



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
“DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ”
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO PARA LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE GENERADA POR LAS
EMISIONES DE TERMOELÉCTRICAS MEDIANTE EL
SOFTWARE AERMOD EN EL PERIODO 2013 – 2022 EN LAGO
AGRIO**

AUTOR

GÓMEZ QUIMIS KEVIN DOUGLAS

TUTOR

ING. HERNÁNDEZ PAREDES TOMÁS, MSC

**GUAYAQUIL - ECUADOR
2025**



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
"DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ"
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

APROBACIÓN DEL TUTOR

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE GENERADA POR LAS EMISIONES DE TERMOELÉCTRICAS MEDIANTE EL SOFTWARE AERMOD EN EL PERIODO 2013 – 2022 EN LAGO AGRIO**, realizado por el estudiante **GÓMEZ QUIMIS KEVIN DOUGLAS**; con cédula de identidad N° 0931556781 de la carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

Ing. Hernández Paredes Tomás Edinson MSc.

Guayaquil, 9 de octubre del 2024



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
“DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ”
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE GENERADA POR LAS EMISIONES DE TERMOELÉCTRICAS MEDIANTE EL SOFTWARE AERMOD EN EL PERIODO 2013 – 2022 EN LAGO AGRIO”**, realizado por el estudiante **GÓMEZ QUIMIS KEVIN DOUGLAS**, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

OCE. LEILA ZAMBRANO ZAVALA, M.Sc.
PRESIDENTE

ING. DIEGO ARCOS JÁCOME, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

ING. CARLOS ORTEGA ORDOÑEZ, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

ING. TOMÁS HERNÁNDEZ PAREDES, M.Sc.
EXAMINADOR SUPLENTE

Guayaquil, 19 de diciembre del 2024

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios y mi familia, pilares fundamentales en el camino y la obtención de este logro. Sin su apoyo incondicional nada de esto sería posible.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme la fortaleza, paciencia y sabiduría necesarias para alcanzar este logro, a mis padres y hermanos, quienes me han apoyado incondicionalmente en todo el camino.

De manera especial, quiero expresar mi agradecimiento al Ing. Tomás Hernández, tutor, amigo, guía y apoyo, gracias por su valioso tiempo, compromiso e iniciativa en cada etapa del proyecto. A su amigo y colaborador, el Ing. Mario Patiño, por su aporte profesional y desinteresado. Personas cruciales para la culminación de este trabajo.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a los amigos que hice a lo largo de la carrera. Cada uno de ellos enriquecieron mi camino académico.

Autorización de Autoría Intelectual

Yo **GÓMEZ QUIMIS KEVIN DOUGLAS**, en calidad de autor(a) del proyecto realizado, sobre “**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE GENERADA POR LAS EMISIONES DE TERMOELÉCTRICAS MEDIANTE EL SOFTWARE AERMOD EN EL PERIODO 2013 – 2022 EN LAGO AGRIO**” para optar el título de INGENIERO AMBIENTAL, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor(a) me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, octubre 10 del 2024

GÓMEZ QUIMIS KEVIN DOUGLAS

C.I. 0931556781

RESUMEN

La contaminación atmosférica sigue siendo una de las principales preocupaciones ambientales debido a sus efectos adversos en la salud pública. El crecimiento poblacional ha incrementado significativamente la demanda energética, gran parte es satisfecha por plantas termoeléctricas que queman combustibles fósiles, emitiendo contaminantes nocivos. Este estudio evalúa los impactos en la calidad del aire de las emisiones de plantas termoeléctricas en Lago Agrio durante el periodo 2013-2022, utilizando el software AERMOD para simular la dispersión de contaminantes. Los datos sobre la ubicación de las plantas y el consumo de combustible se obtuvieron de informes gubernamentales. Las tasas de emisión se estimaron utilizando la metodología del factor de emisión, basadas en el volumen de combustible consumido. Las concentraciones de contaminantes a nivel del suelo se observaron en receptores sensibles y se compararon con los estándares ambientales nacionales vigentes. Se identificaron cinco plantas termoeléctricas en el área urbana de Lago Agrio, siendo 2016 y 2019 los años con mayor consumo de combustible y, por ende, las tasas de emisión estimadas más altas. Estos años también presentaron las concentraciones más significativas de contaminantes a nivel del suelo. En conclusión, los niveles de contaminación y las emisiones están directamente correlacionados con la cantidad y tipo de combustible quemado para la generación de electricidad. La transición a combustibles más limpios, junto con la implementación de medidas de control, mitigación y mantenimiento regular, podría reducir significativamente estas emisiones.

Palabras clave: *AERMOD, centrales termoeléctricas, dispersión de contaminantes, factor de emisión*

ABSTRACT

Air pollution continues to be a major environmental concern due to its adverse effects on public health. Population growth has significantly increased energy demand, much of which is met by thermoelectric plants that burn fossil fuels which emit harmful pollutants. This study evaluates the air quality impacts of emissions from thermoelectric plants in Lago Agrio during the period 2013-2022, using AERMOD software to simulate pollutant dispersion. Data on plant locations and fuel consumption were obtained from government reports. Emission rates were estimated using the emission factor methodology based on the volume of fuel consumed. Ground-level pollutant concentrations were observed at sensitive receptors and compared to current national environmental standards. Five thermoelectric plants were identified in the Lago Agrio urban area, with 2016 and 2019 being the years with the highest fuel consumption and thus the highest estimated emission rates. These years also presented the most significant concentrations of pollutants at ground level. In conclusion, pollution levels and emissions are directly correlated to the amount and type of fuel burned for electricity generation. The transition to cleaner fuels with the implementation of controls, mitigation and regular maintenance measures could significantly reduce these emissions.

Keywords: *AERMOD, emission factor, pollutant dispersion, thermoelectric power plants*

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR	II
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	III
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
AUTORIZACIÓN DE AUTORÍA INTELECTUAL	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE APÉNDICES	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes del problema.....	1
1.2 Planteamiento y formulación del problema	2
1.2.1 Planteamiento del problema	2
1.2.2 Formulación del problema	3
1.3 Justificación de la investigación	3
1.4 Delimitación de la investigación	4
1.5 Objetivo general	4
1.6 Objetivos específicos.....	4
1.7 Hipótesis	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Estado del arte.....	6
2.2 Bases teóricas	9
2.2.1 Central termoeléctrica	9
2.2.1.1. Tipo de centrales termoeléctricas	10
2.2.1.1.1. Turbinas de vapor (calderas).....	10
2.2.1.1.2. Motores de Combustión Interna (MCI).....	10
2.2.1.1.3. Turbinas de gas.....	10
2.2.2 Emisiones	11
2.2.2.1. Emisiones atmosféricas	11
2.2.3 Fuentes de emisiones.....	11
2.2.4 Técnicas para estimación de emisiones.....	12

2.2.4.1. Muestreo en la fuente	12
2.2.4.2. Factor de emisión	12
2.2.4.3. Balance de masas	13
2.2.4.4. Modelos de emisión	13
2.2.5 Modelos de dispersión de contaminantes	13
2.2.5.1. Tipos de modelos existentes	13
2.2.5.1.1. Modelos Eulerianos.	13
2.2.5.1.2. Modelos Lagrangeanos.	14
2.2.5.1.3. Modelos tipo puff.	14
2.2.5.1.4. Modelos Gaussianos.	14
2.2.5.2. AERMOD View	15
2.2.6 Temperatura ambiente.....	15
2.2.7 Humedad relativa	15
2.2.8 Presión atmosférica.....	15
2.2.9 Dirección del viento	15
2.2.10 Velocidad del viento.....	15
2.2.11 Precipitación.....	16
2.2.12 Radiación global	16
2.2.13 Nivel de Inmisión o calidad del aire.....	16
2.2.13.1. Contaminantes criterio	16
2.2.13.1.1. PM_{10}	16
2.2.13.1.2. $PM_{2.5}$	17
2.2.13.1.3. Dióxido de Nitrógeno (NO_2).	17
2.2.13.1.4. Dióxido de Azufre (SO_2).	17
2.2.13.1.5. Monóxido de Carbono (CO).	17
2.2.14 Receptores sensibles	17
2.2.15 Sistemas de control de emisiones atmosféricas	17
2.2.15.1. Ciclones	17
2.2.15.2. Precipitadores electrostáticos	18
2.2.15.3. Lavador Venturi	18
2.2.15.4. Adsorción por carbón activado	18
2.2.15.5. Absorción	18
2.2.15.6. Quemador de gases	18
2.3 Marco legal.....	19

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)	19
2.3.2 Código Orgánico del Ambiente.....	21
2.3.3 Ley Orgánica de la Salud.....	22
2.3.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente	23
2.3.5 Acuerdo Ministerial 097-A	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1 Enfoque de la investigación	25
3.1.1 Tipo y alcance de la investigación	25
3.1.2 Diseño de investigación	25
3.2 Metodología	25
3.2.1 Variables	25
3.2.1.1. Variable independiente	25
3.2.1.2. Variable dependiente	26
3.2.2 Tratamientos.....	26
3.2.3 Diseño experimental	26
3.2.4 Recolección de datos	26
3.2.4.1. Recursos.....	26
3.2.4.2. Métodos y técnicas	27
3.2.5 Análisis estadístico.....	33
4. RESULTADOS.....	35
4.1 Identificación de la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas del cantón Lago Agrio para la estimación de las emisiones de los contaminantes criterio mediante la metodología de factor de emisión	35
4.2 Aplicación del modelo de dispersión de contaminantes de AERMOD View para la determinación de las concentraciones de los contaminantes criterio a nivel del suelo en el cantón Lago Agrio	41
4.3 Elaboración de propuesta con medidas de control para las emisiones generadas por las centrales termoeléctricas en aquellos puntos con receptores sensibles donde se superen los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A.	53
5. DISCUSIÓN	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
6.1 Conclusiones.....	60
6.2 Recomendaciones.....	60

BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	68
APÉNDICES	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de los puntos vértices del área urbana del cantón Lago Agrio	4
Tabla 2. Recursos necesarios para el desarrollo del proyecto	26
Tabla 3. Factores de emisión a utilizarse en el cálculo de emisiones	28
Tabla 4. Equivalencias de combustibles a toneladas equivalente de petróleo (TEP)	29
Tabla 5. Parámetros estándar de las fuentes de emisión	30
Tabla 6. Límites máximos permisibles de nivel de inmisiones	33
Tabla 7. Coordenadas de ubicación de las centrales termoeléctricas identificadas en el área urbana de Lago Agrio	35
Tabla 8. Coordenadas de ubicación de los receptores sensibles identificados en el área urbana del cantón Lago Agrio	53
Tabla 9. Ficha N° 1 Control de gases para la central termoeléctrica Lago Agrio .	54
Tabla 10. Ficha N° 2 Control de material particulado para la central termoeléctrica Lago Agrio	56
Tabla 11. Formato de ficha para las medidas de control.....	69
Tabla 12. Cantidad y tipo de combustible consumidos por las centrales termoeléctricas a lo largo del periodo de estudio	71
Tabla 13. Cantidad y tipo de combustible consumidos por las centrales termoeléctricas en kilotoneladas equivalentes de petróleo (kTEP)	72
Tabla 14. Tasas de emisión de los contaminantes por año de estudio	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Técnicas de estimación de emisiones	12
Figura 2. Ventana de control de AERMOD	30
Figura 3. Ventana de datos de las fuentes	31
Figura 4. Ventana de opciones de salida	32
Figura 5. Emisiones de monóxido de carbono (CO) por central termoeléctrica de 2013 a 2022	36
Figura 6. Emisiones de dióxido de nitrógeno (NO ₂) por central termoeléctrica de 2013 a 2022	37
Figura 7. Emisiones de material particulado grueso (PM ₁₀) por central termoeléctrica de 2013 a 2022	38
Figura 8. Emisiones de material particulado fino (PM _{2.5}) por central termoeléctrica de 2013 a 2022	38
Figura 9. Emisiones de dióxido de azufre (SO ₂) por central termoeléctrica de 2013 a 2022	39
Figura 10. Combustible consumido por las centrales termoeléctricas de 2013 a 2022	40
Figura 11. Simulaciones de CO para el periodo de 1 hora de 2013 a 2022	42
Figura 12. Simulaciones de CO para el periodo de 8 horas de 2013 a 2022	43
Figura 13. Simulaciones de NO ₂ para el periodo de 1 hora de 2013 a 2022	44
Figura 14. Simulaciones de NO ₂ para el periodo anual de 2013 a 2022	45
Figura 15. Simulaciones de PM _{2.5} para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022..	46
Figura 16. Simulaciones de PM _{2.5} para el periodo anual de 2013 a 2022	47
Figura 17. Simulaciones de PM ₁₀ para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022 ..	48
Figura 18. Simulaciones de PM ₁₀ para el periodo anual de 2013 a 2022.....	49
Figura 19. Simulaciones de SO ₂ para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022	50
Figura 20. Simulaciones de SO ₂ para el periodo anual de 2013 a 2022	51
Figura 21. Mapa de ubicación del área urbana del cantón Lago Agrio, Sucumbíos, Ecuador.....	68
Figura 22. Mapa de ubicación de las centrales termoeléctricas en el área urbana el cantón Lago Agrio	70
Figura 23. Rosas de los vientos anuales del área urbana del cantón Lago Agrio en los años 2013 a 2022	74

Figura 24. Mapa de ubicación de los receptores sensibles en el área urbana del cantón Lago Agrio 75

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice N° 1: Promedios anuales de los parámetros meteorológicos utilizados en el software para la simulación	76
Apéndice N° 2: Concentraciones estimadas en los receptores sensibles identificados en el área urbana del cantón Lago Agrio y su comparación con el estándar nacional ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del problema

Una de las principales preocupaciones mundiales en la actualidad es la contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) la contaminación del aire representa un gran riesgo medioambiental debido a las afectaciones que esta tiene sobre las personas. En 2019, solo el 1% de la población mundial vivía en lugares acorde a las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire. Esta situación lleva a que este tipo de contaminación se convierta en el cuarto factor de riesgo de muerte prematura a nivel mundial (Health Effects Institute [HEI], 2020).

