mini USB, Bluetooth, IR (opcional para impresora)
Pantalla	LCD retroiluminada configurable por el usuario
Opciones de combustible	Gasolina, Diesel, LPG, CNG
Cálculos incluidos	Lambda, AFR, COK, NOx
Sonda	Sonda flexible con línea de 4 m y trampa de agua integrada
Calibración	Cero automáticos cada 15/30 minutos o manual con aire fresco

La figura 10 muestra el instrumento utilizado para las mediciones de los niveles de la presión sonora generada por los equipos en funcionamiento, se empleó un sonómetro Quest modelo 2100. Este dispositivo cumple con las especificaciones de precisión tipo 2, permitiendo obtener valores confiables en entornos de campo.

Figura 10*Modelo de Sonómetro 2100.*

La Tabla 6 resume las principales especificaciones técnicas del sonómetro Quest modelo 2100. Este equipo portátil ofreció resultados confiables y facilidad de manejo bajo condiciones ambientales variables. Podemos identificar su configuración, el tipo de micrófono integrado y su portabilidad, aspectos clave para garantizar mediciones estables y representativas durante el estudio.

Tabla 6

Características de Modelo de Sonómetro 2100

CARACTERÍSTICAS	DETALLES
Modelo	Quest 1100 (Tipo 1) / Quest 2100 (Tipo 2)
Precisión	Tipo 1 (alta precisión, laboratorio) / Tipo 2 (uso general en campo)
Rangos de medición	30 –100 dB, 50 – 120 dB, 70 –140 dB (seleccionables)
Rango lineal total	32 a 140 dBA / 38 a 140 dBC
Respuesta temporal	FAST (125 ms) y SLOW (1 segundo)
Micrófono	Tipo electret prepolarizado de 0.52" (13.5 mm)
Modos de operación	SPL (nivel sonoro instantáneo) y MAX (nivel máximo retenido)
Salida AC / DC	AC y DC de 0 a 1 V, impedancia de salida de 1000 ohm
Alimentación	1 batería alcalina de 9V (25–30 h de duración)
Indicadores	Sobrecarga (“+”), subrango (“Ur”), batería baja (“LOBAT”)
Peso y dimensiones	306 g, 2.8 x 9.7 x 1.3 in (modelo 1100)
Montaje	Rosca estándar de trípode de ¼" en la parte trasera
Calibración	Interna, editable mediante botones CAL y RESET
Rango de temperatura operativa	- 10 °C a + 50 °C.
Humedad	0 a 95% HR sin condensación

En la figura 11 muestra el modelo exacto de GPS empleado en el estudio. Su portabilidad y resistencia lo hacen apropiado para el trabajo de campo, asegurando el registro preciso de la ubicación geográfica en cada punto de medición. Este dispositivo incorpora tecnología GNSS multibanda, lo que le permite obtener datos exactos incluso en zonas urbanas densas o con interferencias.

Figura 11.

Receptor Garmin GPSMAP® 66sr.



La tabla 7 presenta las especificaciones técnicas del GPS Garmin GPSMAP® 66sr. Entre sus principales atributos se destacan la precisión multibanda, la conectividad avanzada y su autonomía operativa, lo cual lo convierten en una herramienta confiable para trabajos prolongados de recolección espacial en condiciones urbanas diversas.

Tabla 7

Características más importantes del Garmin GPSMAP® 66sr;

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Pantalla	3.0 pulgadas en diagonal (7.6 cm), transflectiva, color, resolución 240x400 px
Tamaño del dispositivo	6.2 × 16.3 × 3.5 cm
Batería	Interna recargable de ion de litio
Autonomía	Hasta 36 horas en modo GPS, hasta 450 h en modo expedición
Resistencia al agua	IPX7 (inmersión hasta 1 metro por 30 minutos)
Temperatura operativa	De -20 °C a 60 °C
Temperatura de carga	De 0 °C a 40 °C
Memoria interna	16 GB (con capacidad para tarjeta microSD)
Receptores satelitales	GPS, GLONASS, GALILEO (con soporte multibanda L1+L5 para mayor precisión)
Sensores	Brújula de 3 ejes, altímetro barométrico, acelerómetro
Mapas precargados	TopoActive Europa + mapas base mundiales + acceso a imágenes satelitales BirdsEye
Conectividad	Wi-Fi, Bluetooth, ANT+, USB
Compatibilidad	Garmin Explore, Garmin Connect Mobile, geocaching end vivo
Norma militar	Cumple MIL-STD-810 (resistencia a impactos, agua y temperatura)

5.4. Diseño del estudio

Para analizar el impacto del uso de generadores, se propone la aplicación de tres métodos predictivos automáticos que son regresión lineal, árbol de decisión y red neuronal, empleando los datos recopilados en campo. Estos modelos permiten comparar distintas técnicas de modelado en relación con la capacidad de estimar las emisiones contaminantes, con el objetivo de evaluar su grado de cumplimiento frente a la normativa nacional y la normativa europea EURO 6 (Consejo de la Unión Europea, 2016).

El presente estudio adopta un diseño cuantitativo y experimental, con un enfoque descriptivo y explicativo. Se enmarca en un contexto aplicado, ya que evalúa el impacto ambiental generado por el uso intensivo de generadores eléctricos durante la crisis energética de 2024 en el cantón Cuenca.

El carácter experimental se evidencia en la intervención directa en el entorno mediante la recolección estructurada de datos en campo, utilizando equipos de medición ambiental certificados para registrar niveles de ruido y emisiones contaminantes. Esta manipulación controlada de condiciones reales de operación permite establecer relaciones causales entre las variables evaluadas, especialmente entre el ruido generado y la emisión de contaminantes gaseosos.

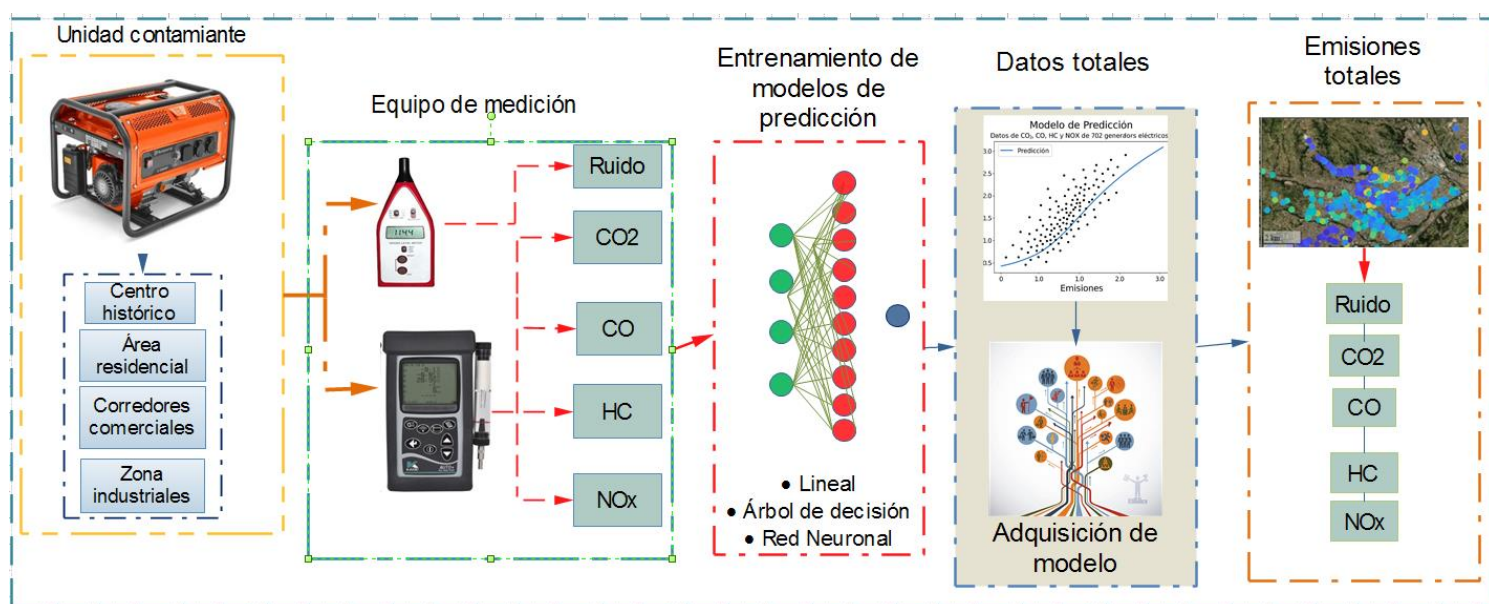
El componente descriptivo se refleja en la clasificación y caracterización de los generadores según su ubicación, tipo de zona urbana (centro histórico, áreas residenciales, corredores comerciales e industriales), tipo de combustible y condiciones de operación. A su vez, el enfoque explicativo se manifiesta en el análisis de correlaciones y patrones obtenidos mediante técnicas de aprendizaje automático, orientadas a predecir niveles de contaminación a partir del ruido ambiental.

A su vez, el enfoque explicativo se manifiesta en el análisis de correlaciones y patrones obtenidos mediante técnicas de aprendizaje automático, orientadas a predecir niveles de contaminación a partir del ruido ambiental.

La Figura 12, resume visualmente las etapas del estudio: planificación y segmentación de zonas urbanas, levantamiento de datos en campo (medición simultánea de ruido, gases y coordenadas), procesamiento y validación de la información, desarrollo de modelos predictivos (regresión lineal, árbol de decisión y red neuronal) y finalmente, estimación de emisiones totales a partir del modelo más eficiente. Este esquema metodológico garantiza una trazabilidad clara del proceso investigativo y respalda la validez de los resultados obtenidos.

Figura 12

Metodología aplicada.



5.5. Tamaño de la Muestra

Durante el periodo comprendido entre el 23 de septiembre y el 19 de diciembre de 2024, se identificó un total de 710 generadores eléctricos operativos en el cantón Cuenca. Esta cifra constituyó la población objetivo del estudio, compuesta por generadores utilizados en distintos sectores urbanos durante los apagones provocados por la crisis energética. La cual mediante la estadística correspondiente da como necesario el análisis de 248 puntos estratégicos dentro del área del cantón Cuenca, generadores usados para extrapolar los datos al total de la población con un índice de confianza del 95 % y un error inferior al 5%.

Con el objetivo de obtener resultados estadísticamente válidos y extrapolables, se determinó el tamaño de muestra requerido mediante la fórmula para poblaciones finitas, considerando los siguientes parámetros:

- Nivel de confianza: 95%
- Proporción estimada de la característica de interés (p): 0.5
- Margen de error tolerado (e): 5%
- Tamaño de la población (N): 710 generadores

El tamaño de la muestra se determina mediante la ecuación (1):

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot \sigma^2}{e^2(N-1) + Z^2 \cdot \sigma^2} \quad (1)$$

Donde:

- n: Tamaño de la muestra requerida
- N: Tamaño de la población total
- Z: Valor crítico de la distribución normal estándar (para 95% de confianza, **Z = 1.96**)
- p: Proporción esperada de la característica (0.5)
- e: Margen de error permitido (0.05)

Al aplicar esta fórmula, se obtuvo un tamaño de muestra de 248 generadores. Estos fueron seleccionados de forma estratificada, garantizando una distribución representativa en las cuatro principales zonas urbanas de la ciudad: centro histórico, áreas residenciales, corredores comerciales y zonas industriales. Esta distribución estratégica permitió capturar la variabilidad espacial del fenómeno y facilitar comparaciones sectorizadas del impacto ambiental.

5.6. Normativa Aplicable

La presente investigación se apoya en un marco normativo robusto, compuesto por regulaciones nacionales e internacionales que permiten evaluar con precisión el impacto ambiental de los generadores eléctricos utilizados durante la crisis energética de 2024 en Cuenca. Se ha considerado tanto la normativa nacional del Ecuador como estándares internacionales, como la normativa EURO 6 (Consejo de la Unión Europea, 2016), para realizar un análisis comparativo de los niveles de ruido y emisiones contaminantes.

En primer lugar, las mediciones de ruido se realizaron siguiendo las directrices establecidas en el documento "Anexo 5 de Ruido" (CIP.org.ec, 2015), emitido por la Autoridad Ambiental del Ecuador. Esta normativa establece límites máximos permisibles de presión sonora expresados en decibelios [dB(A)] según el tipo de zona urbana. La importancia de esta regulación radica en su enfoque diferenciado por uso de suelo, permitiendo una valoración contextualizada del impacto acústico. En la Tabla 8 se presentan los valores límite aplicables:

Tabla 8

Límites Máximos de Ruido por Uso de Suelo

TIPO DE ZONA	LÍMITE [dB(A)]	
	Día (06:00-20:00)	Noche (20:00-06:00)
Hospitalaria/Educativa	55	45
Residencial	60	50
Residencial Mixta	65	55
Comercial	65	55
Comercial Mixta	70	60
Industrial	75	65
Preservación Hábitat	60	50

Este enfoque normativo permite establecer si los niveles de ruido registrados en los distintos sectores urbanos sobrepasan los límites establecidos, lo que se traduce en evidencia cuantificable del impacto acústico generado por el uso masivo de generadores eléctricos.

En cuanto a las emisiones atmosféricas, se ha utilizado como base la "Norma Técnica para Emisiones a la Atmósfera de Fuentes Fijas" del Ecuador (CIP.org.ec, 2007). Esta regulación determina los valores máximos permisibles de contaminantes como material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO2) y monóxido de carbono (CO), clasificados según el tipo de combustible empleado y la antigüedad de la fuente (anterior o posterior a 2003). La tabla 9 resume estos parámetros:

Tabla 9

Límites de emisiones según tipo de combustible y periodo de fabricación

CONTAMINANTE	COMBUSTIBLES	UNIDADES	PRE-2003	POST-2003
Material Particulado	Solido	mg/Nm3	200	150
	Bunker	mg/Nm3	150	150
	Diesel	mg/Nm3	150	100
	Gaseoso	mg/Nm3	No	aplicable
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Solido	mg/Nm3	900	850
	Bunker	mg/Nm3	700	500
	Diesel	mg/Nm3	500	400
	Gaseoso	mg/Nm3	140	140
Dióxido de Azufre (SO2)	Solido	mg/Nm3	1650	1650
	Bunker	mg/Nm3	1650	1650
	Diesel	mg/Nm3	1200	1000
	Gaseoso	mg/Nm3	No	aplicable
Monóxido de Carbono (CO)	Solido	mg/Nm3	1800	1800
	Bunker	mg/Nm3	300	300
	Diesel	mg/Nm3	250	250
	Gaseoso	mg/Nm3	100	100

Asimismo, se tomó en cuenta el Reglamento (UE) 2016/427 (Consejo de la Unión Europea, 2016), el cual integra disposiciones de la norma EURO 6, reconocida por su rigurosidad en cuanto al control de emisiones de motores de combustión interna que operan con combustibles tipo gasolina. La aplicación de este referente internacional permitió establecer un marco técnico complementario para contrastar los resultados obtenidos con estándares más exigentes en materia ambiental. La EURO 6, por su enfoque detallado en la reducción de emisiones y su amplia aceptación en el ámbito regulatorio europeo, representa un punto de referencia válido dentro del análisis comparativo y predictivo que se desarrolló en esta investigación.

6. OBTENER RESULTADOS DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GENERADORES ELÉCTRICOS EN FUTURAS CRISIS ENERGÉTICAS.