La amenaza que representa la contaminación atmosférica para la salud pública ha despertado el interés de la comunidad científica, tanto es así, que mediante metas específicas dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se busca la reducción de la exposición y morbilidad asociada a dicha contaminación (OMS, 2021). Para 2019 se redujo la esperanza de vida en un año ocho meses y se relaciona la muerte de cuatro millones de personas en todo el mundo con la exposición prolongada a material particulado, uno de los principales contaminantes del aire y el de mayor incidencia negativa sobre la salud humana (HEI, 2020).

Además del material particulado los contaminantes atmosféricos primarios son el ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x). La exposición a aire contaminado se relaciona con una serie de enfermedades cardiovasculares (infarto del miocardio, insuficiencia cardíaca y accidente cerebrovascular) y respiratorias (enfermedad pulmonar obstructiva crónica y el cáncer de pulmón) (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF], 2020).

La contaminación de aire exterior en Ecuador se da principalmente en las grandes ciudades debido a la densa población, a su extenso parque automotor, la producción energética y las actividades industriales que se desarrollan en las áreas urbanas (Rodríguez-Guerra y Cuvi, 2019). Actualmente se dificulta conocer la verdadera situación de la contaminación del aire en el país, por la ausencia de sistemas de monitoreo a nivel del suelo, solo Quito y Cuenca poseen dichos sistemas.

Debido a la existencia de empresas petroleras encargadas de extraer petróleo mediante pozos, la región amazónica ecuatoriana sufre la mayor contaminación atmosférica del país (Moreira-Romero, 2018). Además, la generación de electricidad mediante la quema de combustibles fósiles y el uso de glifosato en las plantaciones de coca contribuyen a la contaminación del aire que afecta la salud de las comunidades amazónicas cercanas a la frontera colombiana (UNICEF, 2020).

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema

La contaminación derivada de actividades industriales, minería, generación eléctrica, agricultura mecanizada y vehículos que utilizan combustibles fósiles está experimentando un incremento en comparación con la contaminación vinculada a la población que no participa en las actividades industriales modernas (Landigran et al., 2017). El aumento en la contaminación del aire ambiente, del suelo y la contaminación química se remarca en países de bajo y mediano ingreso, en vía de desarrollo o con un rápido desarrollo industrial.

A nivel mundial, el 65% de toda la electricidad generada proviene de centrales termoeléctricas alimentadas con combustibles fósiles. Su funcionamiento depende netamente de la quema de estos combustibles provocando emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire (Kumar, Kumar et al., 2023).

Del total de energía eléctrica bruta producida en el Ecuador en el año 2022, aproximadamente el 24% corresponde a energía No Renovable proveniente de termoeléctricas de tipo MCI (Motor de combustión interna), Turbogas y Turbovapor ubicadas en diversas provincias de todo el territorio nacional (Agencia de Regulación y Control de energía y Recursos Naturales No Renovables [ARCERNNR], 2022). Solo en la provincia de Sucumbíos se encuentran funcionando 23 centrales termoeléctricas que queman constantemente combustibles fósiles como parte de sus procesos.

Este tipo de centrales genera electricidad a partir de la combustión de combustibles fósiles en una caldera para producir vapor de agua que hacer girar los álabes de una turbina conectada a un generador eléctrico, este proceso emite varios contaminantes atmosféricos, como los contaminantes primarios. Cortés et al. (2019) afirman que:

Los principales contaminantes emitidos a partir de los procesos de una central termoeléctrica son material particulado (MP), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂) y metales pesados como el mercurio (Hg); adicionalmente, las emisiones de NO₂ y SO₂ son precursores en la atmósfera de ácido nítrico y sulfúrico. (p.103)

Dichas emisiones generan una alteración en la calidad del aire de las zonas cercanas a las centrales termoeléctricas. Un mal estado del aire o su contaminación representa un riesgo ambiental para la salud de todas las personas (OMS, 2022).

Actualmente se comprende que la contaminación atmosférica es uno de los principales causantes de muchas enfermedades no transmisibles (asma, defectos en nacimientos y trastornos de desarrollo neurológico) y enfermedades del corazón, accidentes cardiovasculares y cáncer en adultos (Landigran et al., 2017). Si no existe una intervención agresiva para contrarrestar este tipo de contaminación, las proyecciones indican que la contribución de la contaminación del aire a muertes prematuras aumentaría en un 50% para 2050 (Lelieveld et al., 2015).

1.2.2 Formulación del problema

¿El nivel de inmisiones influenciado por las emisiones de las centrales termoeléctricas en los receptores sensibles del cantón Lago Agrio cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A?

1.3 Justificación de la investigación

El crecimiento desmedido de la población mundial ha desencadenado el incremento de la demanda energética. Para satisfacer esta necesidad humana se emplean centrales termoeléctricas productoras de electricidad a partir de la quema de combustibles fósiles. Esta actividad libera sustancias a la atmósfera, provocando la contaminación del aire y la afectación de la calidad del aire.

Este tipo de contaminación produce efectos adversos en el ser humano tanto a corto, como a largo plazo. Van desde enfermedades respiratorias subclínicas, hasta la muerte prematura. Se estima que alrededor del 5% de muertes por cáncer de pulmón y el 3% de las muertes por cáncer cardiopulmonar a nivel mundial son atribuibles al material particulado presente en el aire contaminado (Li y Mallat, 2018).

La evaluación constante de la contaminación atmosférica y la calidad del aire toma un rol importante dentro de las actividades necesarias para proteger la salud de la población y del ambiente. Por lo que se pretende analizar la calidad del aire del cantón Lago Agrio, ubicado en la provincia de Sucumbíos, utilizando el software especializado AERMOD View a partir del desarrollo de un inventario de emisiones de las centrales termoeléctricas presentes en la zona.

1.4 Delimitación de la investigación

- **Espacio:** Cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbíos, Ecuador (ver figura 21). El análisis se centra en el área urbana del cantón, la zona de estudio se encuentra delimitada por el polígono cuyos puntos vértices en coordenadas UTM WGS84 que se muestran a continuación:

Tabla 1.

Coordenadas de los puntos vértices del área urbana del cantón Lago Agrio

Este	Norte	Zona UTM
284121	10014770	18S
294921	10014770	18S
294921	10004770	18S
284121	10004770	18S

Elaborado por: El autor, 2024

- **Tiempo:** Cuatro meses.
- **Población:** Lago Agrio cuenta con 105 044 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2023).

1.5 Objetivo general

Analizar la calidad del aire en el cantón Lago Agrio influenciada por las emisiones de los contaminantes criterio (SO₂, NO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5}) generadas por las centrales termoeléctricas utilizando el modelo de dispersión de AERMOD View durante el periodo 2013 – 2022.

1.6 Objetivos específicos

- Identificar la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas del cantón Lago Agrio para la estimación de las emisiones de los contaminantes criterio mediante la metodología de factor de emisión.

- Aplicar el modelo de dispersión de contaminantes de AERMOD View para la determinación de las concentraciones de los contaminantes criterio a nivel del suelo en el cantón Lago Agrio.
- Elaborar una propuesta con medidas de control para las emisiones generadas por las centrales termoeléctricas en aquellos puntos con receptores sensibles donde se superen los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A.

1.7 Hipótesis

El nivel de inmisiones, generado por las emisiones de termoeléctricas, del 75% de los receptores sensibles identificados en el cantón Lago Agrio no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

Moharreri et al. (2020) evaluaron la exposición a material particulado (PM_{10}) y monóxido de carbono (CO) generado por cuatro plantas de energía en Mashhad, Irán, utilizando de forma combinada AERMOD, ArcGIS y una evaluación de riesgos para la salud estimando el nivel de contaminación en trece receptores municipales en Mashhad. Los resultados muestran el transporte de los contaminantes largas distancias, cerca de 80 000 habitantes están expuestos a concentraciones de PM_{10} que oscilan entre 50 y 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y, 100 000 a concentraciones de CO que oscilan entre 40 y 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar las concentraciones simuladas y observadas de contaminantes existe una sobreestimación insignificante por parte del modelo.

Siahpour et al. (2022) estimaron los contaminantes ambientales emitidos por la central térmica Shazad, ubicada en Arak, Irán. Modelaron la distribución de las emisiones de la central durante periodos de ocho horas y anuales utilizando AERMOD para comparar con los estándares nacionales e internacionales. Las máximas concentraciones de los contaminantes CO, SO_2 , NO_x y PM_{10} en un periodo de 8 horas se presentaron a un kilómetro de distancia de la central térmica, se observaron 18.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 45.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 16.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. El estudio evidenció que con el uso de combustible mazut las concentraciones de PM_{10} , NO_x y CO son menores a los estándares de la EPA.

Wan et al. (2023) estimaron en China la mejora de la calidad del aire, los beneficios económicos y de salud asociados a la disminución de emisiones de contaminantes atmosféricos debido a la implementación de los estándares de emisiones en el sector de energía termoeléctrica mediante inventario de emisiones, un modelo atmosférico, un modelo de la evaluación de la salud y un modelo de análisis de costos. Los resultados indican que todas las medidas de control reducen la contaminación, siendo la renovación de unidades preexistentes (RPU) la más efectiva. Estas reducciones evitan aproximadamente 67 831 muertes prematuras a nivel nacional, los beneficios económicos netos ascienden a 109.92 mil millones de yuanes. El estudio proporcionó argumentos sólidos para la formulación de nuevas políticas en China, se recomienda promover la RPU y endurecer los estándares de emisiones para las centrales termoeléctricas a nivel mundial.

Khoshakhlagh et al. (2023) caracterizaron los cambios espaciotemporales en las concentraciones de contaminantes del aire en Teherán-Irán identificando las fuentes de contaminación y estimando los efectos en la salud humana y los costos económicos de estos. Los resultados mostraron que el Índice de Calidad del Aire (ICA) en Teherán está por encima de 100, lo que significa que es insalubre para grupos sensibles. Investigaron los costos de los efectos en la salud humana debido a la contaminación del aire obteniendo que las enfermedades cardiovasculares, la diabetes y el cáncer de pulmón representan los costos más altos al sistema de atención médica, siendo las enfermedades cardiovasculares y los accidentes cerebrovasculares los de mayor incidencia en las muertes prematuras. Los investigadores concluyeron que, debido a los resultados mostrados, Teherán necesita la implementación urgente de estrategias de mitigación.

Afzali et al. (2017) predijeron las variaciones espaciales de SO₂, NO₂ y PM₁₀ emitidas por múltiples fuentes en Pasir Gudang, Johor, Malasia utilizando los modelos de dispersión del aire (AERMOD) y de investigación y pronóstico del tiempo (WRF) para simular variables meteorológicas durante dos semanas analizando parámetros como temperatura, velocidad y dirección del viento. Las concentraciones máximas a nivel del suelo de SO₂, NO₂ y PM₁₀ simulada mediante AERMOD-WRF en el área industrial fue de 36.2, 59.8 y 5.4 µg/m³, respectivamente. Así, la mayoría de los puntos de par previstos y observados se encuentran cerca de la línea uno a uno, lo que indica que existe una buena concordancia entre las concentraciones observadas en la estación de monitoreo Pasir Gudang y las concentraciones modeladas en el estudio. Los hallazgos de la investigación facilitarían la gestión de la calidad del aire urbano a las autoridades gubernamentales locales y a los responsables políticos.

Pantusheva et al. (2022) presentaron una revisión detallada del uso de modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD) para modelar la dispersión de contaminantes del aire en áreas urbanas. Los hallazgos fueron comparados con las pautas y estándares disponibles de modelización de contaminantes del aire urbano. Los resultados mostraron que los artículos no especifican uno o más aspectos de los modelos utilizados y ninguno realiza la verificación y validación según estándares aceptados. Este estudio permite a los profesionales de modelación de la dispersión de la contaminación puedan utilizar estos resultados para comprender las tendencias de la investigación actual y abordar los problemas

abiertos que se presentan debido a la creciente relevancia mundial del inconveniente de la calidad del aire.