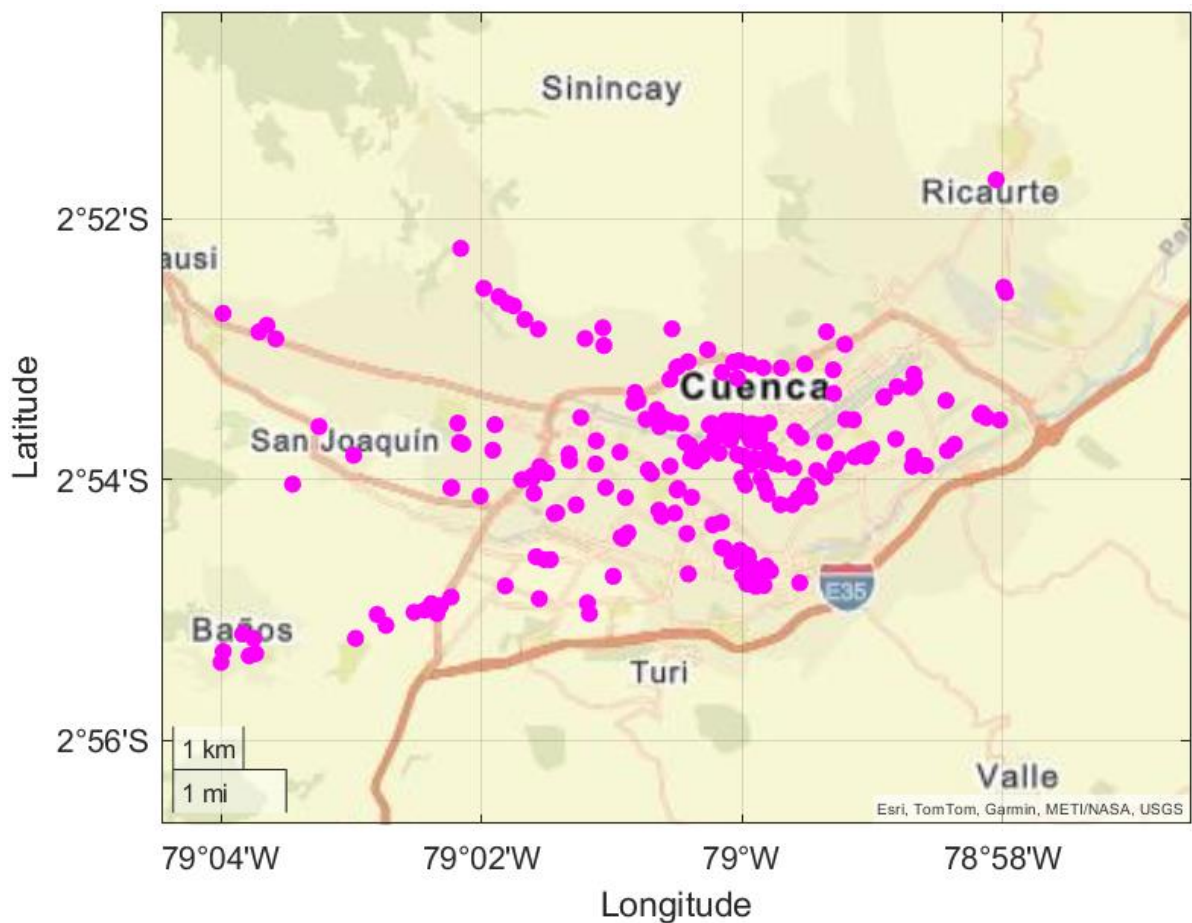
6.1. Análisis de datos

Se analizaron tres métodos predictivos para la estimación de emisiones: regresión lineal, árbol de decisión y red neuronal. Tras comparar el desempeño de los modelos, se seleccionó el árbol de decisión, debido a su mejor ajuste a los límites establecidos por la normativa EURO 6(Consejo de la Unión Europea, 2016).

La figura 13 muestra las mediciones realizadas en la ciudad de Cuenca en la muestra de 248 generadores.

Figura 13.

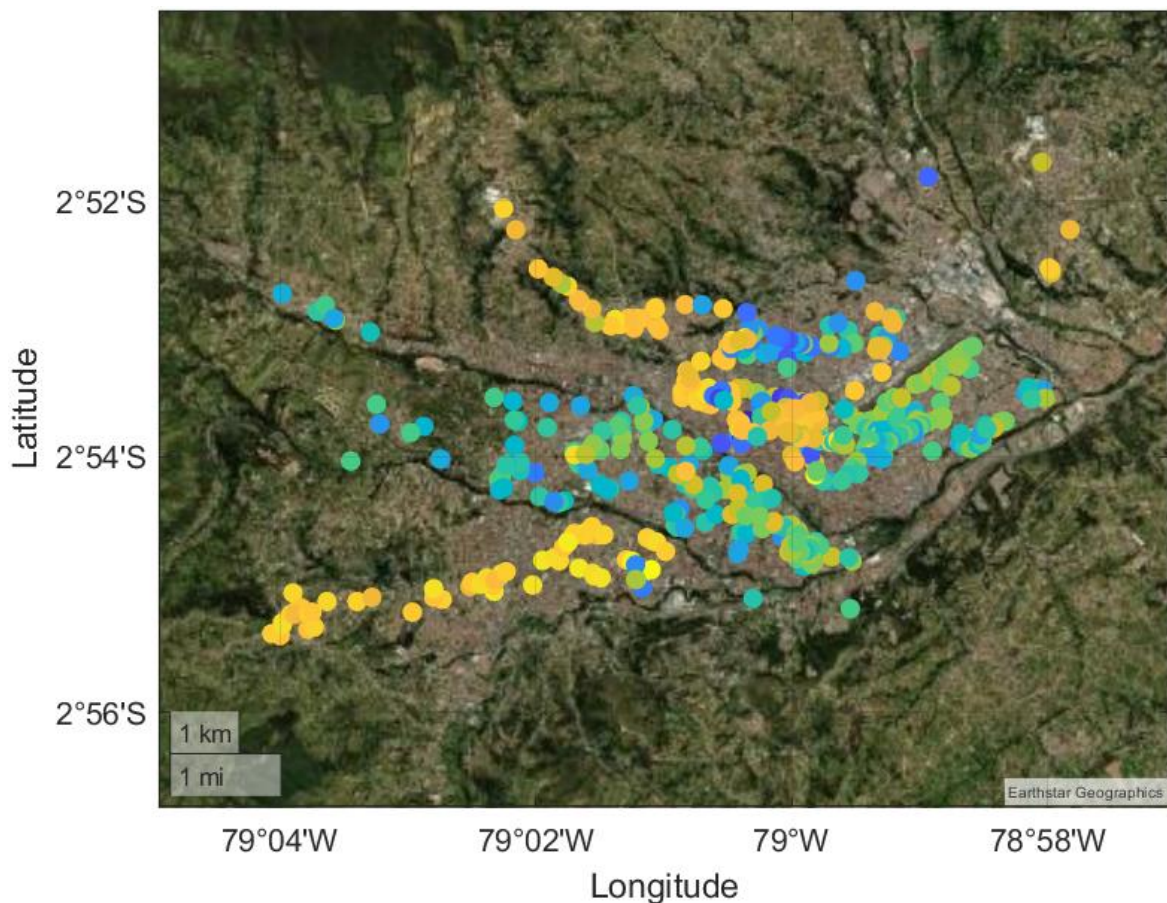
Ubicación de 248 generadores en Cuenca, Ecuador.



En este estudio se analizaron 248 generadores eléctricos, registrando tanto sus niveles de emisiones contaminantes (CO_2 , CO, HC y NO_x) como el nivel de ruido generado, con el propósito de utilizar esta muestra como base estadística para el desarrollo de modelos predictivos. A partir de estos datos, se entrenaron tres tipos de modelos de inteligencia artificial: regresión lineal, árbol de decisión y red neuronal, con el fin de estimar las emisiones únicamente a partir del ruido. Posteriormente, estos modelos se aplicaron a un segundo conjunto de 710 generadores, para los cuales solo se disponía de datos de ruido, permitiendo así predecir sus emisiones contaminantes mediante los modelos previamente entrenados. Para la etapa de entrenamiento se utilizaron el 70% de los datos mientras que para el entrenamiento y validación se utilizaron el 15% respectivamente. En la Figura 14, podemos observar el mapa con los 710 generadores en el cantón de Cuenca.

Figura 14.

Ubicación del total de los 710 generadores.



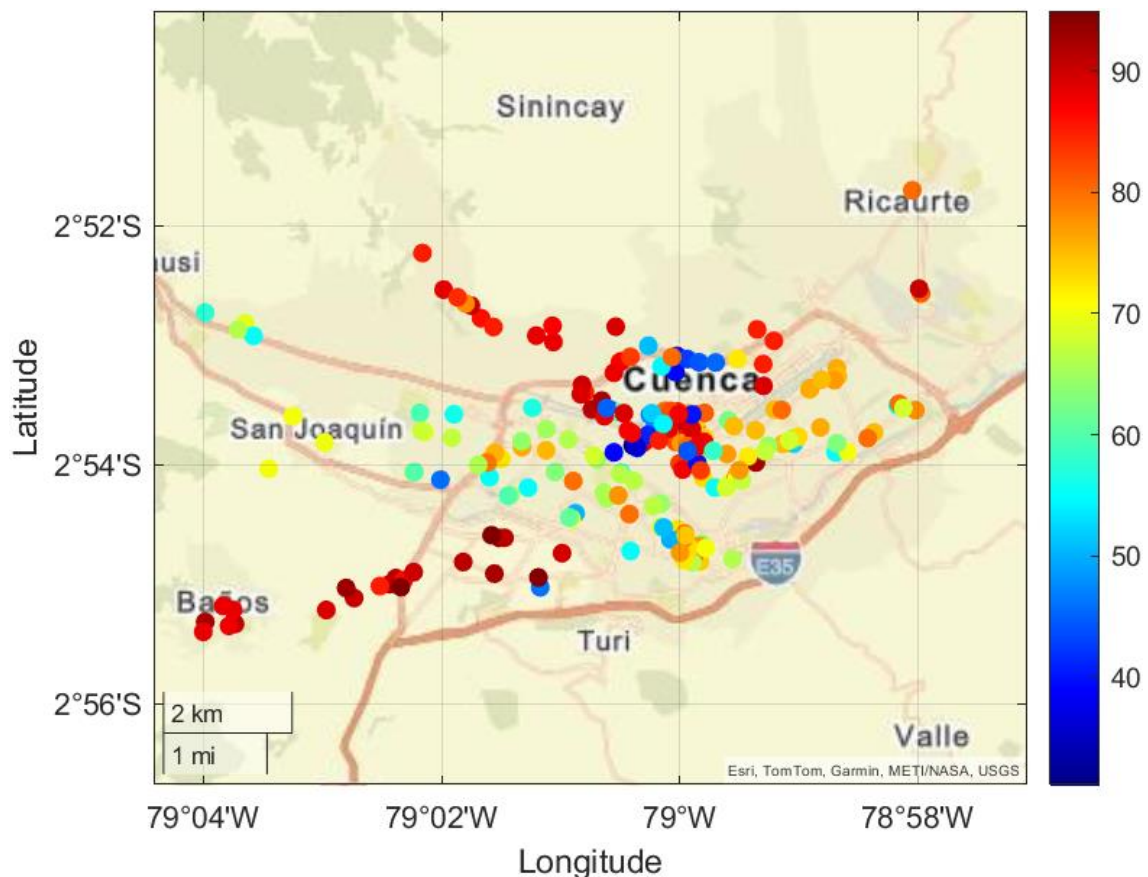
6.2. Análisis de resultados de campo en 248 generadores eléctricos

Las siguientes figuras presentan el análisis espacial y estadístico de las emisiones contaminantes y niveles de ruido registrados en 248 generadores eléctricos evaluados.

En la figura 15 podemos observar los niveles de ruido, los valores registrados varían entre un mínimo de 35 dB y un máximo de 98 dB, lo que evidencia una amplia dispersión entre generadores ubicados en distintas zonas de Cuenca. La media general fue de 74,04 dB, mientras que la moda, es decir, el valor más frecuente, fue de 88 dB. En el mapa, los colores azules y celestes reflejan generadores con emisiones sonoras bajas, ubicados sobre todo en zonas periféricas como San Joaquín, Baños o Turi. En contraste, los colores cálidos, especialmente rojos intensos, indican zonas con niveles de ruido críticos, agrupados en sectores urbanos densamente poblados. Esta distribución refleja el impacto acústico desigual generado por estos equipos y subraya la necesidad de regulaciones más estrictas en áreas de alta concentración poblacional.

Figura 15

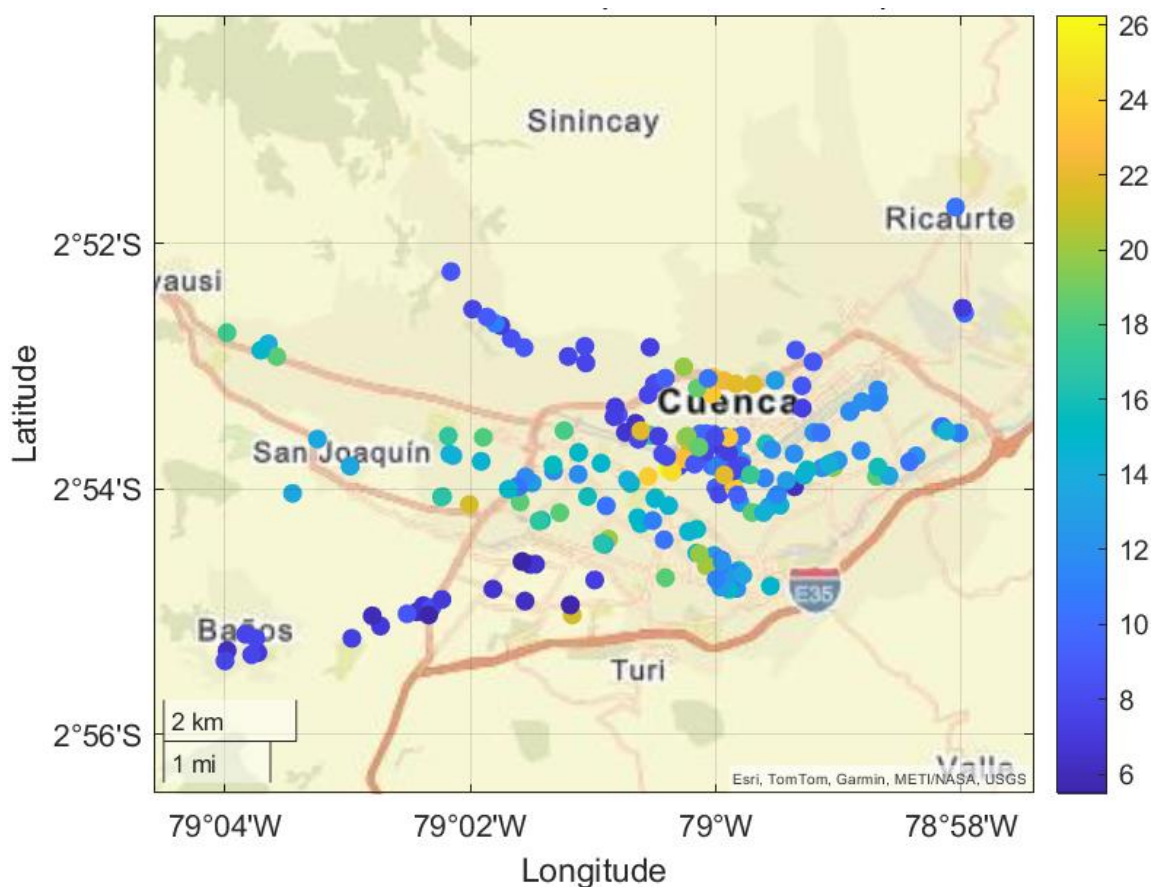
Mapa de Niveles de Ruido (248 Generadores).