Kumar, Singh et al. (2023) analizaron las fuentes de los principales contaminantes del aire interior, los mecanismos de toxicidad y sus efectos sobre la salud cardiovascular, ocular, neurológica, femenina y fetal. Los compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas (PM), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (NO), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), esporas microbianas, polen, alérgenos, etc. son contaminantes transportados por el aire y contribuyen al deterioro de la calidad del aire interior. Debido a los tiempos de exposición prolongados y a las características físicas particulares las mujeres y los niños tienen un mayor riesgo de sufrir la mala calidad del aire interior causando una gran variedad de problemas a la salud. La revisión muestra que las principales causas de incapacidad y mortalidad temprana son el cáncer de pulmón, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y los trastornos cardiovasculares. Se recalca la importancia de aplicar intervenciones y políticas eficientes para reducir los riesgos a la salud causados por la mala calidad del aire interior.

La Iniciativa Climática de México (ICM, 2021) realizó la modelación de emisiones contaminantes de la Central Termoeléctrica de Tula con la herramienta AERMOD. Evaluaron la calidad del aire estimando emisiones y concentraciones de contaminantes sujetos a regularización en receptores sensitivos, con el fin de identificar las zonas y poblaciones que se ven mayormente afectadas por las plumas de contaminantes. A partir del procesamiento de datos y la información meteorológica el estudio muestra que los vientos predominantes soplan hacia el suroeste con velocidades entre 0.5 y 2.1 m/s. Alrededor del complejo industrial las concentraciones de dióxido de azufre en periodos de 8 horas, 24 horas y un año superan el valor máximo permisible según la NOM-022-SSA1-2010 (524 µg/m³, 288 µg/m³ y 66 µg/m³ respectivamente). En cuanto al material particulado las concentraciones no superaron los límites establecidos en la NOM-025-SSA1-2014. El estudio concluye que la central viola las normas sobre calidad del aire de la Secretaría de Salud y ponen en riesgo la salud de los habitantes de la zona de influencia de las emisiones.

Valencia et al. (2020) estimaron la contaminación del aire a nivel de fondo urbano para Quito, Ecuador utilizando el Modelo de Fondo Urbano (UBM). Los análisis realizados revelan que la UBM modela exitosamente las concentraciones

de CO, NO_x, NO₂, O₃ y PM_{2.5} pero no de SO₂, cuyos valores modelados no reproducen el patrón de observaciones y presentan errores absolutos que no se encuentran en niveles aceptables. Aunque el modelo no considera el terreno, este proporciona resultados satisfactorios en las ubicaciones complejas estudiadas aplicando datos meteorológicos derivados de la ubicación o de cualquier otra de las estaciones de estudio.

Quesada Molina y Bustillos Yaguana (2018) definieron los estándares de confort de los ambientes interiores en las viviendas urbanas en la ciudad de Cuenca-Ecuador. Tuvieron en cuenta factores como la temperatura, la calidad del aire y la iluminación natural mediante un método mixto de mediciones cuantitativas y cualitativas. Los resultados determinaron una temperatura de confort de 20.12 °C, una humedad relativa entre 40 - 65%, una concentración máxima de CO₂ de 614.25 ppm, un factor de luz diurna ≥ 5 para el área social y ≥ 4 para el dormitorio, y un nivel mínimo de iluminación de 300 lux. Con estos resultados se observó que los niveles de confort de temperatura, concentración de CO₂ e iluminación aceptados por los usuarios locales difieren de los estándares establecidos en la normativa local e internacional. Los datos determinados constituyen una base metodológica para realizar procesos similares en otras localidades.

Alvarez et al. (2019) estimaron el ozono superficial en Quito, Ecuador a partir de un modelo empírico de regresión del uso del suelo. Dicho modelo utilizó datos de teledetección, mediciones de contaminantes en el aire y variables meteorológicas. Utilizaron imágenes del Landsat 8 de 2014 y los datos monitoreados de la calidad del aire, consideraron diecinueve variables de entrada, seleccionándolas mediante una regresión por pasos y modelando con una regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para evitar la multicolinealidad. El modelo final propuesto ayuda a comprender la concentración espacial de ozono superficial en Quito con una mejor resolución espacial.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Central termoeléctrica

Una central termoeléctrica es una instalación destinada a la generación de electricidad a partir de energía termoeléctrica. La Asociación de Bancos Privados del Ecuador (ASOBANCA, 2022) menciona: “Una central termoeléctrica genera energía eléctrica a partir del calor que genera la combustión de los combustibles

fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural” (p.5). la energía termoeléctrica también puede ser obtenida de combustibles renovables como la biomasa. La conversión de energía termoeléctrica a eléctrica se realiza mediante calderos generadores de vapor, motores de combustión interna (MCI) o turbinas a gas.

2.2.1.1. Tipo de centrales termoeléctricas

2.2.1.1.1. Turbinas de vapor (calderas).

Generan electricidad a través de una serie de etapas de conversión de energía. Al sistema se le proporciona calor mediante la combustión de carbón, gas natural, petróleo o biomasa. Con la energía calorífica producida en la caldera se transforma el agua en vapor a alta presión y temperatura. Este pasa desde la caldera de alta presión al condensador de baja presión impulsando las palas de la turbina que alimenta el generador eléctrico (International Finance Corporation [IFC], 2008).

2.2.1.1.2. Motores de Combustión Interna (MCI).

Este tipo de centrales utiliza normalmente motores de pistones de cuatro fases y velocidad media y motores de crucetas de dos tiempos y velocidad baja que transforman la energía química de los combustibles (generalmente diésel o fueloil pesado) en energía mecánica. Dentro de un cilindro se comprime aire con un pistón, este genera el calor necesario para encender el combustible inyectado en el cilindro. La mezcla de estas sustancias se expande y empuja el pistón. La energía mecánica producida es utilizada para hacer girar un generador de energía eléctrica (ASOBANCA, 2022).

2.2.1.1.3. Turbinas de gas.

Su sistema es similar a los de turbinas de vapor con la diferencia que este sistema utiliza gases de combustión para hacer girar las palas de la turbina en lugar de vapor. Además del generador eléctrico la turbina también acciona un compresor giratorio que presuriza el aire para luego mezclarse con combustible. Cuanto mayor sea esta compresión, mayor será la temperatura y la eficiencia que puede alcanzar el sistema. La mayoría de las turbinas de gas simples instaladas sin controles tienen sólo una eficiencia del 20 al 30 por ciento (IFC, 2008).

2.2.2 Emisiones

Una emisión es cualquier liberación directa o indirecta de sustancias, calor o ruido en la atmósfera, el agua o el suelo. Esto incluye contaminantes a la atmósfera, gases de efecto invernadero o un precursor de estos, descarga de materia contaminante a cuerpos de agua o residuos al suelo (Environmental Protection Agency [EPA], 2022).

2.2.2.1. Emisiones atmosféricas

Según la European Environment Agency (EEA, 2019) “las emisiones atmosféricas son contaminantes en suspensión o gases tóxicos liberados a la atmósfera desde una fuente o tipo de fuente contaminante”. Los procesos naturales y las actividades humanas generan estas emisiones causantes de muchos problemas ambientales como la acidificación, degradación de la calidad del aire, calentamiento global, cambio climático, exposición a sustancias peligrosas, entre otros (EEA, 2023).

2.2.3 Fuentes de emisiones

Procesos, operaciones y actividades que generan contaminantes del aire. Las fuentes de emisiones se han clasificado de la siguiente forma:

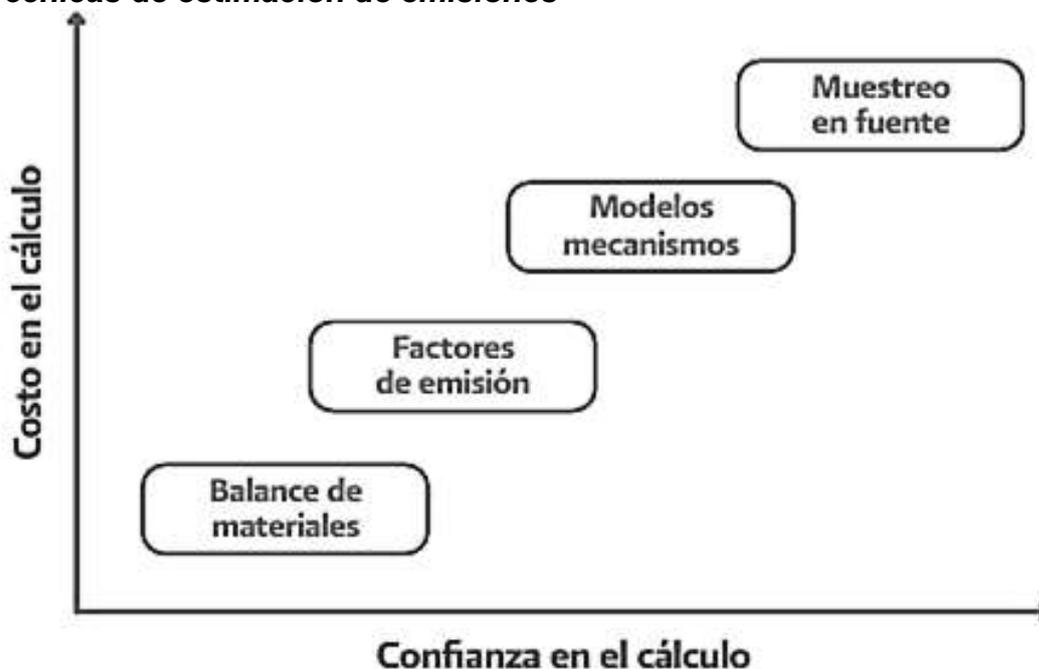
- Fuentes puntuales: caracterizadas por encontrarse en un lugar fijo como las industrias, plantas de energía y refinerías.
- Fuentes móviles: incluyen todas las formas de transporte que funcionen con motores o su fuente de energía sea la quema de combustibles.
- Fuentes de área: actividades que al desarrollarse afecten la calidad del aire.
- Fuentes naturales o biogénicas: resultado de los procesos naturales de la Tierra (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018).

Para las fuentes fijas se distinguen dos tipos adicionales de emisiones básicas para la elección del método de estimación de estas, las emisiones conducidas y no conducidas. Las primeras se descargan por chimeneas o ductos facilitando su medición mientras que las emisiones no conducidas se derivan de actividades a cielo abierto dificultando su medición directa.

2.2.4 Técnicas para estimación de emisiones

Existen dos tipos de métodos para la estimación de emisiones: directos e indirectos. Los métodos directos (Muestreo en la fuente) se basan en la recolección de información en campo y los métodos indirectos (factor de emisión, balance de masas y modelos de emisión) en información generalizada de actividades, procesos o equipo de interés y su comportamiento. Todos y cada uno de los métodos de estimación de emisiones poseen ventajas y desventajas relacionadas con la confiabilidad de sus resultados y los costos asociados (ver figura 1) (SEMARNAT, 2013).

Figura 1.
Técnicas de estimación de emisiones



Fuente: SEMARNAT, 2013

2.2.4.1. Muestreo en la fuente

Es la técnica de mayor confianza y de mayor costo. Consiste en medir la concentración de un contaminante presente en una corriente de gas o la tasa de emisión de dicho contaminante. A partir de un volumen y flujo de gas conocido en una chimenea es posible determinar la tasa de emisión en masa de un contaminante midiendo su concentración en dicho flujo (Radian Corporation, 1996).

2.2.4.2. Factor de emisión

Cantidad de masa del contaminante emitido por unidad de actividad que genera esta emisión. Normalmente estos valores se expresan como la razón entre

la masa del contaminante emitido y el volumen, peso, distancia o duración de la actividad que produce el contaminante.

2.2.4.3. Balance de masas

Otra técnica de bajo costo para la estimación de emisiones es el balance de masa que puede usarse en casos de que no existan datos de muestreo en la fuente o factores de emisiones aplicables. La factibilidad de este método se da si es que existe o no la forma de medir y cuantificar las entradas (materia prima) y salidas de materiales (productos) en el sistema al cual requiera medir las emisiones (Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA], 2019).

2.2.4.4. Modelos de emisión

Técnica que usa ecuaciones empíricas desarrolladas para estimar emisiones cuando estas se relacionan a más de un parámetro, utilizando fundamentos químicos, físicos y biológicos para describir la emisión de una fuente en particular.

2.2.5 Modelos de dispersión de contaminantes

Son modelos matemáticos desarrollados para la estimación de concentraciones de contaminantes en la atmósfera de acuerdo con diversas variables que interfieren en el proceso de dispersión. Entre las principales variables que tiene influencia sobre estos modelos están las variables topográficas, variables meteorológicas, comportamiento químico del contaminante y las variables relativas a la emisión (cantidad, posición, altura, tipo de contaminante, temperatura y velocidad de emisión) (Eurofins Environment Testing Spain, 2023).

2.2.5.1. Tipos de modelos existentes

Según el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2023) los modelos de calidad de aire se clasifican principalmente en Eulerianos, Lagrangeanos, tipo *puff* y Gaussianos. Este organismo los define como:

2.2.5.1.1. Modelos Eulerianos.

Estos modelos hacen uso de ecuaciones matemáticas diferenciales desarrolladas a partir de las leyes físicas y químicas relevantes a la dispersión de contaminantes y su transformación química. Discretizan la zona de estudio en una grilla o malla con una medida horizontal y vertical específica. El modelo integra las

ecuaciones matemáticas en simultáneo en los puntos de la malla para generar información temporal de concentraciones en las tres dimensiones de la malla. Existen diversos grados de complejidad en estos modelos, que van desde sólo considerar la dispersión hasta incluir los procesos fotoquímicos y de aerosoles.

2.2.5.1.2. Modelos Lagrangeanos.

Estos modelos siguen el movimiento matemáticamente de partículas en el aire calculando su desplazamiento en función de la velocidad y dirección del viento inicial. Realizan una integración en el tiempo para determinar la nueva posición de la partícula, considerando posibles cambios en el viento y así determinar su trayectoria mediante la repetición. Para estimar concentraciones en la dispersión de contaminantes desde una fuente se requiere calcular millones de trayectorias. Adicional al transporte por advección se pueden integrar al modelo los procesos turbulentos de la atmosfera.

2.2.5.1.3. Modelos tipo puff.

Son el resultado de la combinación entre los modelos Lagrangeanos y los modelos Gaussianos ya que calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea llamada *puff* a lo largo de una trayectoria. Matemáticamente estos modelos estiman la dispersión Gaussiana en cada punto de la única trayectoria por *puff*. Para el caso de emisiones continuas se simula la dispersión Gaussiana y la trayectoria para muchos *puff*.

2.2.5.1.4. Modelos Gaussianos.

Estos modelos describen una distribución tridimensional de una pluma a partir de condiciones estacionarias tanto de la meteorología como de las emisiones. Las concentraciones de contaminantes se estiman a partir de una distribución Gaussiana donde sus parámetros dependen de las condiciones meteorológicas. Algunos de estos modelos consideran la topografía del terreno y procesos como deposición y sedimentación dependiendo de su grado de complejidad. Los modelos Gaussianos poseen una gran ventaja sobre los demás, es que su uso fácil y rápido no requiere de muchos recursos computacionales.

2.2.5.2. AERMOD View

Es una herramienta utilizada por las industrias y las ingenierías para modelar la dispersión de gases en la atmósfera, evaluar la situación y tomar decisiones para minimizar y controlar los riesgos derivados de estos gases. Es un simulador de modelos de dispersión de aire que analiza la deposición de la contaminación atmosférica proveniente de diferentes fuentes de emisiones. Este software incorpora a la perfección el modelo regulatorio de dispersión del aire preferido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) (Silva y Arcos, 2011).

AERMOD View utiliza el modelo de dispersión AERMOD, que es un modelo gaussiano de dispersión de aire en estado estacionario basado en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria. Además, incorpora algoritmos de lavado de edificios, parámetros de deposición, efectos de isla de calor urbana y del terreno local, y cálculos avanzados de turbulencia meteorológica (EPA, 2017).

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019) la data meteorológica presenta las siguientes definiciones:

2.2.6 Temperatura ambiente

Temperatura del aire que envuelve a un objeto específico.

2.2.7 Humedad relativa

Es la razón entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la máxima cantidad de vapor que puede contener el aire a esa temperatura, es decir, el vapor de agua que contiene determinada masa de agua.

2.2.8 Presión atmosférica

Es el peso de la columna de aire de sección transversal unitaria que se encuentra sobre un punto específico de la superficie terrestre.

2.2.9 Dirección del viento

Dirección desde la cual sopla el viento.

2.2.10 Velocidad del viento

Relación entre la distancia que recorre el viento y el tiempo que emplea para recorrer esta distancia. Es la rapidez con la que el aire se mueve a través de la

atmósfera terrestre. Esta velocidad varía dependiendo el lugar y el momento en que se mida.

2.2.11 Precipitación

Es el agua líquida o solida que se genera en una nube y cae desde la atmósfera hasta la superficie terrestre.

2.2.12 Radiación global

Es la cantidad total de radiación solar, directa o difusa, que alcanza la superficie terrestre la cual consta de diferentes longitudes de onda como la radiación visible, infrarroja y ultravioleta.

2.2.13 Nivel de Inmisión o calidad del aire

El Gobierno de Aragón (2018) afirma “Calidad del aire o inmisión es la concentración de contaminantes en un punto determinado como consecuencia de las tasas de emisión, así como los fenómenos de dispersión y reacciones químicas en la atmósfera” (p.1). En la normativa ambiental ecuatoriana se define a la calidad del aire como el límite máximo permisible de concentración al nivel del suelo de un contaminante atmosférico en un lugar y tiempo determinado con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.

2.2.13.1. Contaminantes criterio

Son aquellos a los que se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración a nivel del suelo en las normativas ambientales con el fin de proteger la salud humana. En Ecuador, en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Anexo 4: Norma de la Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión se definen los contaminantes criterio del aire ambiente y a continuación se describen aquellos que serán objeto de estudio:

2.2.13.1.1. PM_{10} .

Material particulado considerado grueso formado principalmente por partículas de polvo, suciedad, hollín y humo que son lo suficientemente grandes como para verlas a simple vista. Partículas con diámetros iguales o menores a 10 micrómetros (EPA, 2023).

2.2.13.1.2. $PM_{2.5}$.

Material particulado fino e inhalable formado por material con diámetros iguales o menores a 2.5 micrómetros. Es una mezcla de partículas sólidas y gotas de líquido que se encuentran en el aire.

2.2.13.1.3. Dióxido de Nitrógeno (NO_2).

Se forma a partir de las emisiones resultantes de la quema de combustibles fósiles en automóviles, camiones, autobuses y centrales eléctricas. La exposición a este gas se ha asociado a síntomas respiratorios en niños asmáticos y visitas a emergencias de adultos mayores por enfermedades respiratorias (Comunidad de Madrid, 2018).

2.2.13.1.4. Dióxido de Azufre (SO_2).

Las principales fuentes de emisiones de SO_2 son las centrales eléctricas y demás instalaciones industriales que queman combustibles fósiles. La exposición a este contaminante desemboca en visitas al departamento de emergencias de casas de salud por problemas respiratorios, especialmente en niños y adultos mayores.

2.2.13.1.5. Monóxido de Carbono (CO).

La principal fuente de CO es la quema de combustibles fósiles. Este es un gas incoloro e inodoro que en grandes cantidades resulta perjudicial para la salud humana. Respirar aire con una alta concentración de monóxido de carbono reduce la cantidad de oxígeno en el cuerpo, afectando al corazón y cerebro (EPA, 2013).

2.2.14 Receptores sensibles

Poblaciones, fauna, flora, etc., que se encuentran en sitios o lugares cercanos a una fuente de emisión que requieren de condiciones óptimas en cuanto a la calidad del aire.

2.2.15 Sistemas de control de emisiones atmosféricas**2.2.15.1. Ciclones**

Su funcionamiento se basa en la fuerza centrífuga generada por la rotación del gas emitido alrededor de un eje separando las partículas sólidas suspendidas en el flujo de gas. Estos dispositivos generalmente se instalan como un método previo de control antes de colocar sistemas o dispositivos más efectivos como los

precipitadores electrostáticos o depuradores de Venturi (Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2.2.15.2. Precipitadores electrostáticos

Utilizan campos magnéticos para precipitar, capturar y eliminar partículas suspendidas en los gases de escape de fuentes fijas de emisiones. Estos sistemas se usan cuando se busca una alta eficiencia en la remoción de material particulado. Su mayor aplicación se da en plantas de energía removiendo cenizas de los gases de descarga de las calderas (Theodore, 2008).

2.2.15.3. Lavador Venturi

El lavador tipo Venturi acelera el gas contaminado mediante su “garganta” para aumentar el contacto entre el gas y el líquido de limpieza. La garganta del sistema es un ducto estrecho que aumenta la velocidad y turbulencia del gas. Este tipo de sistema es utilizado principalmente para controlar material particulado y gases altamente solubles. En ocasiones tiene alguna capacidad incidental de control de los Compuestos Orgánicos Volátiles (Theodore, 2008).

2.2.15.4. Adsorción por carbón activado

Es una técnica relativamente simple y económica para la prevención de contaminación atmosférica. Es un sistema utilizado para la recuperación de solventes en estado de vapor mediante la adsorción de contaminantes en su superficie eliminándolos del flujo de gas que pase a través de él (Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2.2.15.5. Absorción

Sistema usado para la eliminación de uno o más contaminantes de una corriente de gas contaminado por medio de tratamiento con un líquido. Se necesita que los contaminantes a eliminar sean solubles en el líquido absorbente no volátil. Esta absorción de un gas por un líquido tendrá lugar si el líquido contiene menos concentración que la de saturación del compuesto gaseoso a extraer (Theodore, 2008).

2.2.15.6. Quemador de gases

Dispositivo de control de emisiones que incinera o quema los gases contaminados antes de ser liberados a la atmósfera. Su fin es destruir o convertir

compuestos contaminantes dentro del flujo de gas en productos menos nocivos para el ambiente. Los quemadores de gases son eficaces para quemar compuestos orgánicos volátiles (COVs) convirtiéndolos en dióxido de carbono y agua (Theodore, 2008).

2.3 Marco legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)

Título II

Derechos

Capítulo II

Derechos del buen vivir.

Sección II

Ambiente Sano.

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (p. 13).

Sección VII

Salud

Art. 32.- La salud es un derecho que garantiza el Estado, cuya realización se vincula al ejercicio de otros derechos, entre ellos el derecho al agua, la alimentación, la educación, la cultura física, el trabajo, la seguridad social, los ambientes sanos y otros que sustentan el buen vivir (p. 17).

Capítulo VII

Derechos de la Naturaleza

Art 71.- La naturaleza de la Pacha Mama, donde se produce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad el cumplimiento de los derechos de la naturaleza (p. 33).

Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de Indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados. En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas (p. 33).

Título VI

Régimen de desarrollo

Capítulo I

Principios Generales

Art. 276.- El régimen de desarrollo tendrá los siguientes objetivos: Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente

y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural (p. 89).

Título VII

Régimen del Buen Vivir

Capítulo II

Biodiversidad y Recursos Naturales

Sección I

Naturaleza y Ambiente

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

1. El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras.
2. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional.
3. El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales.
4. En caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales en materia ambiental, éstas se aplicarán en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza (p. 119).

Art. 396.- El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño. En caso de duda sobre el impacto ambiental de alguna acción u omisión, aunque no exista evidencia científica del daño, el Estado adoptará medidas protectoras eficaces y oportunas. La responsabilidad por daños ambientales es objetiva. Todo daño al ambiente, además de las sanciones correspondientes, implicará también la obligación de restaurar integralmente los ecosistemas e indemnizar a las personas y comunidades afectadas. Cada uno de los actores de los procesos de producción, distribución, comercialización y uso de bienes o servicios asumirá la responsabilidad directa de prevenir cualquier impacto ambiental, de mitigar y reparar los daños que ha causado, y de mantener un sistema de control ambiental permanente. Las acciones legales para perseguir y sancionar por daños ambientales serán imprescriptibles (pp. 119-120).

Art. 397.- En caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca. La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental. Para garantizar el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el Estado se compromete a:

1. Permitir a cualquier persona natural o jurídica, colectividad o grupo humano, ejercer las acciones legales y acudir a los órganos judiciales y administrativos, sin perjuicio de su interés directo, para obtener de ellos la

tutela efectiva en materia ambiental, incluyendo la posibilidad de solicitar medidas cautelares que permitan cesar la amenaza o el daño ambiental materia de litigio. La carga de la prueba sobre la inexistencia de daño potencial o real recaerá sobre el gestor de la actividad o el demandado.

2. Establecer mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales.

3. Regular la producción, importación, distribución, uso y disposición final de materiales tóxicos y peligrosos para las personas o el ambiente (p. 120).

Capítulo II

Sección VII

Biosfera, Ecología Urbana y Energías Alternativas

Art. 414.- El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Art. 14, 32, 71, 72, 276, 395, 396, 397, 414).

2.3.2 Código Orgánico del Ambiente

Título II

Institucionalidad y articulación de los niveles de gobierno en el sistema nacional descentralizado de gestión ambiental

Capítulo II

De las facultades ambientales de los gobiernos autónomos descentralizados

Art. 26.- Facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales en materia ambiental. En el marco de sus competencias ambientales exclusivas y concurrentes corresponde a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales las siguientes facultades, que ejercerán en las áreas rurales de su respectiva circunscripción territorial, en concordancia con las políticas y normas emitidas por la Autoridad Ambiental Nacional:

8) Controlar el cumplimiento de los parámetros ambientales y la aplicación de normas técnicas de los componentes agua, suelo, aire y ruido (p. 19)

Libro Tercero

De la Calidad Ambiental

Título II

Sistema Único de Manejo Ambiental

Capítulo V

Calidad de los componentes abióticos y estado de los componentes bióticos

Art. 191.- Del monitoreo de la calidad del aire, agua y suelo. La Autoridad Ambiental Nacional o el Gobierno Autónomo Descentralizado competente, en coordinación con las demás autoridades competentes, según corresponda, realizarán el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, agua y suelo, de conformidad con las normas reglamentarias y técnicas que se expidan para el efecto. Se dictarán y actualizarán periódicamente las normas técnicas, de conformidad con las reglas establecidas en este Código. Las instituciones competentes en la materia promoverán y fomentarán la

generación de la información, así como la investigación sobre la contaminación atmosférica, a los cuerpos hídricos y al suelo, con el fin de determinar sus causas, efectos y alternativas para su reducción (p. 55).