En la Figura 16 correspondiente a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), se observa una variación de concentraciones que va desde un mínimo de aproximadamente 6 ppm hasta un máximo de 26 ppm, según la escala cromática utilizada. La distribución espacial refleja una mayor concentración de puntos en el rango de 12 a 18 ppm, evidenciada por tonos verde y celeste, lo que representa un comportamiento medio dentro de los datos recolectados. A partir del análisis estadístico, se identificó una media de 13,42 ppm, lo que indica una tendencia general moderada en las emisiones. Por otro lado, la moda fue de 12,38 ppm, lo que señala que este valor fue el más frecuente entre las mediciones realizadas en campo. Las zonas centrales de Cuenca presentan algunas concentraciones elevadas (mayores a 22 ppm), en contraste con las áreas periféricas como Baños y Sayausí, donde los niveles de CO₂ son visiblemente más bajos. Esta variabilidad puede atribuirse a factores como la carga de operación, el mantenimiento de los generadores y el tipo de combustible utilizado.

Figura 16

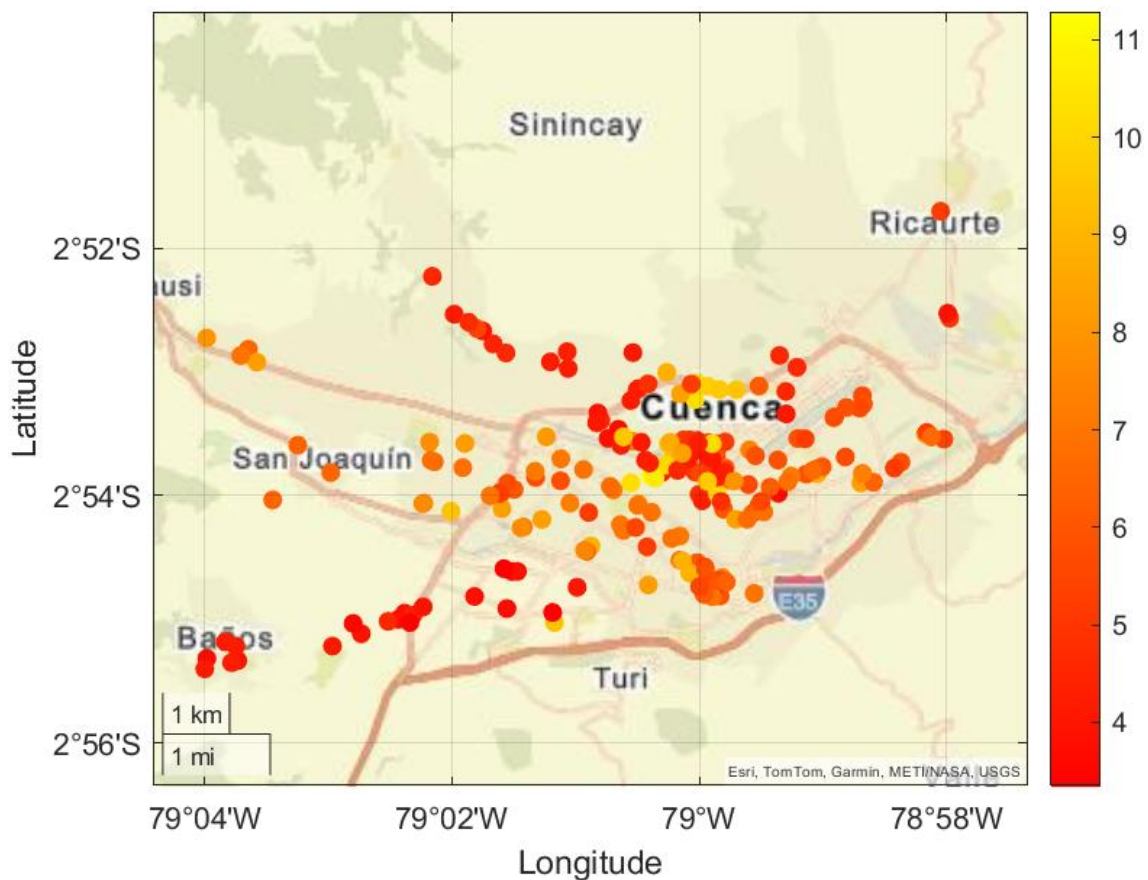
Emisiones de CO₂ (248 Generadores).



La figura 17 representa las emisiones de monóxido de carbono (CO) evidencia una distribución significativa de este contaminante en los 248 generadores evaluados. Según la escala cromática, los valores oscilan entre aproximadamente 3,8 ppm y 11 ppm, lo que refleja una dispersión amplia, pero con predominancia de emisiones en niveles medios a altos. La media estimada se ubica alrededor de 7,2 ppm, mientras que la moda se aproxima a los 6 ppm, valor que se repite con mayor frecuencia en los puntos del mapa. La paleta de colores utilizada permite identificar zonas críticas con emisiones elevadas en tonalidades rojas y naranjas intensas, principalmente en el centro urbano de Cuenca y algunas zonas industriales. En contraste, áreas con tonalidades amarillas reflejan generadores con menores emisiones, distribuidos de forma menos densa. Este comportamiento puede estar relacionado con el tipo de motor, la eficiencia del proceso de combustión o la antigüedad de los equipos utilizados.

Figura 17

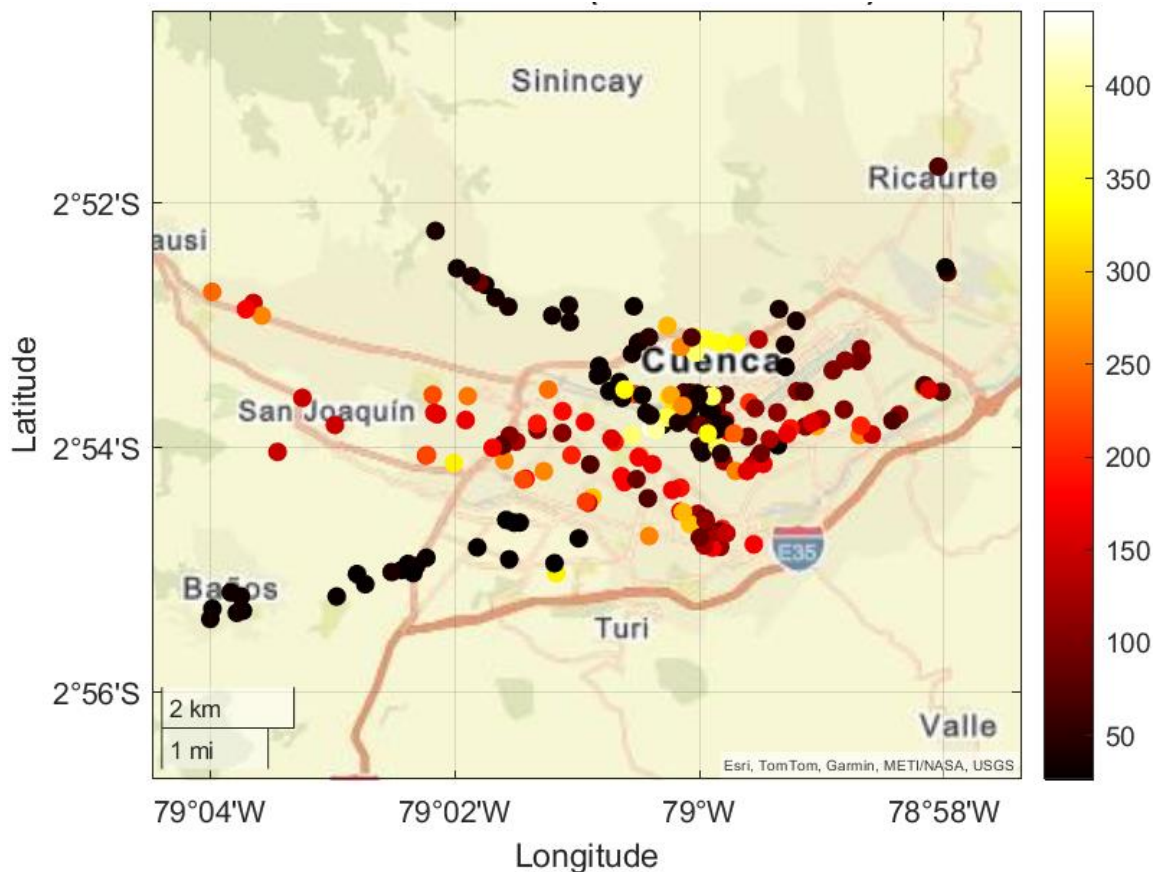
Emisiones de CO (248 Generadores).



La figura 18 corresponde a las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) evidencia una dispersión significativa de este contaminante en los 248 generadores analizados. Los valores registrados fluctúan entre un mínimo aproximado de 45 ppm y un máximo superior a 430 ppm, con una clara presencia de focos críticos. La media estimada se sitúa alrededor de los 265 ppm, mientras que la moda se encuentra cercana a los 250 ppm, lo que indica que estos valores fueron los más frecuentes dentro de la muestra. En el mapa, las tonalidades negras y rojas intensas representan las concentraciones más elevadas, concentrándose en áreas del centro urbano. Por otro lado, los puntos en tonos amarillos y naranjas claros reflejan niveles moderados, distribuidos en zonas periféricas. Esta distribución sugiere que las emisiones de NOx están influenciadas por el estado del motor, la antigüedad del equipo, el tipo de combustible y el nivel de carga durante su operación.

Figura 18

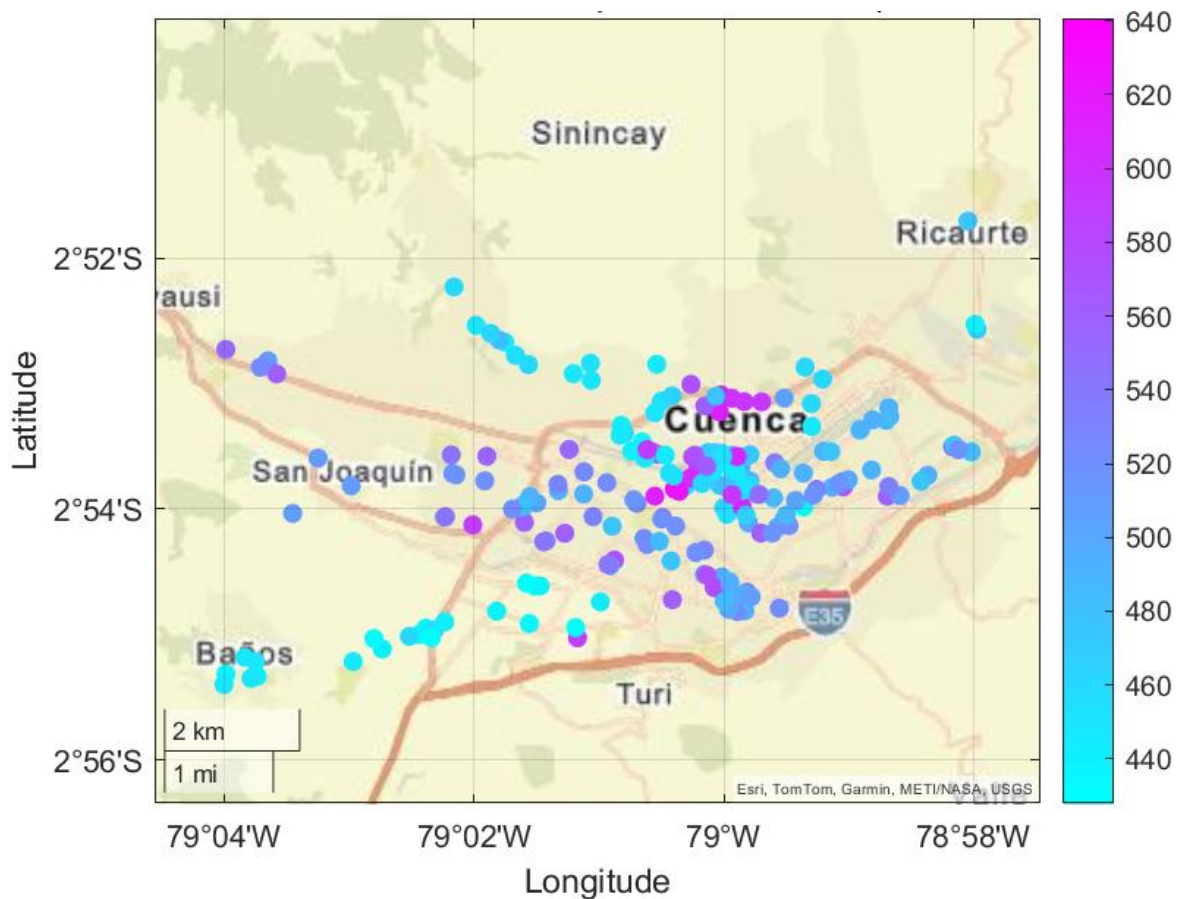
Emisiones de NOx (248 Generadores).



La figura 19, nos muestra a los hidrocarburos no quemados (HC) muestra una dispersión significativa de valores, con un mínimo de 430 ppm y un máximo de 640 ppm. La media se encuentra alrededor de 520 ppm, mientras que la moda es de aproximadamente 500 ppm, reflejando que estos valores fueron los más frecuentes entre los generadores evaluados. El mapa evidencia una concentración de emisiones elevadas en el centro urbano de Cuenca, representadas con tonalidades intensas como el magenta, mientras que en las zonas periféricas como Sayausí, Baños y Turi predominan tonos celestes y azules, asociados a menores emisiones. Este patrón sugiere que factores como la antigüedad de los equipos, el tiempo de operación y la falta de mantenimiento inciden directamente en la liberación de compuestos orgánicos volátiles, afectando la calidad del aire en las zonas más pobladas.

Figura 19

Emisiones de HC (248 Generadores).

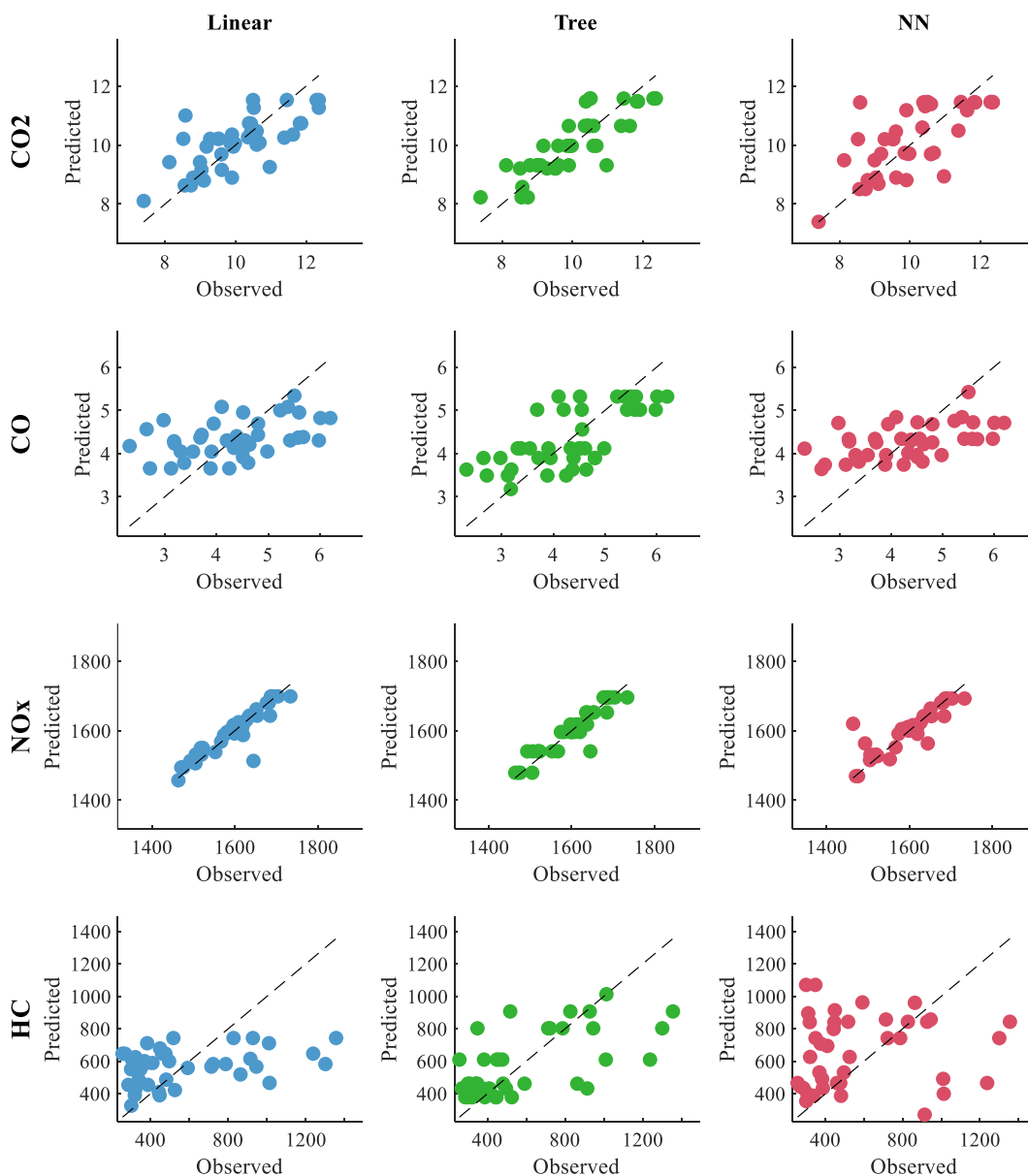


6.3. Evaluación del ajuste predictivo de los modelos

La Figura 20 presenta una comparación visual entre las predicciones y los valores observados para cada uno de los cuatro contaminantes evaluados (CO₂, CO, NO_x y HC), utilizando tres tipos de modelos: regresión lineal, árbol de decisión (Tree) y red neuronal (NN). En cada gráfico, el eje horizontal representa los valores observados y el eje vertical los valores predichos. Cuanto más cercanos se encuentren los puntos a la línea diagonal, mejor será el ajuste del modelo.