Art. 193.- Evaluaciones adicionales de la calidad del aire. La Autoridad Ambiental Nacional o el Gobierno Autónomo Descentralizado competente, según corresponda, dispondrán evaluaciones adicionales a las establecidas en la norma a los operadores o propietarios de fuentes que emitan o sean susceptibles de emitir olores ofensivos o contaminantes atmosféricos peligrosos. La norma técnica establecerá los métodos, procedimientos o técnicas para la reducción o eliminación en la fuente de emisiones de olores y de contaminantes atmosféricos peligrosos (p. 55).

Libro IV

Del Cambio Climático

Título II

De La Adaptación Y Mitigación Del Cambio Climático

Capítulo I

Disposiciones Generales Para Las Medidas De Adaptación y Mitigación Del Cambio Climático

Art. 259.- Criterios de las medidas de mitigación. Para el desarrollo de las medidas de mitigación del cambio climático se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

1. Promover patrones de producción y consumo que disminuyan y estabilicen las emisiones de gases de efecto invernadero.
2. Contribuir a mejorar la calidad ambiental para fortalecer la protección y preservación de la biodiversidad, los ecosistemas, la salud humana y asentamientos humanos;
3. Incentivar e impulsar a las empresas del sector público y privado para que reduzcan sus emisiones (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017, p. 68).

2.3.3 Ley Orgánica de la Salud

Título Preliminar

Capítulo I

Del derecho a la salud y su protección.

Art. 1.- La presente Ley tiene como finalidad regular las acciones que permitan efectivizar el derecho universal a la salud consagrado en la Constitución Política de la República y la ley. Se rige por los principios de equidad, integralidad, solidaridad, universalidad, irrenunciabilidad, indivisibilidad, participación, pluralidad, calidad y eficiencia; con enfoque de derechos, intercultural, de género, generacional y bioético (p. 1)

Libro II

Salud y seguridad ambiental

Art. 95.- La autoridad sanitaria nacional en coordinación con el Ministerio de Ambiente, establecerá las normas básicas para la preservación del ambiente en materias relacionadas con la salud humana, las mismas que serán de cumplimiento obligatorio para todas las personas naturales, entidades públicas, privadas y comunitarias. El Estado a través de los organismos competentes y el sector privado está obligado a proporcionar a la población, información adecuada y veraz respecto del impacto ambiental y sus consecuencias para la salud individual y colectiva (p. 18).

Capítulo III

Calidad del aire y de la contaminación acústica

Art. 111.- La autoridad sanitaria nacional, en coordinación con la autoridad ambiental nacional y otros organismos competentes, dictará las normas técnicas para prevenir y controlar todo tipo de emanaciones que afecten a los sistemas respiratorio, auditivo y visual. Todas las personas naturales y jurídicas deberán cumplir en forma obligatoria dichas normas (p. 21).

Art. 112.- Los municipios desarrollarán programas y actividades de monitoreo de la calidad del aire, para prevenir su contaminación por emisiones provenientes de fuentes fijas, móviles y de fenómenos naturales. Los resultados del monitoreo serán reportados periódicamente a las autoridades competentes a fin de implementar sistemas de información y prevención dirigidos a la comunidad (p. 21).

Art. 113.- Toda actividad laboral, productiva, industrial, comercial, recreativa y de diversión; así como las viviendas y otras instalaciones y medios de transporte, deben cumplir con lo dispuesto en las representativas normas y reglamentos sobre prevención y control, a fin de evitar la contaminación por ruido que afecta a la salud humana (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015, p. 21).

2.3.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente

Art. 249.- Tipos y características. - Los ecosistemas pueden proveer varios servicios ambientales y, sin perjuicio de otras definiciones y clasificaciones que la Autoridad Ambiental Nacional expida, se reconocen los siguientes tipos y características de servicios ambientales:

b) Servicios de regulación: los servicios derivados del funcionamiento de los procesos de los ecosistemas, sin pasar por procesos de transformación antrópica, y resultan vitales para la supervivencia del ser humano, tales como los procesos para mantener la calidad del aire, del agua, la fertilidad de los suelos, el control de las inundaciones, de plagas, la polinización de los cultivos, el mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos, captura y almacenamiento de dióxido de carbono, la protección que ofrece el ozono frente a los rayos ultravioleta, entre otros (p. 51).

SECCION 7a.

INCENTIVO A GOBIERNOS AUTONOMOS DESCENTRALIZADOS

Art. 806.- Mejora de indicadores ambientales. - Los Gobiernos Autónomos Descentralizados podrán acceder a financiamiento del Fondo Nacional para la Gestión Ambiental, por la mejora de los indicadores ambientales en sus respectivas jurisdicciones, en el marco del Plan Nacional de Inversiones Ambientales, conforme los siguientes criterios generales:

d) Mejoría de la calidad del aire, agua y suelo (Asamblea Nacional del Ecuador, 2019, p. 175).

2.3.5 Acuerdo Ministerial 097-A

LIBRO VI

ANEXO 4

NORMA DE CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE O NIVEL DE INMISIÓN

Esta norma establece los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes criterio y contaminantes no convencionales, a nivel de suelo en el aire ambiente.

Partículas sedimentables. - La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado ($1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$).

Material particulado menor a 10 micrones (PM₁₀). - El promedio aritmético de la concentración de PM₁₀ de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico ($50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

Material particulado menor a 2.5 micrones (PM_{2.5}). - El promedio aritmético de la concentración de PM_{2.5} de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico ($15 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

Dióxido de azufre (SO₂). - La concentración SO₂ en 24 horas no deberá exceder ciento veinticinco microgramos por metro cúbico ($125 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), la concentración de este contaminante para un periodo de diez minutos no debe ser mayor a quinientos microgramos por metro cúbico ($500 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

Monóxido de carbono (CO). - La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 (ocho) horas, no deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico ($10\,000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) no más de una vez al año. La concentración máxima en (1) una hora de monóxido de carbono no deberá exceder treinta mil microgramos por metro cúbico ($30\,000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) no más de una vez al año.

Ozono. - La máxima concentración de ozono, obtenida mediante muestra continua en un período de (8) ocho horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico ($100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), más de una vez en un año.

Dióxido de nitrógeno (NO₂). - El promedio aritmético de la concentración de Dióxido de nitrógeno, determinado en todas las muestras en un año, no deberá exceder de cuarenta microgramos por metro cúbico ($40 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015, p. 55).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque de la investigación

3.1.1 Tipo y alcance de la investigación

- Investigación documental

Métodos y técnicas de búsqueda, procesamiento y almacenamiento de la información encargadas de recopilar y seleccionar información en base a lectura de libros, documento, revistas, periódicos. bibliografías, entre otros (Tancara, 1988). La data meteorológica, los parámetros de la fuente y el consumo de combustible de las centrales termoeléctricas serán obtenidos mediante investigación documental.

- Investigación exploratoria

Utilizada para estudiar problemas que no están definidos en su totalidad y se buscar comprenderlos de mejor manera sin proporcionar resultados concluyentes (Hernández et al., 2010). No existen registros previos de calidad del aire en el cantón Lago Agrio, en consecuencia, el presente trabajo pretende familiarizar el tema con la sociedad en busca de estudios más profundos y detallados.

- Investigación cuantitativa

Recolecta y analiza data numérica para identificar promedios, tendencias, comprobar relaciones entre variables y obtener resultados generales (Hernández et al., 2010). Los datos numéricos obtenidos por revisión documental serán tabulados para un mejor manejo e introducción al software especializado. Se obtendrán valores de concentraciones de contaminantes a nivel del suelo posterior a la simulación.

3.1.2 Diseño de investigación

El presente proyecto es no experimental.

3.2 Metodología

3.2.1 Variables

3.2.1.1. Variable independiente

- Consumo de combustible (galones).
- Emisiones de contaminantes atmosféricos (g/s).
- Altura y diámetro de las fuentes de emisión (m).

- Velocidad de salida de los gases contaminantes de las fuentes de emisión (m/s).
- Temperatura de los gases contaminantes de las fuentes de emisión (K).
- Coordenadas de las fuentes de emisión (UTM WGS84).
- Temperatura ambiente (°C).
- Humedad relativa (%)
- Presión atmosférica (mbar).
- Dirección del viento (deg).
- Velocidad del viento (m/s).
- Precipitación (mm).
- Radiación global (W/m²).
- Año del periodo de estudio
- Numero de centrales termoeléctricas operativas por año de estudio

3.2.1.2. Variable dependiente

- Niveles de inmisiones o calidad del aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.2.2 Tratamientos

Debido a que el presente proyecto es no experimental, no tiene tratamientos.

3.2.3 Diseño experimental

El presente proyecto es no experimental.

3.2.4 Recolección de datos

3.2.4.1. Recursos

Para el desarrollo de este proyecto se hará uso de softwares e información digital, entre los que tenemos:

Tabla 2.
Recursos necesarios para el desarrollo del proyecto

Recursos	Descripción	Enlace de descarga/consulta
Software AERMOD View	Paquete de modelado de dispersión de aire completo y potente que incorpora a la perfección el modelo regulatorio de dispersión de aire preferido de la EPA de EE. UU. en una interfaz robusta y fácil de usar.	https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/aermod-view/

Recursos	Descripción	Enlace de descarga/consulta
Data meteorológica	Datos meteorológicos de entrada para la simulación de dispersión en AERMOD View. La información será descargada de forma anual por cada año del periodo de estudio.	https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/
Data de combustibles	Tipos y cantidad de combustibles quemados por las centrales termoeléctricas anualmente. La información será obtenida de manera anual por cada año del periodo de estudio.	https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/estadisticas-del-sector-electrico-ecuatoriano-buscar/
Data de parámetros de las fuentes	Parámetros estándar de las fuentes de emisiones. Estos datos son fijos para cada fuente de emisión y serán obtenidos en una sola ocasión.	https://www.cmascenter.org/smoke/documentation/4.5/html/ch08s09s03.html#t

Elaborado por: El Autor, 2024

3.2.4.2. Métodos y técnicas

Identificación de la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas del cantón Lago Agrio para la estimación de las emisiones de los contaminantes criterio mediante la metodología de factor de emisión

Se realizó una exhaustiva revisión de la información disponible para la identificación de las centrales termoeléctricas en el área urbana de la provincia de Sucumbíos y se constató la operatividad de las centrales identificadas. Una vez verificada la información se elaboró un mapa base de todas las centrales identificadas para comprender su distribución en el área de estudio. Con ayuda de las estadísticas del sector eléctrico publicadas anualmente se determinó y tabuló la cantidad y tipo de combustibles consumidos anualmente por cada una de las centrales termoeléctricas identificadas en el cantón Lago Agrio.

Posterior a eso se estimaron las emisiones de las centrales termoeléctricas con el método de factor de emisión. Este relaciona la cantidad de contaminante emitido y la unidad de actividad que genera la emisión, en este caso la quema de combustibles por parte de las centrales termoeléctricas para la generación de energía eléctrica. La ecuación general para la estimación de emisiones con esta técnica es:

$$E = A * FE * \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Donde:

E = emisiones del contaminante,

A = factor de actividad,

FE = factor de emisión de la actividad,

ER = eficiencia global de reducción de emisiones,

El estudio consideró que no existen dispositivos de control de emisiones en las fuentes, por ello la ecuación previa toma la siguiente forma:

$$E = A * FE$$

El valor de A representa el combustible consumido por las centrales termoeléctricas para su funcionamiento, y se obtuvo de los informes anuales de estadísticas del sector eléctrico de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables.

Los factores de emisión para la actividad en cuestión fueron obtenidos del documento AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA). En la tabla 3 se muestran los factores de emisión identificados y que fueron aplicados para el cálculo de emisiones, según el combustible, procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas.

Tabla 3.
Factores de emisión a utilizarse en el cálculo de emisiones

Combustible	Unidad	SO ₂	NO ₂	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}
Fuel Oil No. 2: Diesel	lb del contaminante /10 ³ Gal	99.4	24	5	1	0.25
Fuel Oil No. 4: Residuo de Fuel Oil	lb del contaminante /10 ³ Gal	225	47	5	6.02	3.92
Fuel Oil No. 6: Crudo Residual	lb del contaminante /10 ³ Gal	392.5	47	5	15.1	9.84
Gas Natural	lb del contaminante/ 10 ⁶ kpc	0.6	280	84	1.9	5.7

Combustible	Unidad	SO ₂	NO ₂	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}
GLP	lb del contaminante /10 ³ Gal	185	13	7.5	0.2	0.5
Carbón	lb del contaminante /Toneladas	20.28	9	0.6	5.95	

Fuente: U.S. EPA, 1995.

Elaborado por: El Autor, 2024

Una vez estimadas las emisiones de los contaminantes criterio se tabularon para su uso en el software de modelado de la dispersión. Los contaminantes criterio se detallaron en la sección Contaminantes criterio. En el presente estudio solo se han considerado las emisiones por combustión y no del proceso.

Para el correcto análisis del total de combustible consumido por las centrales termoeléctricas en estudio, se transformaron los galones de combustible consumido a Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP). Por ello en la tabla 4 se presentan las equivalencias en TEP de los diferentes combustibles consumidos por las centrales.

Tabla 4.

Equivalencias de combustibles a toneladas equivalente de petróleo (TEP)

Combustible	Unidad	Equivalencia (TEP)
Diesel	gal	0.0033
Crudo	gal	0.0034
Gas natural	kpc	0.02228
Fuel Oil	gal	0.0034
GLP	gal	0.00221

Fuente: Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 2015)

Elaborado por: El Autor, 2024

Aplicación del modelo de dispersión de contaminantes de AERMOD View para la determinación de las concentraciones de los contaminantes criterio a nivel del suelo en el cantón Lago Agrio

AERMOD View necesita parámetros de entrada para realizar el modelamiento de las concentraciones de los contaminantes criterio debido a las emisiones de las centrales termoeléctricas, estos son: los parámetros operacionales y físicos de la fuente, los datos meteorológicos y topográficos de la zona. Los datos meteorológicos anuales de la zona fueron descargados del

geoportal climático NASA-POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) y la información topográfica obtenida del procesador de terreno AERMAP, perteneciente al modelo AERMOD.

Los parámetros físicos y operacionales de la fuente se obtuvieron de los valores estandarizados para calderas de combustión externa-industrial. En la tabla 5 se detallan los parámetros estandarizados por la U.S. EPA.

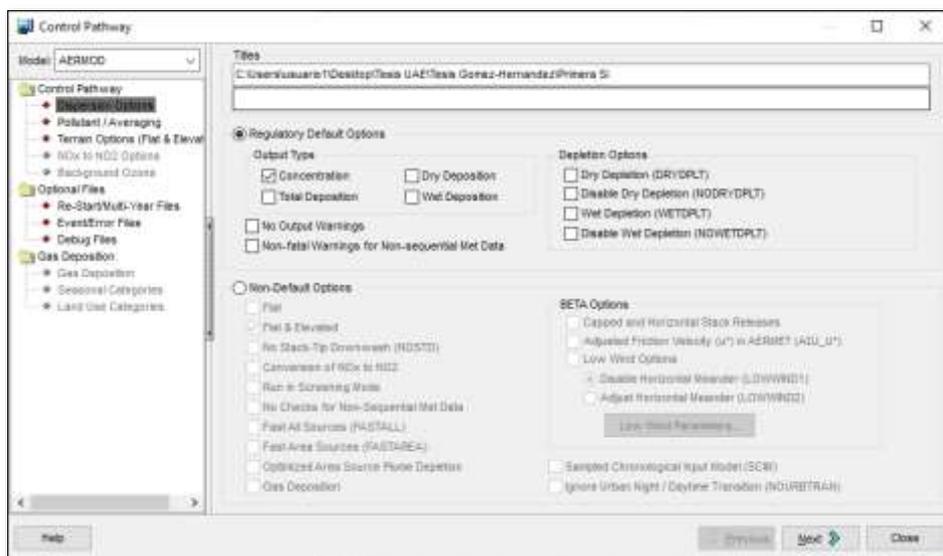
Tabla 5.
Parámetros estándar de las fuentes de emisión

Descripción	Combustible	Altura (m)	Diámetro (m)	Temperatura (K)	Velocidad (m/s)
Calderas de combustión externa – industria	Diesel	17.59	2.93	637.5	19.78
	Residuo Fuel oil	19.29	0.98	469	8.84
	Crudo residual	29.17	1.46	485.6	9.42
	Gas Natural	26.85	1.49	464.2	9.33
	GLP	21.12	1.28	497.8	5.15
	Carbón	31.18	1.62	471.2	10.94

Fuente: Sistema de Análisis y Modelado Comunitario (CMAS, 2015)
Elaborado por: El Autor, 2024

Una vez definidos los datos de entrada del modelo, se detallaron las opciones de dispersión, los contaminantes a modelar y los periodos de tiempo del modelado en la ventana de control (*Control Pathway*) del software, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 2.
Ventana de control de AERMOD



Fuente: AERMOD View 9.0.0, Lakes Environmental

Los parámetros operacionales y físicos (tasa de emisión, temperatura de salida de gases en chimenea, velocidad de los gases, ubicación y diámetro de la chimenea) de las fuentes son requeridos por el modelo de dispersión de AERMOD y se ingresaron en la ventana de datos de las fuentes, como se muestra en la figura 3.

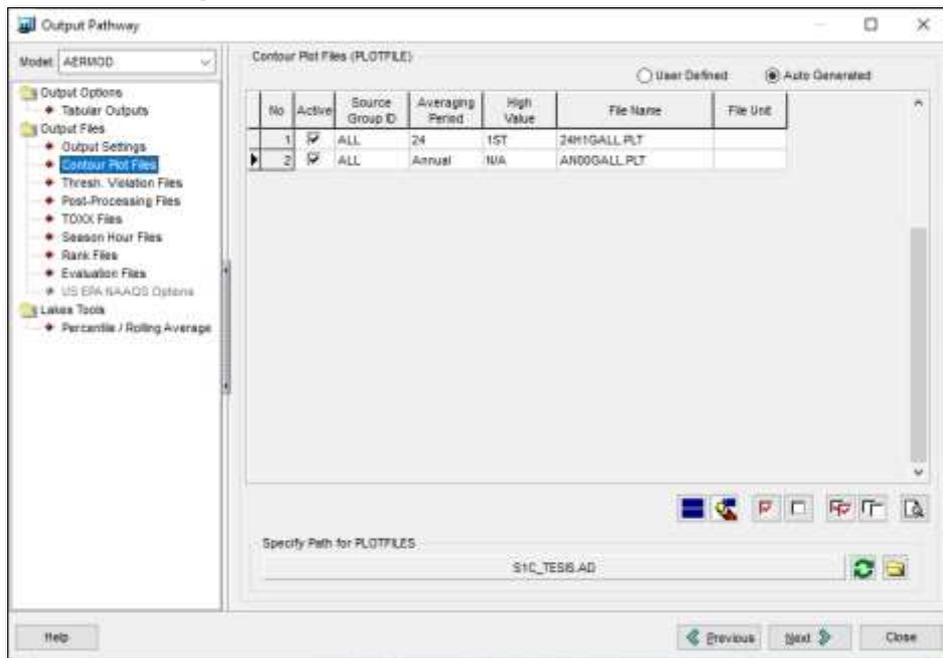
Figura 3.
Ventana de datos de las fuentes



Fuente: AERMOD View 9.0.0, Lakes Environmental

Los datos meteorológicos se añadieron por medio de dos archivos (en el Apéndice N° 1 se muestran los promedios anuales de los parámetros utilizados), uno contiene la información meteorológica de superficie (Surface Met Data) y el otro el perfil meteorológico (Profile Met Data) de la zona. Las características del terreno se seleccionaron dentro de AERMAP de acuerdo con las condiciones topográficas de la zona de modelización. Finalmente, en la ventana de opciones de salida (*Output Pathway*) (ver figura 4) se seleccionaron los archivos de salida para los periodos en donde se desea conocer las concentraciones de los contaminantes criterio en estudio.

Figura 4.
Ventana de opciones de salida



Fuente: AERMOD View 9.0.0, Lakes Environmental

Elaboración de una propuesta con medidas de control para las emisiones generadas por las centrales termoeléctricas en aquellos puntos con receptores sensibles donde se superen los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A

Mediante revisión bibliográfica y criterio técnico se identificaron los receptores sensibles existentes en el área urbana del cantón Lago Agrio, puntos donde se observaron los niveles de inmisión para compararlos con los límites máximos permisibles definidos en la normativa ambiental ecuatoriana vigente.

En Ecuador, los límites máximos permisibles de contaminantes criterio se encuentran descritos en el Acuerdo Ministerial 097 – A: Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión. A continuación, se presentan los límites de los contaminantes criterios que se abarcan en el presente proyecto:

Tabla 6.
Límites máximos permisibles de nivel de inmisiones

Contaminante Criterio	Límites Máximos Permisibles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	24 horas	1 año	8 horas	1 hora
PM ₁₀	100	50	-	-
PM _{2.5}	50	15	-	-
Dióxido de Nitrógeno NO ₂	-	40	-	200
Dióxido de Azufre SO ₂	125	60	-	-
Monóxido de Carbono CO	-	-	10 000	30 000

Fuente: Acuerdo Ministerial 097- A, 2015

Elaborado por: El Autor, 2024

Una vez estimada y comparada con la normativa las concentraciones de los contaminantes en los puntos con receptores sensibles se analizó la incidencia de las termoeléctricas cercanas y se sugirieron sistemas o medidas de control de emisiones para las fuentes fijas que representan las centrales en la zona de estudio. Las medidas de control serán sugeridas y descritas en el formato de fichas, ver anexos, tabla 11.

3.2.5 Análisis estadístico

En el presente proyecto de titulación se utilizó estadística descriptiva, aplicando la media aritmética para la observación del comportamiento el consumo de combustible anual por las centrales termoeléctricas y máximos y mínimos en las concentraciones de los contaminantes estimadas por el modelo. Todas las fórmulas que se utilizaron en la investigación fueron elaboradas y aplicadas en el software de Excel.

Media Aritmética

Se utilizó la media para promediar los datos de combustibles consumidos por las centrales termoeléctricas a lo largo de los diez años de estudio.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

Donde:

\bar{X} = Media Aritmética

$X_1 + X_2 + \dots + X_n$ = Son los valores individuales en el conjunto de datos

n = Es el número total de valores en el conjunto de datos

4. RESULTADOS

4.1 Identificación de la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas del cantón Lago Agrio para la estimación de las emisiones de los contaminantes criterio mediante la metodología de factor de emisión

En el país existen tres tipos de tecnologías de combustión en el Ecuador para las centrales termoeléctricas, como turbogas, turbovapor y MCI (Motor de combustión interna), siendo esta última la tecnología que utiliza las centrales de nuestro estudio. Con ayuda de los informes de Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano generados por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) se determinaron las centrales termoeléctricas operativas en el área urbana del cantón Lago Agrio entre 2013 – 2022, el tipo y cantidad de combustible utilizado para su funcionamiento en la generación eléctrica. La tabla 7 muestra las centrales termoeléctricas identificadas, su ubicación y la potencia nominal a la que operan.

Tabla 7.

Coordenadas de ubicación de las centrales termoeléctricas identificadas en el área urbana de Lago Agrio

Central Termoeléctrica	Subtipo de Central	Potencia Nominal (MW)	Este	Norte
Amazonas	MCI	6.6	287078	10011409
Celso Castellanos	MCI	10	289951	10012532
Frontera	MCI	2.46	291328	10009261
Lago Agrio	MCI	13.8	291104	10008693
Tapi	MCI	5.21	292973	10008324

Nota: Coordenadas en WGS084-UTM 18S

Elaborado por: El Autor, 2024

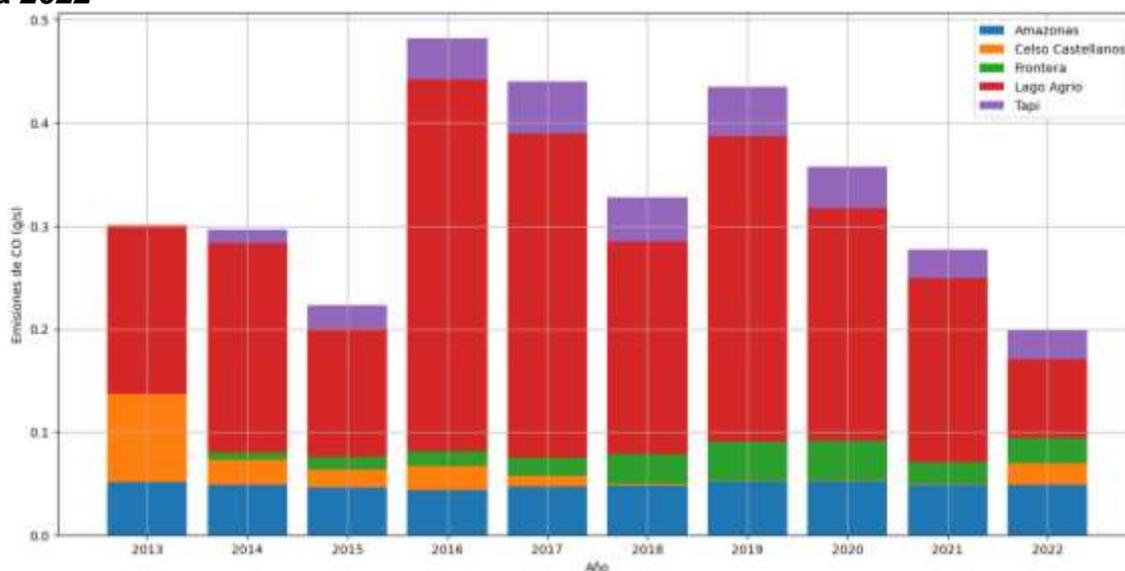
Durante el período de diez años, cinco centrales termoeléctricas estuvieron operativas, con la excepción de las centrales Frontera y Tapi, de las que no se dispone de registros de operación en el año 2013. En la figura 22 se puede apreciar la ubicación geográfica de las centrales termoeléctricas identificadas dentro del cantón Lago Agrio.