Figura 20

Análisis de los modelos predictivos



6.3.1. Dióxido de carbono (CO₂)

Para el dióxido de carbono (CO₂), los tres modelos mostraron una correlación creciente entre los valores observados y los predichos. Sin embargo, fue la red neuronal la que obtuvo un mejor ajuste visual, con una mayor alineación de los puntos sobre la línea de identidad. Esto indica que el modelo logró capturar de manera más precisa la relación entre las variables de entrada y la concentración de CO₂. Por otro lado, el modelo de regresión lineal presentó cierta dispersión y una leve subestimación en los valores altos, mientras que el árbol de decisión mostró una mayor variabilidad en sus predicciones.

6.3.2. Monóxido de carbono (CO)

En el caso del CO, la red neuronal nuevamente destacó al presentar una distribución de puntos más cercana a la línea de referencia, lo cual sugiere un buen nivel de aprendizaje del patrón de comportamiento del contaminante. La regresión lineal mostró mayor dispersión y errores en los valores intermedios, mientras que el árbol presentó una menor precisión, con una mayor dispersión y errores en los extremos.

6.3.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Respecto a los NO_x, todos los modelos obtuvieron un ajuste aceptable, aunque la red neuronal volvió a mostrar el menor error general. Los puntos en los gráficos de regresión y árbol se alinearon de forma moderada a la diagonal, mientras que la red neuronal mostró una mejor capacidad para capturar las concentraciones más altas, reflejando un entrenamiento más preciso.

6.3.4. Hidrocarburos no quemados (HC)

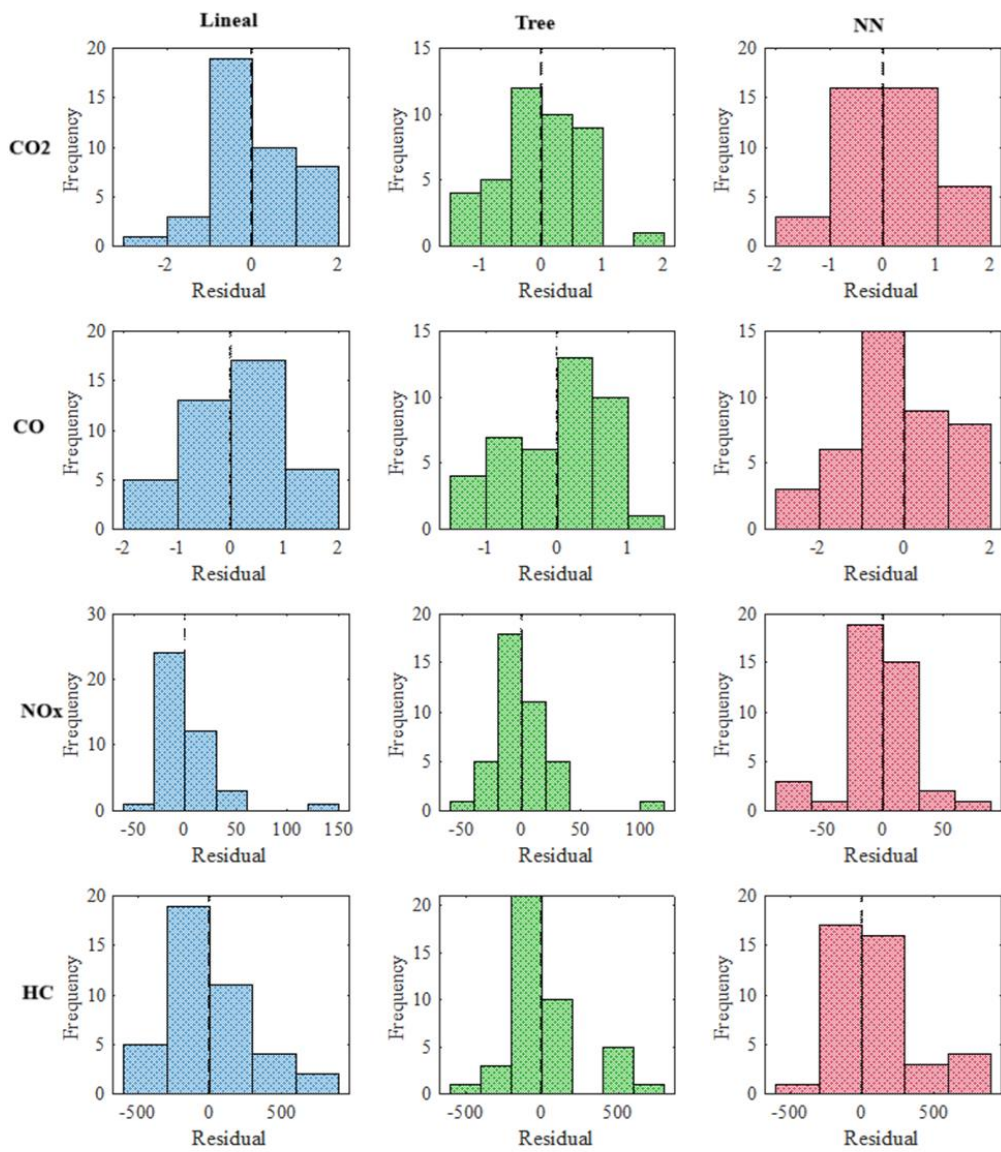
En cuanto a los HC, los resultados muestran mayor dispersión que en los otros contaminantes, lo cual indica una mayor complejidad en la predicción de este gas. La red neuronal obtuvo un desempeño superior, logrando capturar la tendencia general de los datos con menor error, mientras que los otros modelos presentaron una mayor variabilidad. Este resultado refuerza la necesidad de aplicar modelos no lineales para predecir adecuadamente este tipo de contaminante.

6.4. Evaluación del comportamiento de los residuos en los modelos predictivos

La Figura 21 presenta el análisis de los residuos obtenidos por cada modelo predictivo para los cuatro gases analizados: CO₂, CO, NO_x y HC. Cada gráfico muestra la distribución de los errores (residuos) entre los valores observados y predichos por los modelos lineal, árbol de decisión y red neuronal. Una distribución centrada en cero y con menor dispersión indica un mejor ajuste del modelo.

Figura 21

Histograma de residuos.



6.4.1. Dióxido de carbono (CO₂)

En el caso del CO₂, el histograma de residuos muestra una concentración en torno al cero para los tres modelos. La red neuronal presentó la distribución más compacta, lo que refleja mayor precisión. El árbol de decisión también mostró un comportamiento aceptable, aunque con mayor dispersión, mientras que la regresión lineal presentó errores más amplios, lo que evidencia un ajuste menos preciso.

6.4.2. Monóxido de carbono (CO)

Para el CO, los residuos se agruparon de forma más concentrada en el modelo de red neuronal, sugiriendo una mayor consistencia en sus predicciones. El árbol de decisión mostró un patrón más disperso, y la regresión lineal presentó una distribución más amplia, lo cual podría indicar errores sistemáticos y menor capacidad de generalización.

6.4.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Para el NO_x, la red neuronal logró mantener una distribución de residuos centrada y menos dispersa en comparación con los otros modelos. La regresión lineal y el árbol de decisión presentaron residuos más extendidos, sugiriendo una subestimación de las emisiones más elevadas y errores mayores en valores extremos.

6.4.4. Hidrocarburos no quemados (HC)

Para los HC, los histogramas muestran una gran dispersión en los tres modelos, lo que confirma la complejidad en la predicción de este contaminante. La red neuronal obtuvo el mejor desempeño, con una distribución más centrada y menos sesgada, mientras que la regresión lineal y el árbol de decisión presentaron errores más amplios y frecuentes.

La tabla 10 muestra los coeficientes de determinación (R^2) y los errores cuadráticos medios (RMSE) para tres modelos predictivos (Lineal, Árbol de Decisión y Red Neuronal) aplicados a cuatro gases contaminantes: CO_2 , CO, NO_x y HC. El valor de R^2 indica qué proporción de la variabilidad en los datos es explicada por el modelo (mientras más alto, mejor), mientras que el RMSE mide la magnitud promedio del error de predicción (mientras más bajo, mejor). Se determinó que el árbol de decisión fue el método más adecuado para estimar las emisiones contaminantes de los generadores eléctricos en el cantón Cuenca. Este modelo obtuvo los mejores resultados en términos de precisión y ajuste, reflejados en valores más altos de R^2 y menores errores de predicción (RMSE) en la mayoría de los gases analizados, particularmente en CO_2 , CO y HC. Aunque la regresión lineal presentó un buen rendimiento en la predicción de NO_x , el árbol de decisión mantuvo un equilibrio entre exactitud y consistencia en todas las variables. En cambio, la red neuronal no alcanzó un nivel de desempeño competitivo, lo que sugiere que, para este tipo de datos y escala de muestra, los modelos de tipo árbol ofrecen una mayor capacidad para capturar relaciones no lineales sin requerir estructuras computacionales complejas. Por tanto, se concluye que el uso de árboles de decisión representa una herramienta confiable y eficiente para la modelación de emisiones en aplicaciones de ingeniería automotriz relacionadas con grupos electrógenos.

Tabla 10

Desempeño comparativo de modelos predictivos (R^2 y RMSE)

Gas	Modelo	R^2	RMSE
CO_2	Regresión	0.5096	0.8522
CO_2	Árbol	0.7289	0.6336
CO_2	Red Neuronal	0.3493	0.9817
CO	Regresión	0.1908	0.8794
CO	Árbol	0.4838	0.7023
CO	Red Neuronal	0.2387	0.8530
NO_x	Regresión	0.8473	26.038
NO_x	Árbol	0.8697	24.056
NO_x	Red Neuronal	0.8142	28.726
HC	Regresión	0.1216	284.390
HC	Árbol	0.4019	234.660
HC	Red Neuronal	0.0685	292.860

Como parte de la validación operacional del modelo, se aplicó el modelo árbol de decisión a la población completa de 710 generadores, ya que destaca como el más preciso, robusto y explicativo para estimar las emisiones contaminantes a partir del nivel de ruido, gracias a su capacidad para capturar relaciones no lineales y patrones complejos. Por ello, fue seleccionado para predecir las emisiones de la totalidad de generadores en la ciudad de Cuenca.

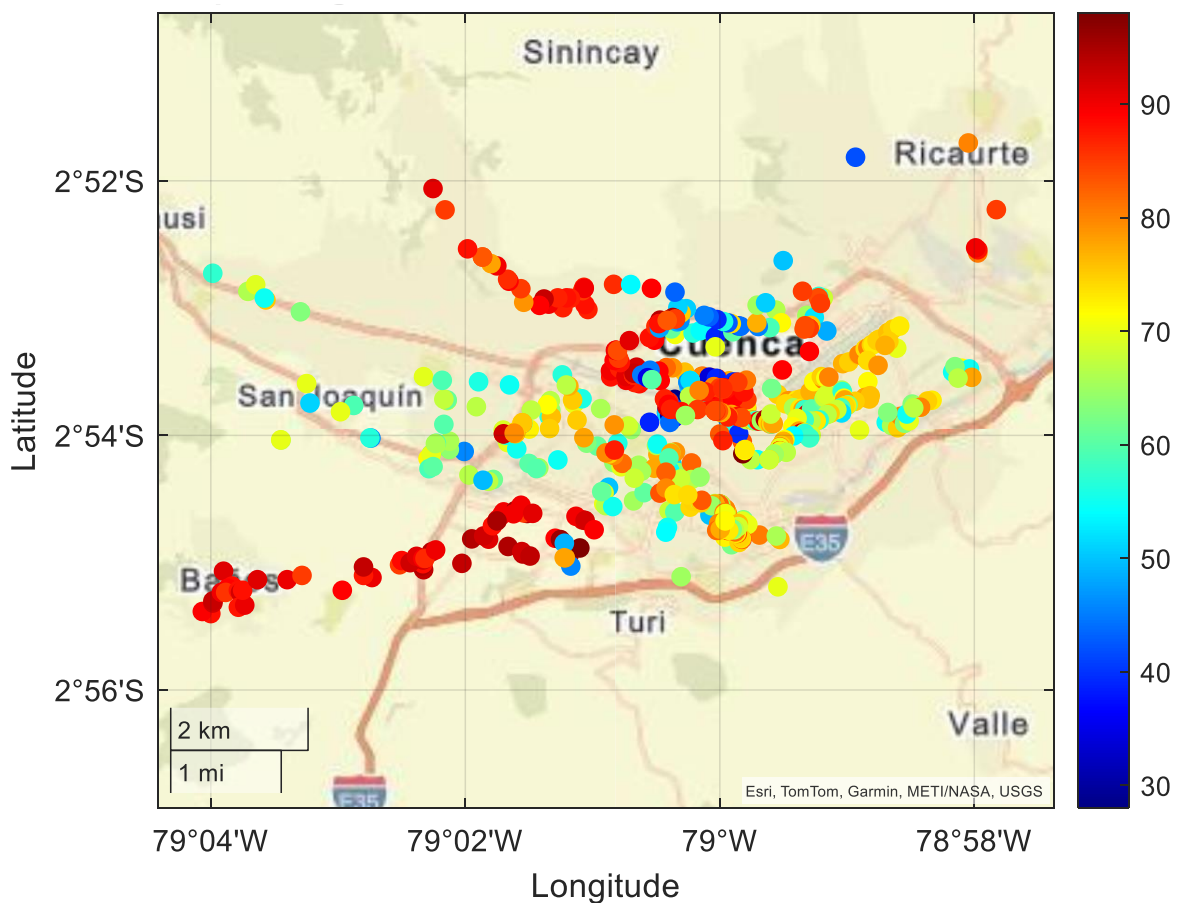
6.5. Validación y modelado final

La etapa final del estudio consistió en la validación del modelo predictivo y su aplicación a la totalidad de los 710 generadores registrados durante la crisis energética de 2024 en el cantón Cuenca. Una vez identificado el árbol de decisión como el modelo más eficaz para predecir los niveles de emisión de contaminantes, se procedió a su implementación sobre el conjunto completo de datos. Este proceso permitió estimar las emisiones totales generadas en función de los patrones aprendidos a partir de los 248 generadores previamente analizados en campo.