Las emisiones de contaminantes criterio (ver anexos, tabla 14) se estimaron a lo largo del período de estudio utilizando la cantidad de combustible consumido

por las centrales termoeléctricas (ver anexos, tabla 12) y los factores de emisión correspondientes.

La figura 5 muestra las emisiones de monóxido de carbono (CO) en g/s para cinco centrales termoeléctricas entre 2013 y 2022. Se puede observar que la mayor emisión se produjo en 2016, con una tasa estimada de 0.482 g/s, siendo la central de Lago Agrio la principal contribuyente, seguido de Amazonas y Tapi. Este incremento en 2016 refleja un aumento considerable respecto a los años anteriores. Por otro lado, en 2022 se registraron las menores emisiones de CO, con una tasa estimada de 0.2 g/s, marcando una disminución significativa desde 2016. La reducción en las emisiones es notable a partir de 2020. Las centrales de Lago Agrio y Tapi continúan siendo las principales fuentes de emisiones, pero su contribución disminuye a lo largo del período. G/s

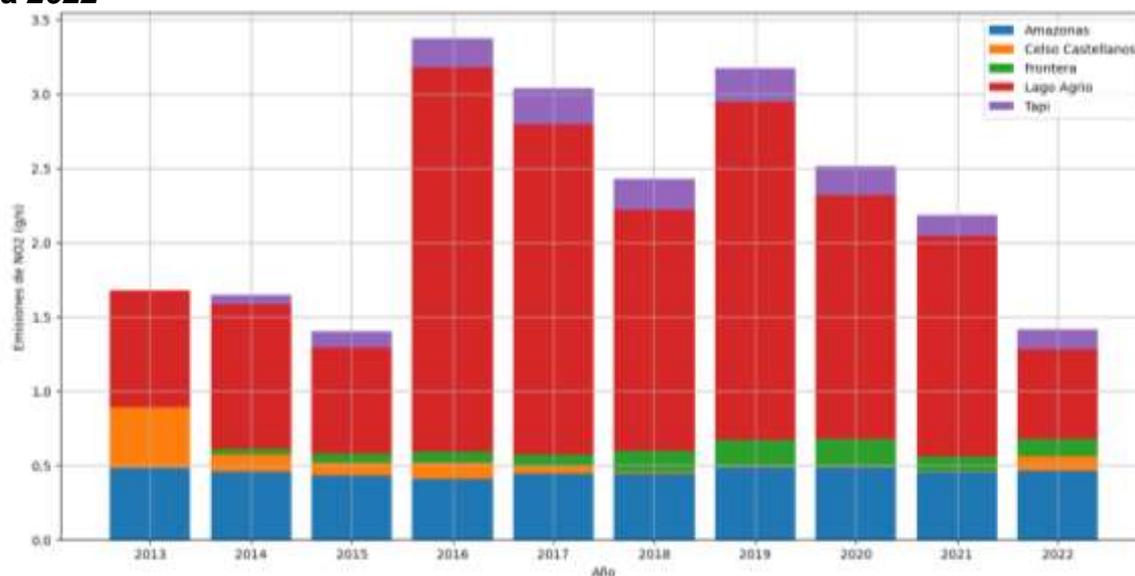
Figura 5.
Emisiones de monóxido de carbono (CO) por central termoeléctrica de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

En cuanto a las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂), se observa un comportamiento similar al de las emisiones de CO, ya que están estrechamente ligadas al consumo de combustibles fósiles, especialmente al diésel y el crudo. En 2016 se estimó la mayor tasa de emisión de NO₂ con 3.37 g/s, mientras que en 2015 se produjo la menor cantidad de emisiones de este contaminante con 1.4 g/s. Al igual que con el CO, la central Lago Agrio es la que más aporta al total de emisiones de NO₂ en el área de estudio, esto se lo puede apreciar en la figura 6.

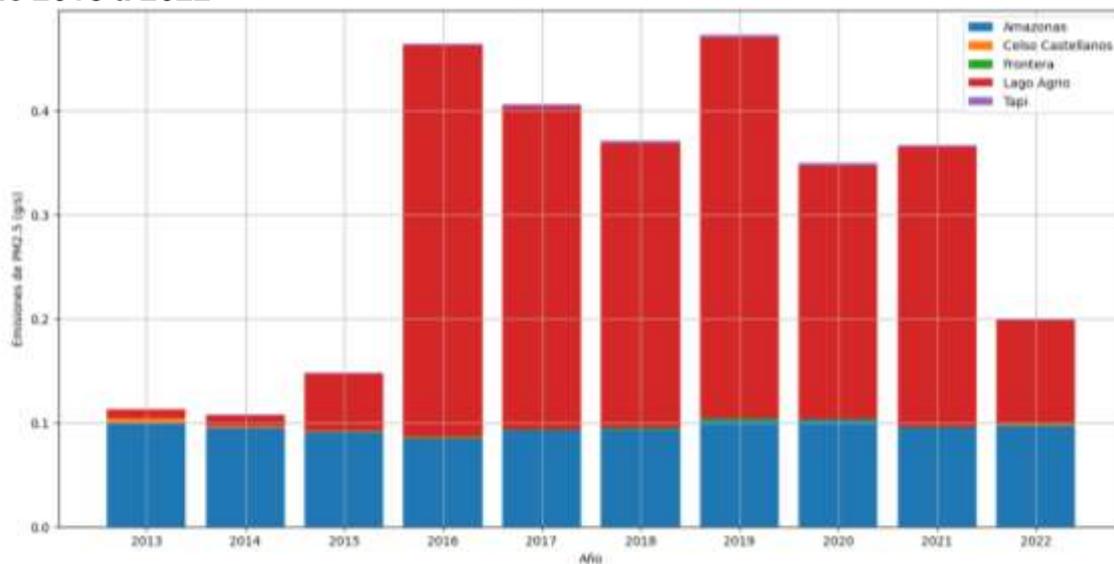
Figura 6.
Emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2) por central termoeléctrica de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

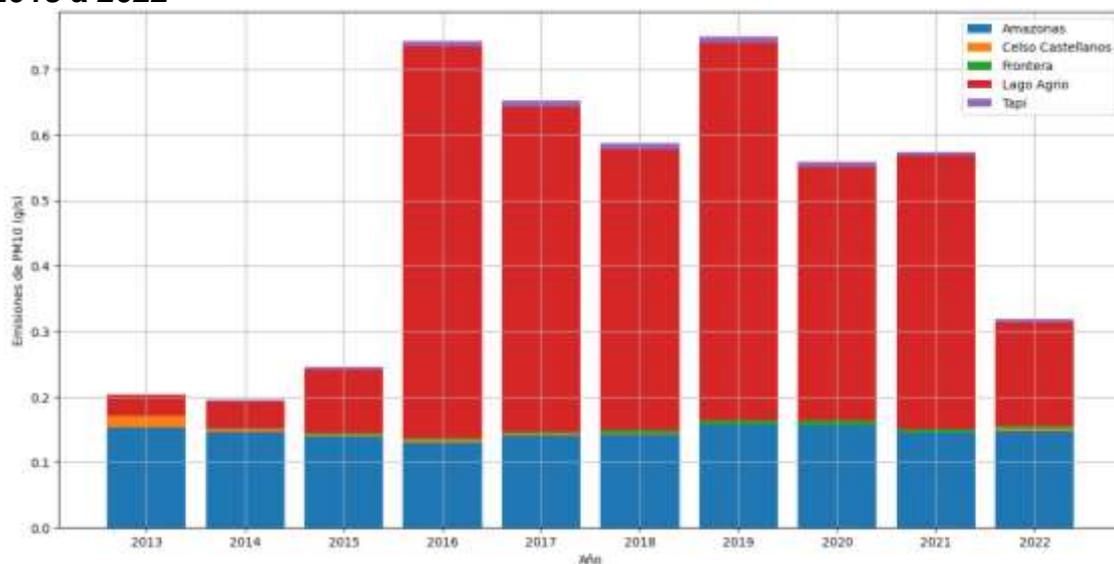
La figura 7 y figura 8 muestran las tasas de emisiones de material particulado grueso (PM_{10}) y fino ($\text{PM}_{2.5}$) para las centrales termoeléctricas durante el periodo 2013-2022. Se observa una tendencia clara en la que las emisiones de estos contaminantes varían significativamente a lo largo del tiempo, influenciadas en gran medida por el consumo de combustibles de las centrales. En el año 2019 se estimaron las mayores tasas de emisiones para ambos contaminantes. Para PM_{10} , la tasa de emisión alcanzó 0.75 g/s, mientras que para $\text{PM}_{2.5}$ fue de 0.47 g/s. Por otra parte, las menores tasas de emisiones se estimaron en el año 2014, con 0.19 g/s de PM_{10} y 0.11 g/s de $\text{PM}_{2.5}$. La central Lago Agrio es la que más aporta a la tasa de emisión de material particulado desde 2016 hasta 2022.

Figura 7.
Emisiones de material particulado grueso (PM_{10}) por central termoeléctrica de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

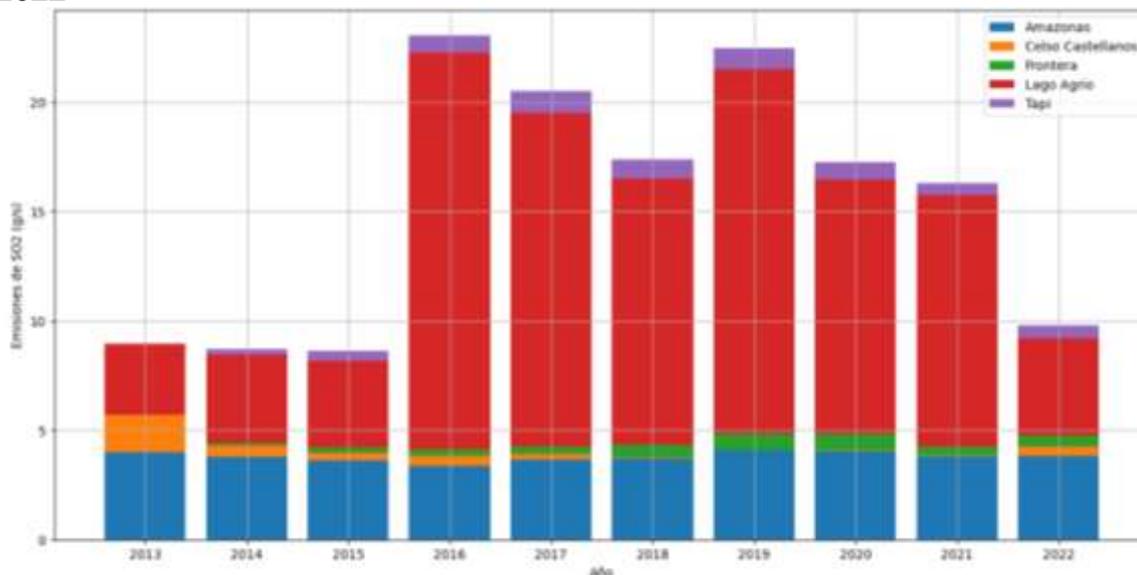
Figura 8.
Emisiones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) por central termoeléctrica de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

En la figura 9 se puede observar que en 2016 se emitieron 23.05 g/s de SO_2 , la mayor cantidad de emisión de dióxido de azufre. La menor cantidad de estas emisiones sucedió en el año 2015 con 8.63 g/s. La central termoeléctrica Lago Agrio es la que más emite este contaminante.