La Figura 22 muestra la distribución espacial de los niveles de ruido registrados en 710 generadores eléctricos durante la crisis energética de 2024 en Cuenca. Los valores varían entre un mínimo de aproximadamente 32 dB, observado en zonas periféricas y rurales, y un máximo de 98 dB, concentrado principalmente en sectores urbanos densamente poblados, como el centro y suroeste de la ciudad, donde la actividad generadora fue más intensa. La media estimada se sitúa en torno a los 68 dB, mientras que la moda, es decir, el nivel más frecuentemente registrado, se ubica cerca de los 72 dB. Esta distribución evidencia una alta variabilidad en los niveles de presión sonora, con una tendencia a niveles elevados en áreas residenciales y comerciales, lo que representa una preocupación ambiental y de salud pública debido a la exposición prolongada a ruidos superiores a los 85 dB.

Figura 22

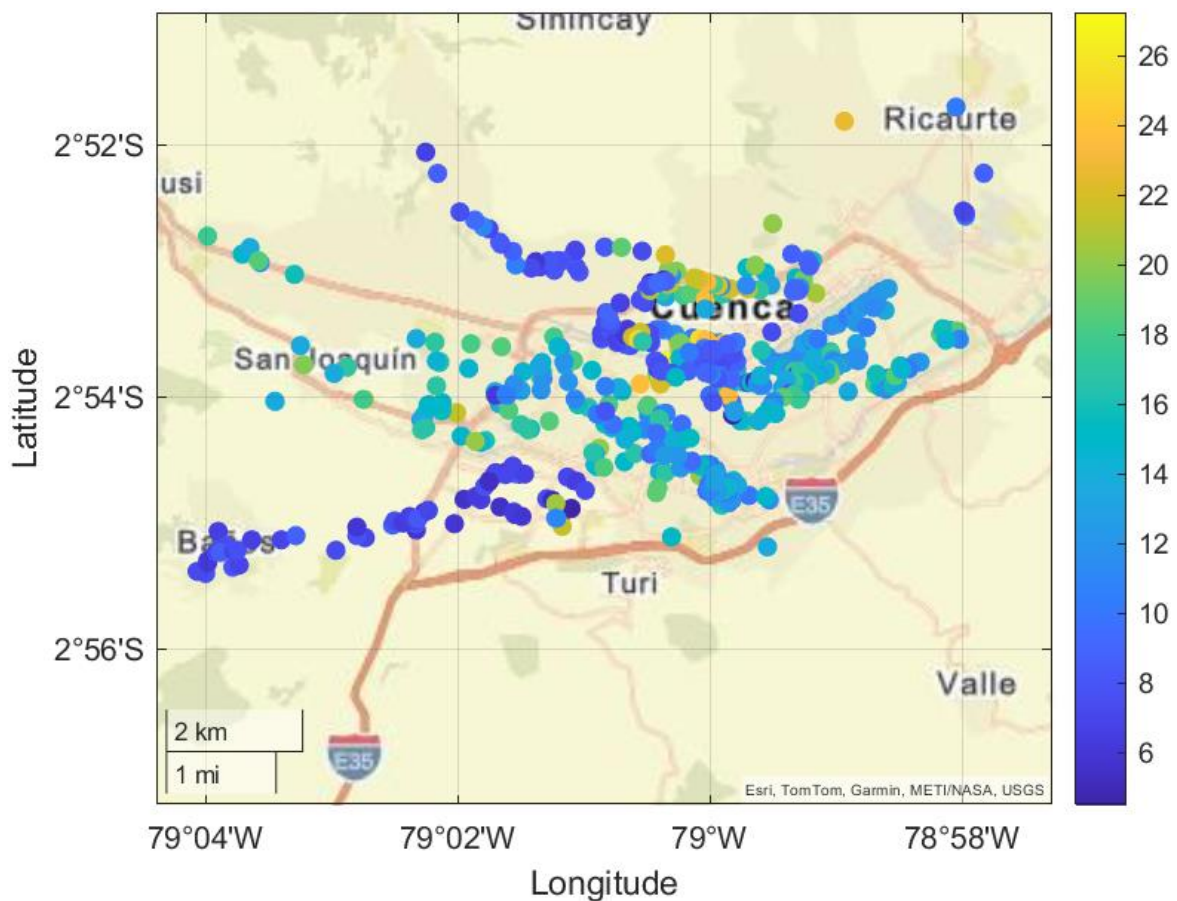
Resultado final análisis de ruido.



La Figura 23 presenta la distribución geográfica de las concentraciones finales del CO₂ en los 710 generadores evaluados en Cuenca. Los valores oscilan entre un mínimo aproximado de 6 ppm y un máximo cercano a los 26 ppm, similares a los rangos registrados previamente en la muestra de 248 generadores. La media se estima en torno a los 14 ppm, mientras que la moda valor más frecuente se encuentra próxima a los 12 ppm, lo cual sugiere una concentración moderada predominante. Las zonas con mayores emisiones se concentran en el centro de la ciudad y sectores del este, donde la densidad de generadores y la intensidad de uso fueron más elevadas. Este patrón refuerza la relación entre el uso prolongado de generadores durante la crisis energética y el incremento de emisiones directas de CO₂ en áreas urbanas críticas.

Figura 23

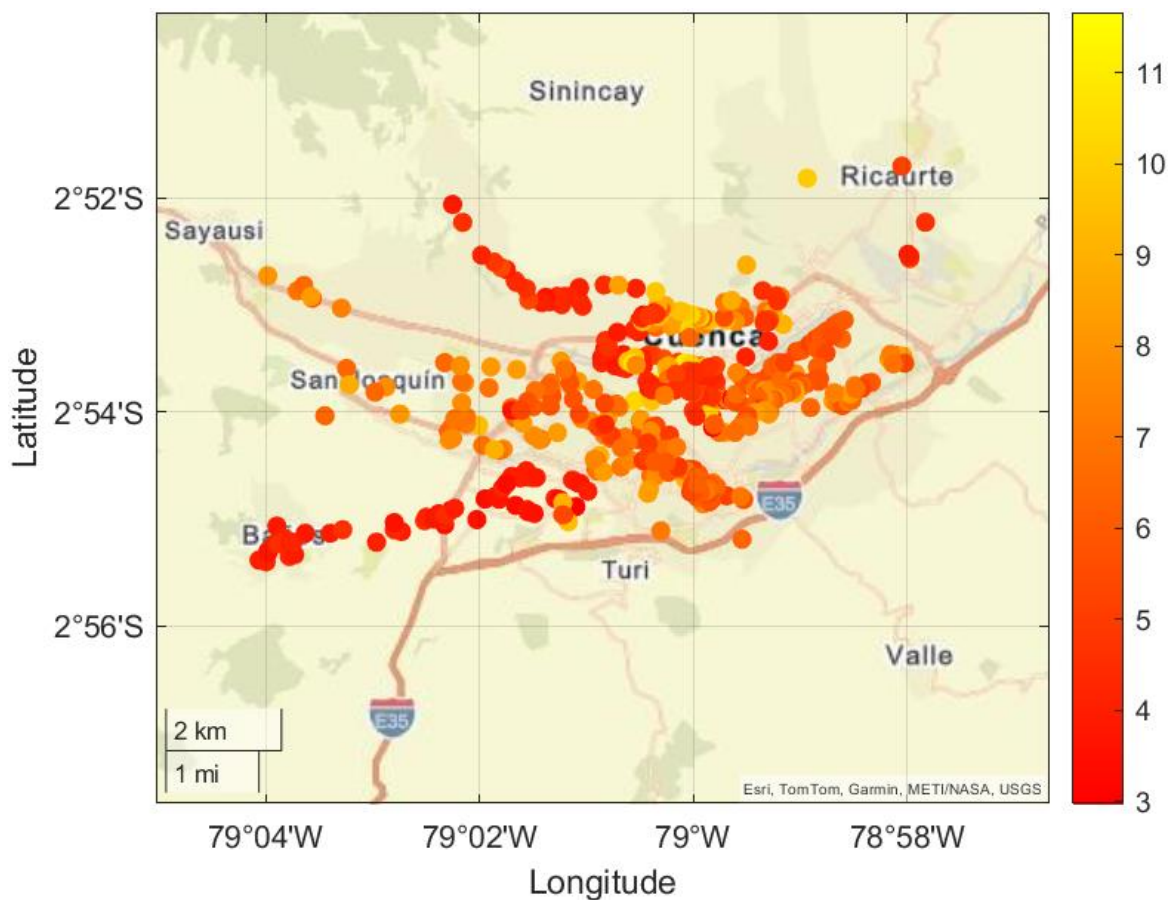
Mapa de concentración final de dióxido de carbono (CO₂).



La Figura 24 representa la distribución geográfica de las emisiones estimadas de CO provenientes de los 710 generadores activos durante la crisis energética. Los valores oscilan entre un mínimo aproximado de 3,2 ppm y un máximo de 11,3 ppm, lo que amplía ligeramente el rango observado en la muestra inicial de 248 generadores. La media estimada se sitúa cerca de los 7 ppm, y la moda en torno a los 6 ppm, evidenciando una concentración predominante en niveles medios. Se observa una alta densidad de puntos con tonos anaranjados y rojos en el centro de Cuenca, así como en sectores periféricos como Ricaurte y Baños, lo cual indica una distribución relativamente homogénea de emisiones, pero con zonas críticas donde los valores exceden ampliamente los límites normativos. Esta situación refleja un uso intensivo de generadores en áreas urbanas densamente pobladas, acentuando el impacto sobre la calidad del aire local.

Figura 24

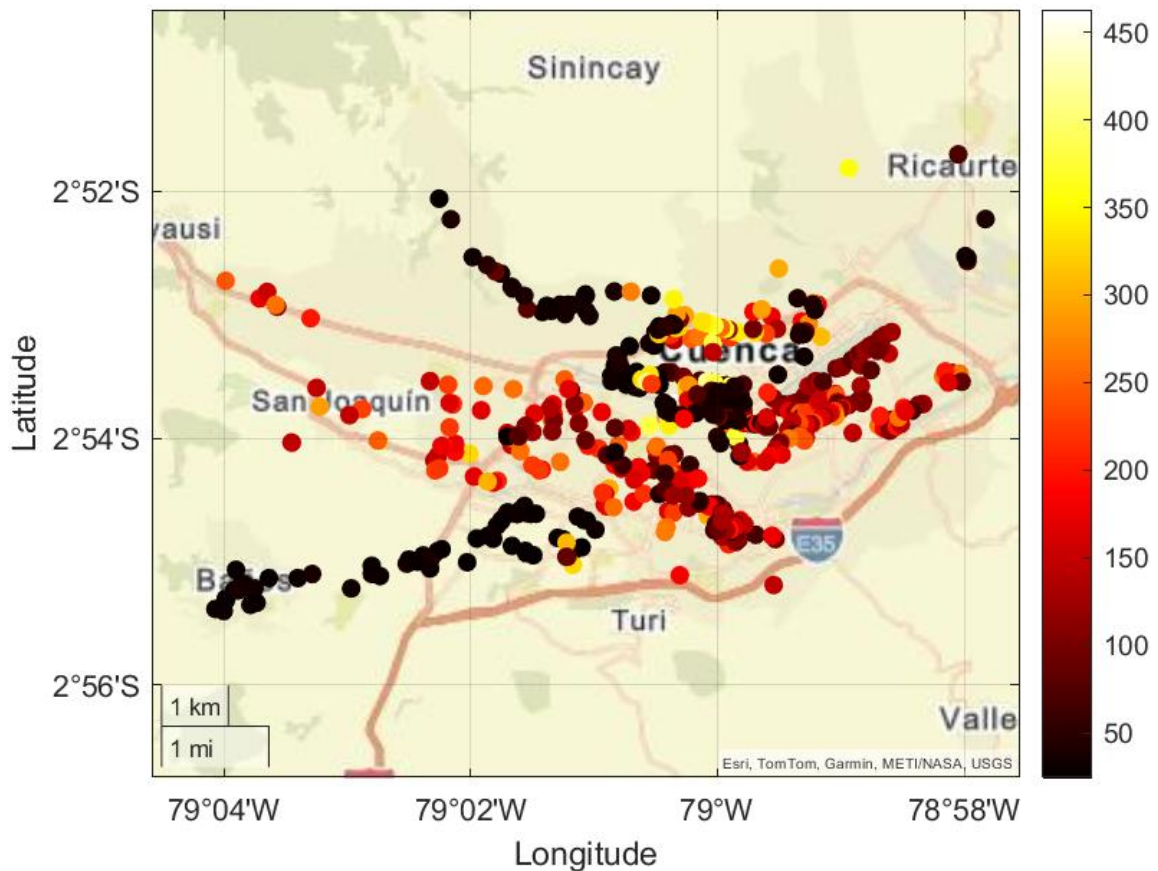
Resultado final de emisiones de monóxido de carbono (CO).



La Figura 25 muestra la distribución espacial de los NO_x emitidos por los generadores eléctricos, con valores que oscilan entre aproximadamente 45 ppm y un máximo cercano a 455ppm, superando el rango registrado en la muestra preliminar de 248 generadores. La media estimada se ubica alrededor de los 220 ppm, mientras que la moda se concentra en el intervalo de 190 ppm a 210 ppm, representada visualmente por los puntos rojos y anaranjados más recurrentes. Se evidencian zonas críticas con mayores concentraciones en el centro y norte de Cuenca, así como en sectores como Ricaurte y el occidente de Baños, donde predominan los tonos oscuros y rojizos que indican emisiones elevadas. Esta distribución sugiere que una parte importante de los generadores opera bajo altas cargas o condiciones deficientes de combustión, lo que incrementa la liberación de NO_x, un contaminante altamente nocivo para la salud respiratoria y la calidad del aire urbano.

Figura 25

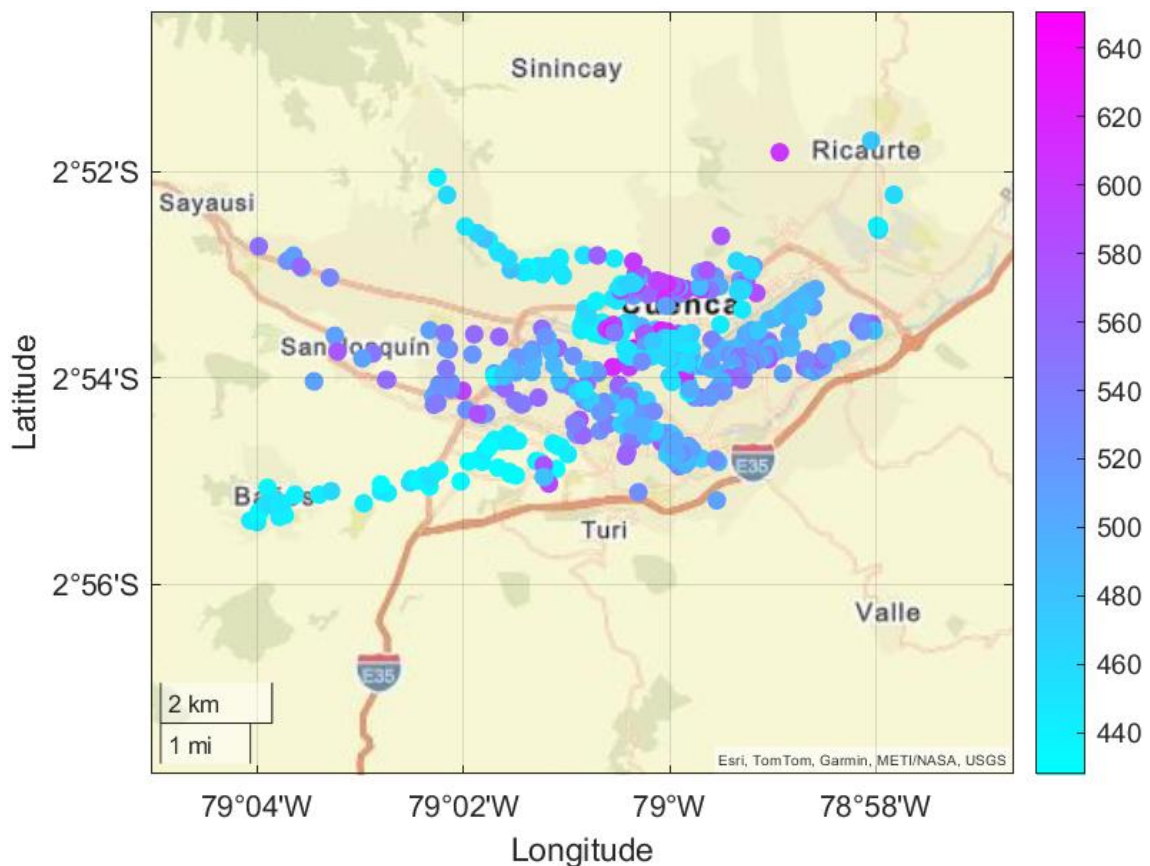
Concentración espacial de óxidos de nitrógeno (NO_x).



La Figura 26 presenta la distribución geográfica de las HC generadas por los equipos de generación eléctrica. Los valores oscilan entre aproximadamente 430 ppm y 640 ppm, superando los niveles máximos observados en la muestra inicial de 248 generadores. La media estimada se encuentra alrededor de los 530 ppm, mientras que la moda se ubica en el rango de 510 ppm a 540 ppm, reflejando una acumulación de puntos en tonalidades azul-violáceas. Se observa una dispersión homogénea a lo largo del área urbana, con focos puntuales de mayor emisión hacia el noreste de Cuenca, como en Ricaurte, lo que podría asociarse al uso de generadores antiguos o con mantenimiento deficiente. Este patrón revela una importante carga de contaminantes orgánicos en suspensión, lo cual representa un riesgo adicional para la salud, al estar asociados con reacciones fotoquímicas que contribuyen a la formación de ozono troposférico.

Figura 26

Mapa de emisiones de hidrocarburos no quemados (HC).



6.6. Estimación de emisiones mediante norma EURO 6

La estimación de las emisiones generadas por el conjunto de 710 generadores eléctricos operativos en la ciudad de Cuenca durante la crisis energética de 2024, utilizando como referencia los límites establecidos en la normativa EURO 6. Esta normativa, ampliamente reconocida en el ámbito de la ingeniería automotriz y ambiental, proporciona estándares rigurosos para el control de emisiones contaminantes, sirviendo como parámetro de comparación para determinar el grado de cumplimiento ambiental.

De los 710 generadores identificados, únicamente 248 pudieron ser evaluados con mediciones completas en campo. Sin embargo, no todos contaban con información técnica visible o accesible, como el tipo de combustible, la velocidad de giro, potencia, marca, modelo o año de fabricación. Muchos de estos equipos estaban ubicados en zonas interiores o de difícil acceso, lo que imposibilitó la caracterización técnica completa de cada unidad.

Dado este escenario, se optó por un enfoque metodológico que permitiera extrapolar los resultados observados en los 248 generadores muestreados a la totalidad de los 710. Para ello, se empleó un modelo predictivo validado árbol de decisión, el cual fue alimentado con información georreferenciada y niveles de ruido medidos directamente en campo. Esta variable (nivel de presión sonora) se utilizó como insumo clave, dada su correlación con la carga de trabajo del generador y, por ende, con su nivel de emisiones. De esta forma, se estimaron las emisiones individuales del total de generadores, logrando un modelo representativo y con validez técnica.

Por tanto, se decidió utilizar un enfoque basado en modelado predictivo, considerando el ruido como una variable proxy del esfuerzo operativo del generador. Para los 710 generadores se logró medir directamente el nivel de presión sonora (ruido), el cual guarda una relación directa con la carga de trabajo del motor. Esta relación ha sido previamente reportada en estudios técnicos y normativas, que vinculan niveles sonoros con la tasa de combustión y, por tanto, con las emisiones producidas. A partir de estas mediciones, se procedió a estimar las emisiones de gases contaminantes mediante la extrapolación con un modelo validado (árbol de decisión), basado en los datos de los 248 generadores que sí contaban con información completa.

Las emisiones medidas en base seca con el analizador de gases deben corregirse a base húmeda utilizando las ecuaciones (2) y (3), acorde a lo mostrado en la normativa EURO 6 (Consejo de la Unión Europea, 2016). Esta corrección permite obtener valores más representativos de las emisiones reales. Además, asegura que los datos sean comparables con los límites establecidos por la normativa.

$$C_{wet,j} = k_{w,j} C_{dry,j} \quad (2)$$

$$k_w = \frac{1.008}{1+0.005\alpha(C_{CO_2}+C_{CO})} \quad (3)$$

Donde

$C_{wet,j}$: es la concentración en base húmeda del contaminante j

$C_{dry,j}$: es su concentración en base seca

K_w : es el factor de corrección calculado con la ecuación 2 usando $\alpha=2,66$ y las concentraciones en base seca de CO_2 y CO .

Las emisiones másicas instantáneas de cada contaminante $\dot{m}_{j,i}$ [g/s] se obtienen mediante la ecuación (4), la cual permite transformar las concentraciones de gases contaminantes expresadas en ppm en una magnitud de masa por unidad de tiempo. Esta expresión combina los valores medidos con el flujo de escape del generador, facilitando una cuantificación directa de la emisión en condiciones reales de operación.

$$\dot{m}_{j,i} = c_{j,i} \mu_{j,i} \dot{m}_{ex,i} 10^{-3} \quad (4)$$

Donde

c_j : es la concentración instantánea de cada gas en [ppm].

μ_j : es la relación entre la densidad de cada componente y la densidad global del escape.

$\dot{m}_{ex,i}$: es el flujo másico total del escape en el instante i , expresado en [g/s].

Estos coeficientes permiten convertir concentraciones en términos relativos (ppm) en tasas de emisión reales, lo cual es indispensable para evaluar el impacto ambiental de

cada gas. La tabla 11 presenta los valores utilizados para μ_j establecidos conforme a literatura técnica especializada y normativas vigentes.

Tabla 11

Coefficientes μ

<i>j</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>NO_x</i>
μ	0.001518	0.000966	0.000499	0.001587

La ecuación (5) permite estimar la emisión total m_j de cada contaminante durante el periodo de apagones, a partir de la sumatoria del flujo másico instantáneo en cada momento de muestreo. Esta metodología proporciona una visión acumulada del comportamiento de las emisiones, considerando tanto la intensidad como la duración del uso de los generadores.

$$m_j = \sum_{i=1}^n m_{j,i} \Delta t \quad (5)$$

Donde:

\dot{m} : es el flujo másico instantáneo del contaminante *j*

n: es el número de muestras del conjunto de datos

Δt : es el tiempo de muestreo que es igual a 691 horas, divididos en 4 sectores en los que se configuraron los cortes en la ciudad de Cuenca.

Este apartado establece la base metodológica necesaria para la estimación de emisiones provenientes de generadores eléctricos, integrando tanto correcciones normativas como cálculos técnicos fundamentados. La aplicación de fórmulas reconocidas por la normativa EURO 6, junto con la información recolectada en campo y los modelos de predicción validados, permite disponer de un marco confiable para la caracterización de contaminantes emitidos. Este procedimiento garantiza coherencia técnica en el análisis y prepara el terreno para la presentación e interpretación de los resultados en los siguientes apartados.

6.7. Resultados y análisis

Durante los 89 días de apagones registrados en la ciudad de Cuenca, se estima que los 710 generadores eléctricos operativos emitieron un total aproximado de 428 toneladas de CO₂, 14.91 toneladas de CO, 0.72 toneladas de HC y 7.6 toneladas de NO_x. Estas cifras fueron obtenidas a partir de la aplicación del modelo predictivo validado, complementado con las mediciones de ruido y datos de carga operativa, lo que permitió una proyección técnica representativa para el conjunto total de generadores.

Los valores estimados reflejan el elevado impacto ambiental derivado del uso masivo e intensivo de generadores como fuente alternativa de energía durante las interrupciones del servicio eléctrico. La magnitud de las emisiones no solo evidencia el esfuerzo operativo al que fueron sometidos estos equipos, sino también pone de manifiesto su contribución directa al deterioro de la calidad del aire urbano, especialmente en áreas densamente pobladas o con baja ventilación natural. Estas emisiones deben entenderse en el contexto de una situación de emergencia energética, donde la necesidad de asegurar la continuidad de actividades residenciales, comerciales e institucionales llevó al uso prolongado de tecnologías que, en muchos casos, no cumplen con normativas ambientales modernas.

Como se resume en la Tabla 12, estas cantidades permiten establecer una línea base para la evaluación de impactos ambientales y sirven como insumo clave en el diseño de estrategias regulatorias, programas de control de emisiones y políticas públicas orientadas a una transición energética más limpia y sostenible.

Tabla 12

Resultados Obtenidos

CO₂	CO	HC	NO_x
Ton	Ton	Ton	Ton
428	14.91	0.72	7.6

Estas emisiones representan aproximadamente el 0.16 % de las emisiones anuales de CO₂, el 0.04 % de CO y el 0.67 % de NO_x generadas por el parque automotor de Cuenca en el año 2021, según el Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca (Zegarra et al., 2020).

Aunque en términos porcentuales estos valores puedan parecer modestos frente al total anual del parque vehicular, su relevancia se magnifica al considerar que fueron generadas en un periodo breve tan solo 89 días y bajo condiciones operativas de alta demanda energética. Además, estos generadores suelen operar en condiciones no reguladas, sin sistemas de control de emisiones, y en ambientes urbanos densamente poblados, lo que intensifica su efecto perjudicial sobre la calidad del aire local.

El uso extensivo de generadores eléctricos durante la crisis energética también trajo consigo un marcado incremento en los niveles de ruido ambiental. Como evidencia la Figura 22, que recoge 710 mediciones de campo, se identifican zonas críticas mediante una codificación cromática: los puntos verdes corresponden a niveles que cumplen con la normativa local de ruido según el uso del suelo y el horario, mientras que los puntos rojos representan excedencias. Esta visualización espacial permite observar que las zonas con mayor densidad de puntos rojos se localizan en el centro y suroeste de la ciudad, donde se concentran áreas residenciales, educativas y comerciales, evidenciando una exposición más intensa de la población al ruido.

Esta situación es particularmente preocupante durante el horario nocturno, cuando los límites permitidos son más restrictivos y el ruido puede generar impactos severos en la salud pública, como trastornos del sueño, fatiga, estrés, dificultades cognitivas y deterioro del bienestar emocional. Además, el exceso de ruido afecta negativamente la convivencia comunitaria y la percepción de seguridad en el entorno. Por otro lado, se observa que en las zonas periféricas de la ciudad existe una mayor proporción de puntos verdes, lo que sugiere un menor uso o una dispersión más efectiva del ruido, posiblemente asociado al tipo de generadores, a su carga de operación o a la menor densidad poblacional.

Por lo tanto, estos resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de regulación, modernización tecnológica y transición hacia fuentes de energía más limpias, especialmente en situaciones de emergencia energética, a fin de proteger la salud pública y el ambiente urbano.

7. CONCLUSIONES

Entre los modelos evaluados (regresión lineal, árbol de decisión y red neuronal), el árbol de decisión demostró ser el más equilibrado, preciso y robusto para predecir emisiones contaminantes a partir del ruido, por lo que fue seleccionado para la estimación en el total de generadores. La combinación de mediciones directas en campo a 248 generadores, y la extrapolación mediante un modelo de decisión hacia el total estimado de 710 equipos, permitió generar una caracterización completa, técnicamente sólida y representativa del comportamiento de estas fuentes de emisión. Se evidenció una variabilidad significativa entre zonas urbanas y periféricas, influenciada por el tipo de generador, su carga operativa y la densidad poblacional.

Durante los 89 días de apagones, el uso extendido de generadores eléctricos en Cuenca resultó en la emisión de más de 428 toneladas de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos (CO, HC y NO_x), evidenciando un impacto ambiental considerable en un periodo corto.

Los resultados reflejan concentraciones elevadas de CO, NO_x, HC y CO₂, muchas de las cuales superan los límites establecidos por la normativa EURO 6, usada como referencia internacional. Asimismo, se identificaron zonas con niveles críticos de presión sonora, afectando principalmente a sectores residenciales y comerciales. Esta situación pone de manifiesto el impacto negativo que tuvo la ausencia de regulación y de control técnico sobre el uso de generadores, cuyo empleo fue generalizado y, en muchos casos, desproporcionado respecto a la necesidad real.

En este sentido, la investigación no solo proporciona evidencia científica sobre los efectos ambientales del uso intensivo de generadores, sino que también contribuye con una propuesta metodológica replicable en otros contextos urbanos. Se espera que los resultados de este proyecto sirvan como base para el desarrollo de políticas públicas orientadas a la mitigación de emisiones, la planificación de respuestas ante crisis energéticas, y la transición hacia tecnologías más limpias y sostenibles. La experiencia vivida en Cuenca durante el periodo de los últimos meses del 2024 debe convertirse en un punto de partida para repensar el manejo energético con criterios de sostenibilidad, salud pública y justicia ambiental.

8. RECOMENDACIONES

Ante la problemática evidenciada durante la crisis energética de 2024 en Cuenca, es indispensable que futuras investigaciones sobre emisiones y ruido de generadores eléctricos contemplen la amplia variedad de modelos, tecnologías, potencias y características técnicas de estos equipos. Muchos generadores, especialmente aquellos ubicados en interiores, no pudieron ser evaluados completamente debido a la falta de información visible o accesible. Por ello, se recomienda establecer una metodología que permita identificar y clasificar cada unidad según su tipo de combustible, antigüedad, capacidad nominal, sistema de inyección y demás parámetros relevantes, con el fin de mejorar la precisión de las estimaciones y enriquecer el análisis técnico-ambiental.

Desde un enfoque institucional y normativo, resulta urgente que el Estado ecuatoriano elabore una política pública específica que regule el uso de generadores eléctricos en contextos urbanos. Actualmente, no existe una legislación que establezca límites máximos de emisiones contaminantes ni de ruido para estos equipos, lo cual permitió su uso indiscriminado sin ningún tipo de control durante la emergencia. Es imperativo desarrollar normativa ambiental que contemple valores límite, protocolos de monitoreo periódico, incentivos para el uso de tecnologías limpias, y sanciones en caso de incumplimiento, con el objetivo de proteger la salud pública y la calidad ambiental en las ciudades.

Adicionalmente, se hace un llamado a los organismos estatales para que, en situaciones de crisis, actúen con responsabilidad y visión preventiva. La falta de planificación energética y de respuesta gubernamental adecuada provocó que la población recurriera de forma masiva a generadores sin considerar su impacto ambiental. Para evitar repetir este escenario, se recomienda incorporar planes de contingencia que promuevan el uso de fuentes renovables, la instalación de sistemas de respaldo eficientes y el establecimiento de zonas reguladas para la operación de generadores. Una gestión pública con enfoque ambiental y social es clave para enfrentar emergencias futuras sin comprometer la salud y el entorno.

9. REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de EEUU [EPA]. (24 de junio de 2025). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. epa.gov: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#:~:text=industrias%20y%20autom%C3%B3viles.-,%C3%BA%20Cu%C3%A1les%20son%20los%20efectos%20da%C3%B1inos%20del%20PM?,parques%20nacionales%20y%20%C3%A1reas%20silvestres>.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR / CDC]. (06 de mayo de 2016). *Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.)*. ATSDR / CDC: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html#:~:text=Respirar%20altos%20niveles%20de%20%C3%93xidos,los%20pulmones%20y%20la%20muerte.
- Ahmed, W., Abed, T., Salam, A., Reza, K., Mahdiy, M., y Chaichan, M. (2020). Environmental impact of using generators in the University Of Technology in Baghdad, Iraq. *Journal of Thermal Engineering*, 6(6), 272-281. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18186/thermal.822496>
- Al Rashdi, Z., Barghash, H., Al Habsi, F., y Okedu, K. (2024). Environmental impact assessment of different power generation strategies in Oman: A comparative life-cycle analysis. *Heliyon*, 10(18), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37781>
- Alcaldía de Cuenca. (26 de diciembre de 2024). *Reforma a Ordenanza sobre el Ruido promueve un entorno sin contaminación acústica en Cuenca Cuenca*. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca: <https://www.cuenca.gob.ec/content/reforma-ordenanza-sobre-el-ruido-promueve-un-entorno-sin-contaminacion-acustica-en-cuenca>
- Argudo Peláez, R., y Pérez Vasco, M. (2022). *Prevalencia de ansiedad asociada al ruido en el personal que labora en la planta de beneficio en la industria minera al sur del Ecuador*. Quito - Ecuador: Universidad de Las Américas. <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/14056/1/UDLA-EC-TMSSO-2022-47.pdf>
- Banguera Erazo, H. (2021). *Estimación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero provenientes de las actividades realizadas por una consultora ambiental, mediante el cálculo de la huella de carbono*. Guayaquil: Universidad Agraria del

- Ecuador.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BANGUERA%20ERAZO%20HUGO%20DANIEL.pdf>
- Barbosa, R., Issa, M., Silva, S., y Ilinca, A. (2022). Variable Speed Diesel Electric Generators: Technologies, Benefits, Limitations, Impact on Greenhouse Gases Emissions and Fuel Efficiency. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.21926/jept.2201003>
- Casares Molina, G., y Calle García, E. (24 de septiembre de 2024). *Eficiencia en los paneles solares, su impacto en el costo de producción de la energía*. Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL): <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/01/24-Edicion-Panorama.pdf>
- Centers for Disease Control and Prevention [CDC]. (09 de enero de 2023). *Prevención de intoxicación por monóxido de carbono (CO)*. cdc.gov: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/envenenamientoco/index.html>
- CIP.org.ec. (2007). *NORMA TÉCNICA PARA EMISIONES A LA ATMÓSFERA DE FUENTES FIJAS*. Cip.org.ec: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/doc/NORMA%20EMISIONES.pdf>
- CIP.org.ec. (2015). *Norma Técnica que establece los límites permisibles de ruido*. cip.org.ec: <https://www.cip.org.ec/attachments/article/401/Anexo%205%20Ruido.pdf>
- Consejo de la Unión Europea. (Marzo de 2016). REGULATIONS. *THE EUROPEAN COMMISSION*. [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ue%202016\[1\].pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ue%202016[1].pdf)
- Crónica.com.ec. (02 de octubre de 2024). *Afectaciones auditivas y respiratorias, el peligro de los generadores*. <https://cronica.com.ec/2024/10/02/afectaciones-auditivas-y-respiratorias-el-peligro-de-los-generadores/>
- Ecuador, M. d. (2024). *La matriz energética del Ecuador depende en un 72 % del agua; el Ministro de Energía y Minas detalló algunas de las medidas implementadas para evitar un impacto mayor en el sistema energético*.
- European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA]. (11 de abril de 2005). *The impact of noise at work*. agency.osha.eu.int: <https://osha.europa.eu/en/publications/factsheet-57-impact-noise-work>
- European Environment Agency [EEA]. (27 de marzo de 2020). *La contaminación acústica es un problema importante, tanto para la salud humana como para el medio ambiente*. EEA: <https://www.eea.europa.eu/es/articles/la-contaminacion->

- acustica-es-
un#:~:text=La%20exposición%20prolongada%20al%20ruido,deficiencias%20cognitivas%20en%20los%20niños.
- Fayyazbakhsh, A., Bell, M., Zhu, X., Mei, X., Koutný, M., Hajinajaf, N., y Zhang, Y. (2022). Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134-260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134260>
- GAD Cantón Cuenca y Universidad del Azuay. (2022). *Ruido en Cuenca 2019 - 2021*. <https://doi.org/10.33324/ceuzuay.222>
- Garg, M., Silver, J., Schofield, R., y Ryan, R. (2022). Hourly emission inventories for air toxic emissions for eastern Australian electricity generators derived from energy distribution data. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2973–2992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13762-021-03429-5>
- Garzón Soria, C. (2010). *Evaluación de alternativas de generación de electricidad desde el punto de vista de su impacto ambiental, para sectores no conectados a redes eléctricas*. Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/282316ee-344f-46da-94f9-8e04849f26f5/content>
- Gutiérrez, D. (Ed.). (2024). *Informe: Factor de emisión de CO2*. Ministerio del Ambiente de Ecuador: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- Husain, M. (2024). An experimental study on electricity generator emissions and their environmental impact in Kirkuk City. *Advances in Mechanical and Materials Engineering (AMME)*, 41(1), 113-123. <https://doi.org/https://doi.org/10.7862/rm.2024.11>
- Ifeanyi, O., y Nnaji, J. (2023). Electricity Generator Emission and Its Impacts on Air Quality to the Environment. *Asian Journal of Green Chemistry*(7), 132-139. https://doi.org/https://www-ajgreenchem-com.translate.google/article_171163.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- International Volcanic Health Hazard Network [IVHHN]. (2025). *Dióxido de azufre (SO2)*. <https://www.ivhhn.org/es/guidelines/guia-sobre-gases-volcanicos/dioxido-de->

- Parra Romero, J. (2024). *Metodología para el cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero producidas por generación Térmica*. Quito - Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25824/1/CD%2014480.pdf>
- Pérez, V., Páez, B., y Játiva, J. A. (2024). La crisis del sector eléctrico: Vino para quedarse. *USFQ*.
[chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.usfq.edu.ec/sites/default/files/2024-09/koyuntura-108.pdf](https://www.usfq.edu.ec/sites/default/files/2024-09/koyuntura-108.pdf)
- Primicias. (2024). *Generadores eléctricos llenan el aire de Quito de azufre y monóxido de carbono*. Quito.
- Razek, M., Nasr, G., Baiomy, M., Taieb, A., y Refai, M. (2025). Exhaust emissions gases effects on environmental pollution and processing technologies. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10, 361–376.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41207-024-00577-1>
- Registro Oficial - Año II - Edición Especial N° 270. (13 de febrero de 2015). *Acuerdo Ministerial N° 28*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu155123.pdf>
- Registro Oficial Edición Especial N° 2. (29 de marzo de 2017). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)*. Ministerio del Ambiente: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Rojas, G. (2015). *Boletín Técnico N° 20 - Grupos Electrógenos - Principios básicos*. General Distribuidora S.A.:
<https://www.gedisa.com.ve/boletin/pdf/Boletin%20técnico%2020%20Grupo%20Electrogenos%20Principio%20Basico.pdf>
- Shakya, S., Bajracharya, I., Vaidya, R., Bhave, P., Sharma, A., Rupakheti, M., y Bajracharya, T. (2022). Estimation of air pollutant emissions from captive diesel generators and its mitigation potential through microgrid and solar energy. *Energy Reports*, 8, 3251-3262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.084>
- Torres Obregón, J. (2024). *Simulación de características de performance, combustión y emisión empleando diferentes tipos de combustible en un generador eléctrico Diesel de 513kW*. Lima - Perú: Facultad de Ingeniería - Universidad Tecnológica del Perú.
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/11097/J.Torres_Programa_de_Titulacion_Titulo_Profesional_2024.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Universidad San Francisco de Quito. (Septiembre de 2024). La crisis del sector eléctrico: vino para quedarse. *Koyuntura*, 25. Universidad San Francisco de Quito: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.usfq.edu.ec/sites/default/files/2024-09/koyuntura-108.pdf
- Vivanco, G. (16 de octubre de 2024). *Generador eléctrico: ¿nocivo para la salud?* Conexion PUCE: <https://conexion.puce.edu.ec/generador-electrico-nocivo-para-la-salud/>
- Yousefi, R., y Mokaramian, S. (2025). Investigation of Gas Pollutant Emissions from Fossil Fuel Combustion in Iran from 2000 to 2017. *Journal of Engineering in Industrial Research*, 6(1), 19-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.48309/JEIRES.2025.500723.1153>
- Zalakeviciute, R., Diaz, V., y Rybarczyk, Y. (2024). Impact of City-Wide Diesel Generator Use on Air Quality in Quito, Ecuador, during a Nationwide Electricity Crisis. *Atmosphere*, 15(10), 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/atmos15101192>
- Zegarra, R., Andrade, S., Parra, M., Mejía, D., y Rodas, C. (2020). Análisis espacial de PM10 en el aire y su composición de metales con. *DIUC*, 12. [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/edison-timbe-maskana11106-xmp%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/edison-timbe-maskana11106-xmp%20(1).pdf)

””””

Figura 27.

Niveles de Ruido en el Mapa Satelital, 248 Generadores.

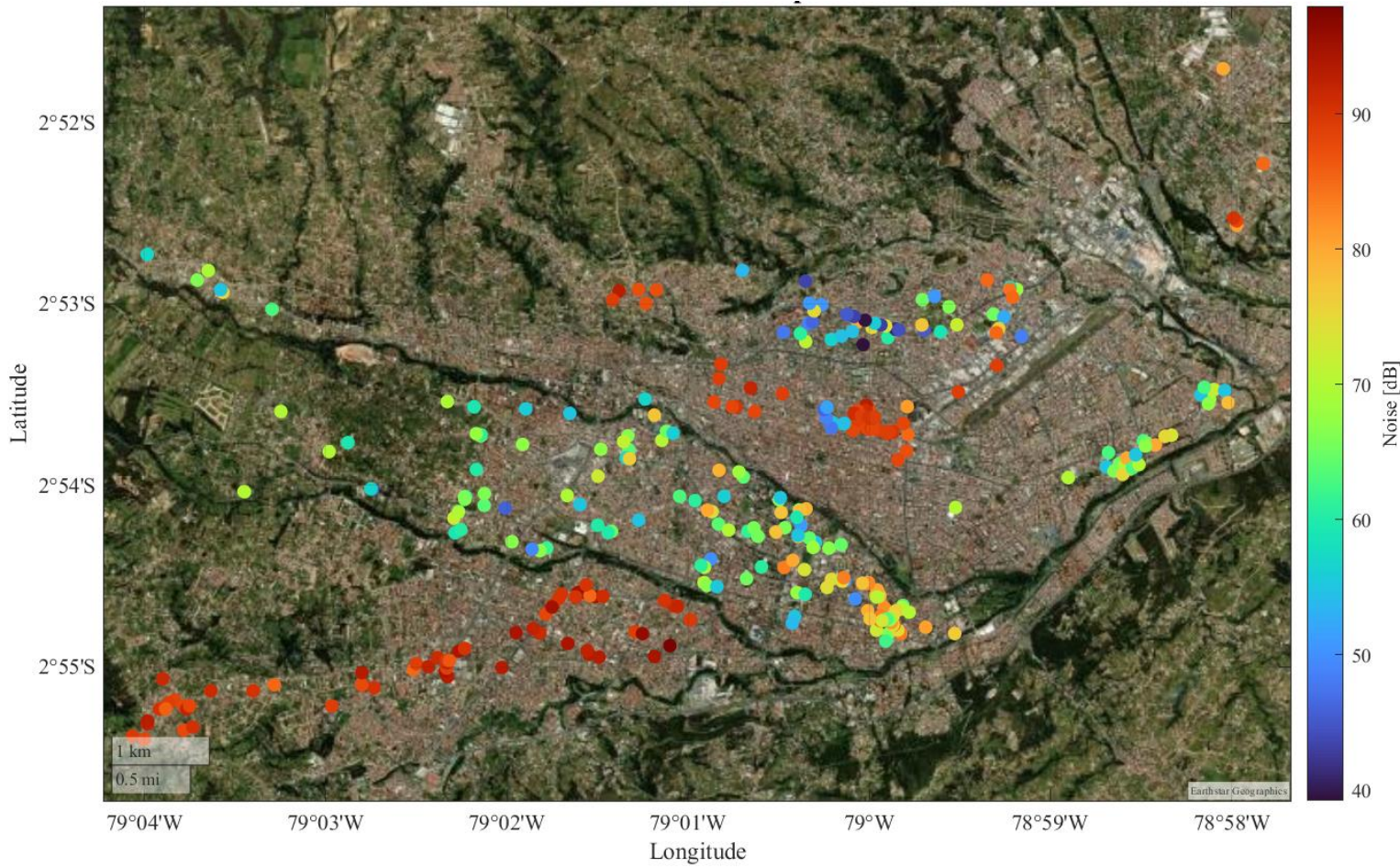


Figura 28.

Mapas de predicción espacial de contaminantes estimados a partir del modelo validado.

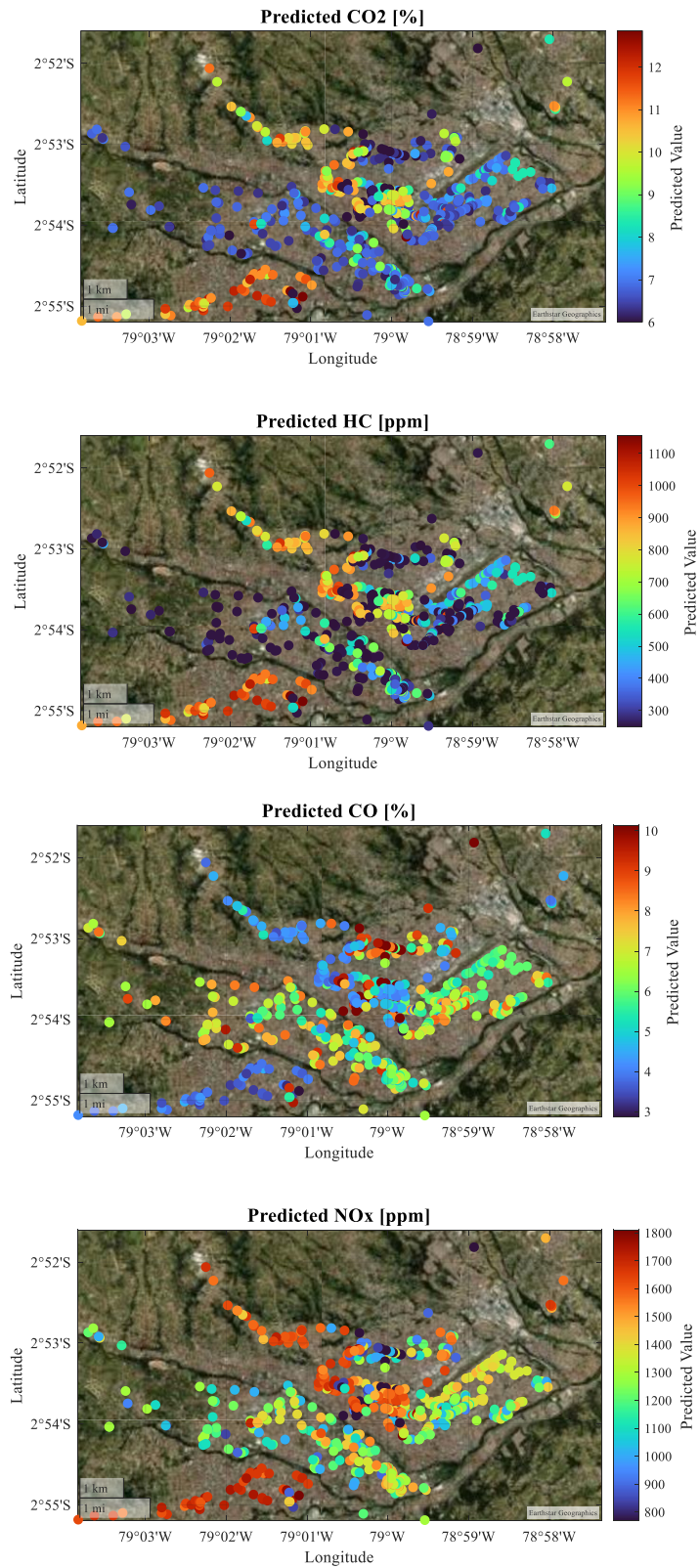


Figura 29.

Comparación: Real Vs Predicción en datos de entrenamiento.

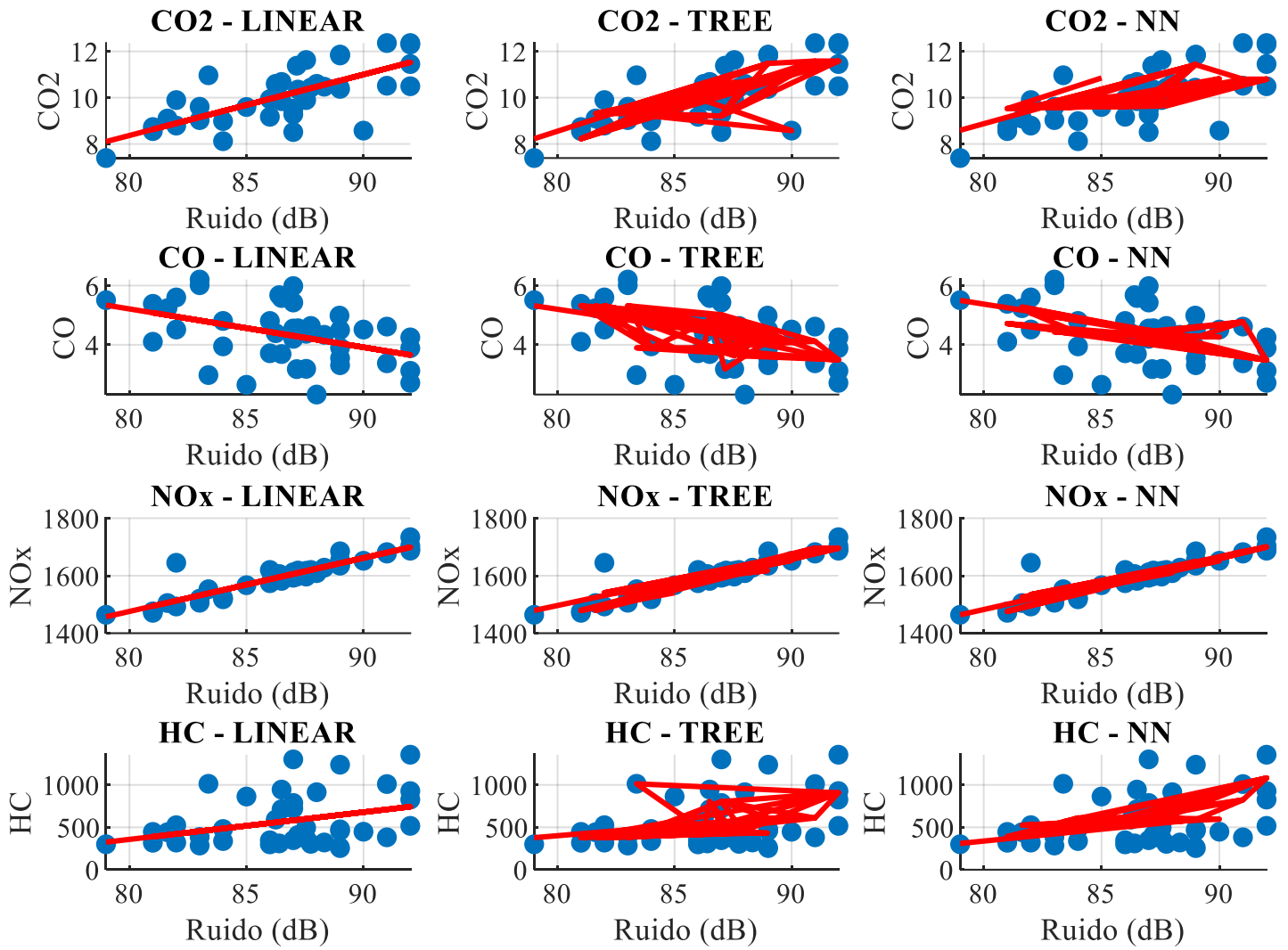


Figura 30.

Medido vs Predicho del CO2.

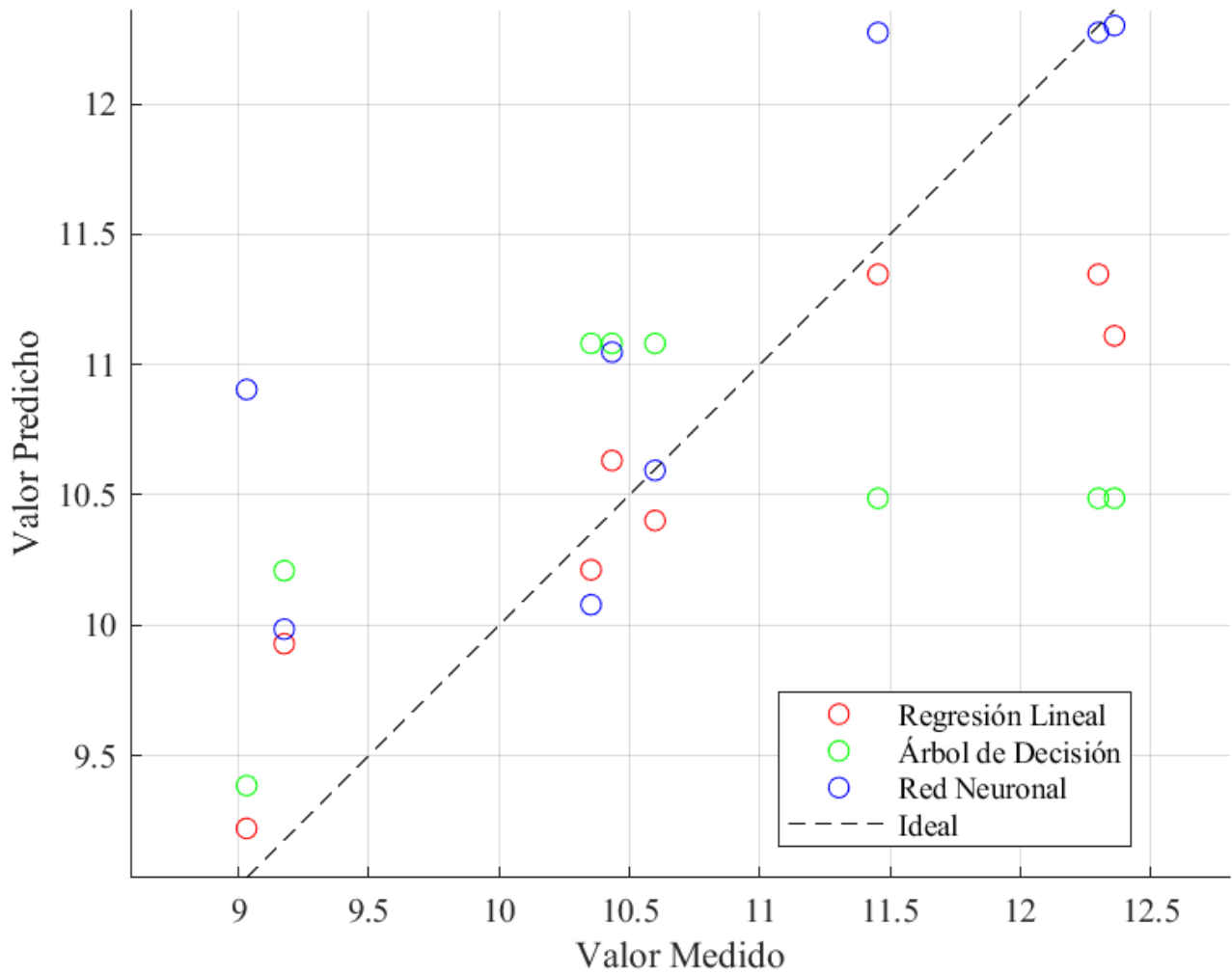


Figura 31.

Medido vs Predicho del CO.

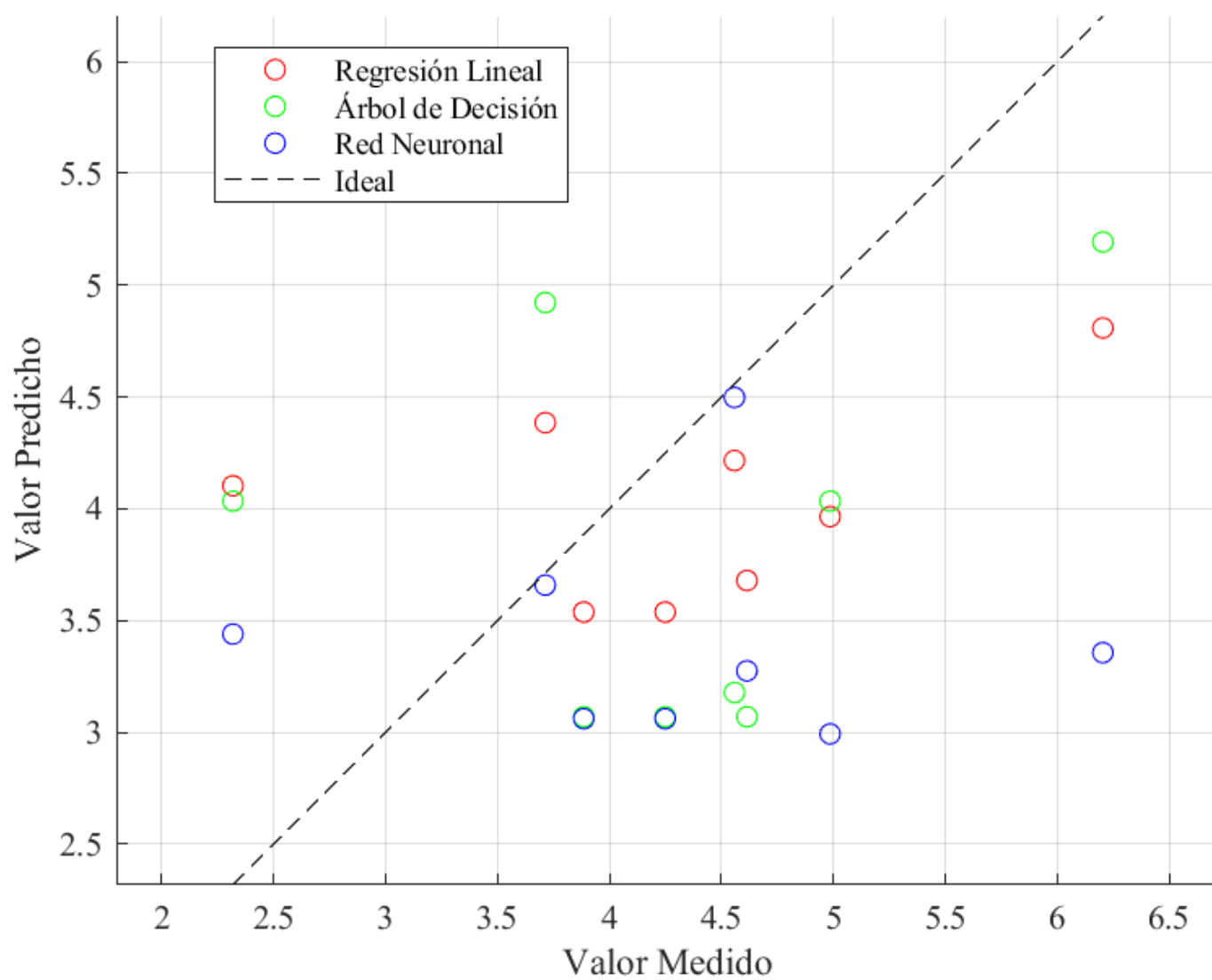


Figura 32.

Medido vs Predicho del HC.

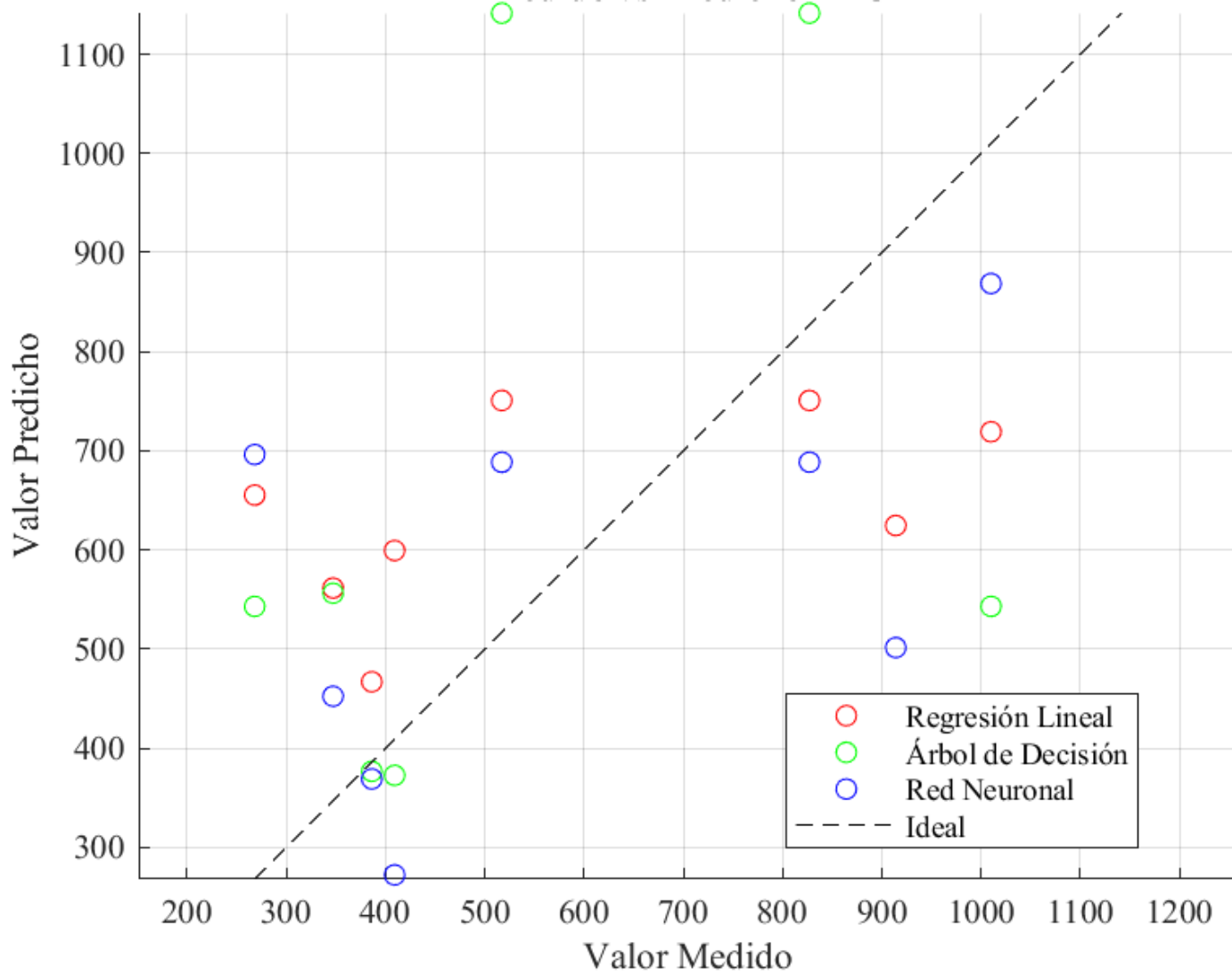


Figura 33.

Medido vs Predicho del NOx.