Figura 9.
Emisiones de dióxido de azufre (SO₂) por central termoeléctrica de 2013 a 2022

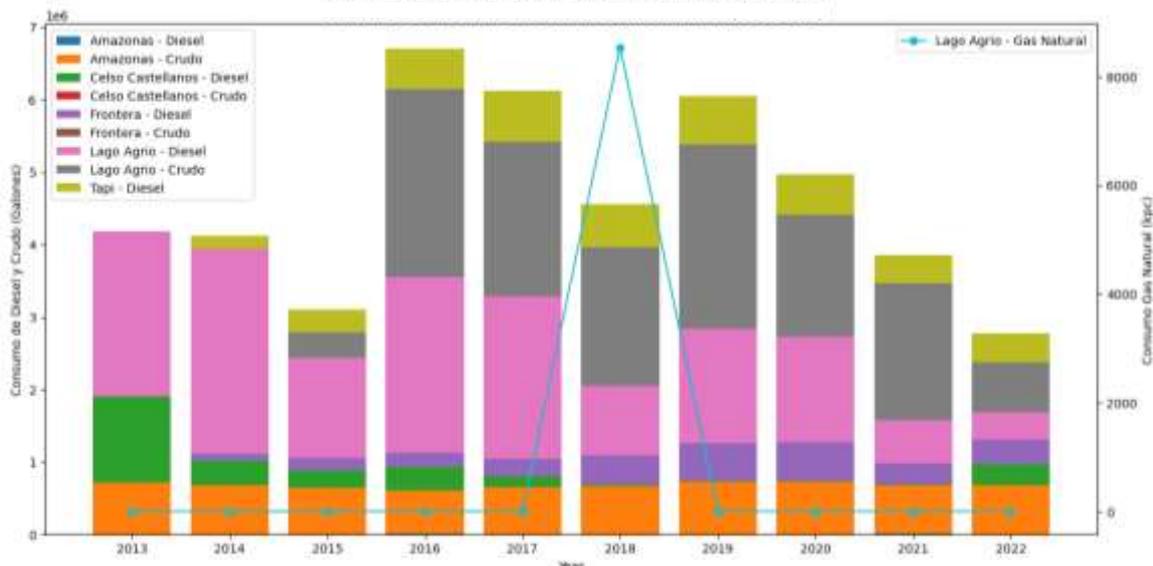


Elaborado por: El Autor, 2024

La figura 10 muestra el consumo de combustibles de cada una de las centrales en los años del periodo de estudio, incluyendo diésel, crudo y gas natural. El consumo de combustible está directamente relacionado con las emisiones de los contaminantes criterio analizados en este proyecto de investigación: SO₂, NO₂, CO, PM₁₀ y PM_{2.5}. Los años 2016 y 2019 destaca como el periodo de mayor consumo de crudo alcanzando una cantidad de 3193.83 y 3272.83 kgal respectivamente, años donde se estimaron las mayores emisiones de SO₂ (23.05 g/s), NO₂ (3.37 g/s) y CO (0.482 g/s) en 2016 y PM₁₀ (0.75 g/s) y PM_{2.5} (0.47 g/s) en 2019.

El crudo tiene un alto contenido de azufre, partículas y compuestos que, al ser quemados, generan emisiones que impactan significativamente la calidad del aire. Este aumento en las emisiones de está estrechamente relacionado con este alto consumo de crudo sobre todo en los periodos antes mencionados.

Figura 10.
Combustible consumido por las centrales termoeléctricas de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

Del total de combustible consumido por las centrales termoeléctricas la cantidad de diésel fue superior en 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, mientras que, en 2018, 2019 y 2021 se consumió el crudo en mayor cantidad comparado con el consumo del otro combustible. El consumo de crudo incrementó desde el año 2016 hasta 2021, ocasionando el incremento de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), debido que el crudo contiene mayor cantidad de azufre (ver figura 9).

Lago Agrio fue la central que más combustibles consumió en los diez años de estudio, por ello es la que más aporta a las tasas de emisiones de los contaminantes criterio evaluados. Es importante destacar que el tipo de combustible influye en la cantidad de emisiones, la introducción del gas natural para la central Lago Agrio representa un esfuerzo para reducir las emisiones, ya que este combustible es menos dañino que el diésel o crudo como lo evidencia sus factores de emisiones. Sin embargo, el uso de gas natural fue mínimo y no tuvo un impacto significativo en la reducción general de emisiones durante el periodo evaluado.

El menor consumo de combustibles por parte de las centrales termoeléctricas se observó en 2014, 2015, 2021 y 2022, año en el que se aprecian las menores tasas de emisión de CO (2022), SO₂ y NO₂ (2015), PM₁₀ y PM_{2.5}

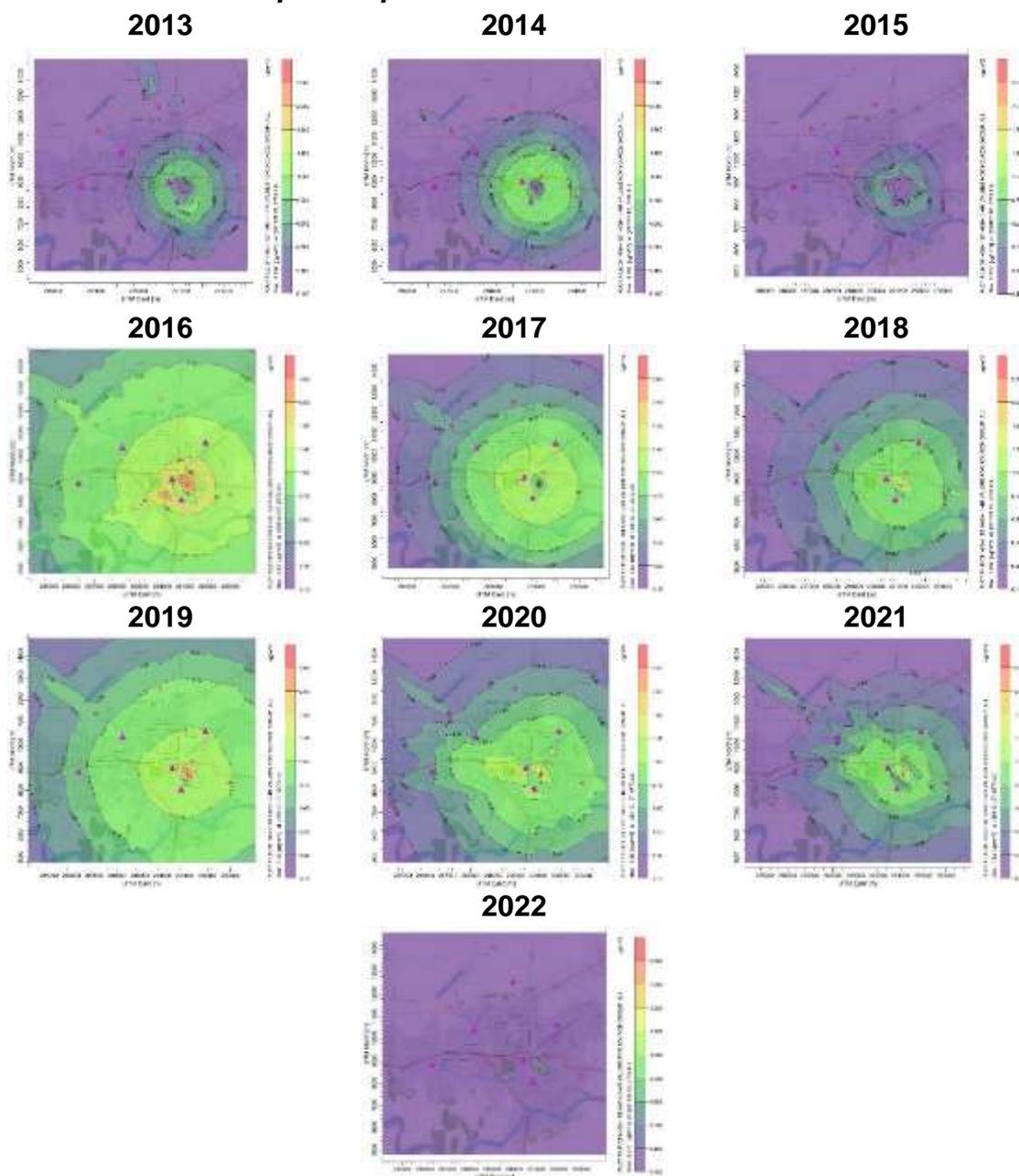
(2014). Si bien 2021 se encuentra entre estos periodos de menor consumo, ningún contaminante presentó su menor tasa de emisión en este año debido a que se quemó más crudo que diésel generando más contaminantes que en 2014, 2015 y 2022. Esto resalta el impacto ambiental que tiene el uso de estos combustibles fósiles en las centrales termoeléctricas, y subraya la importancia de implementar medidas de eficiencia energética y control de emisiones.

4.2 Aplicación del modelo de dispersión de contaminantes de AERMOD View para la determinación de las concentraciones de los contaminantes criterio a nivel del suelo en el cantón Lago Agrio

Para un correcto análisis y cálculo del total de combustible consumido por año, los galones de los diferentes combustibles se convirtieron a Toneladas Equivalentes de petróleo (TEP) y el sistema de coordenadas utilizado es WGS-84 con proyección UTM 18S.

En la figura 11 se presenta las simulaciones del monóxido de carbono (CO) para un periodo de 1 hora con la misma escala de colores para todos los años. Las mayores concentraciones de contaminante se presentaron entre 2016 y 2021, alcanzando concentraciones de $3.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016 en las coordenadas (291121,10008770) del área urbana. El año donde se presentaron las menores concentraciones de monóxido de carbono en el área urbana del cantón Lago Agrio fue en 2015, en las coordenadas (290121,10008770) con un máximo de $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido por 2022 con concentraciones que llegaron hasta los $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ubicación (291121,10008770), zona noroeste del área de estudio.

Figura 11.
Simulaciones de CO para el periodo de 1 hora de 2013 a 2022

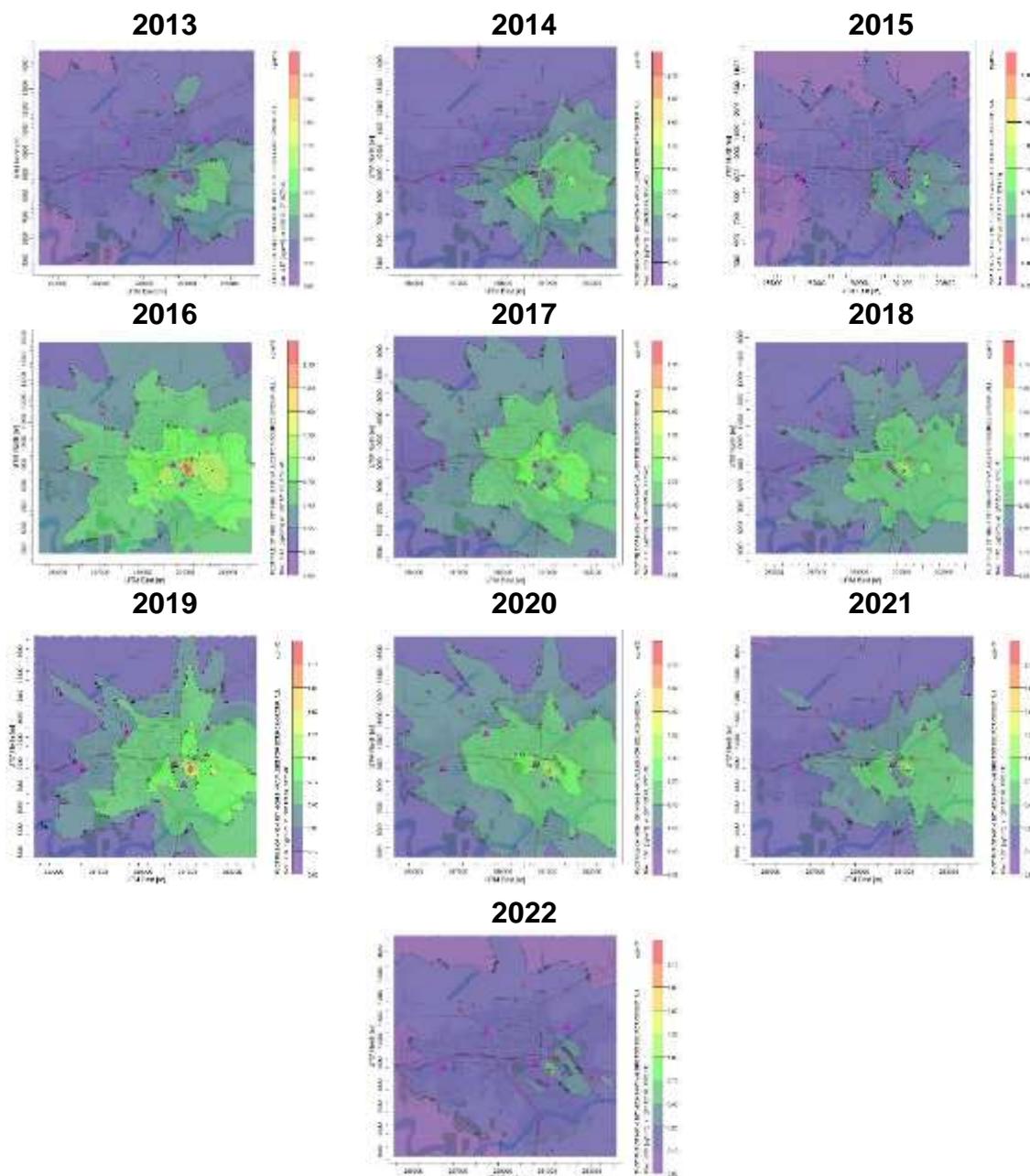


Elaborado por: El Autor, 2024

Como se aprecia en la figura 12 para el periodo de ocho horas, la mayor dispersión de monóxido de carbono se dio en el periodo 2016 a 2020. La máxima concentración se presentó en 2016, alcanzó $2.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (291121,10008770) cerca de la Central Lago Agrio. Los niveles bajos de dispersión se dieron en los años 2015 y 2022 con concentraciones máximas de $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 en el punto (292121,10008770). En todo el periodo de estudio las

concentraciones más bajas de CO se presentaron en la zona oeste y noroeste del área urbana en cuestión.

Figura 12.
Simulaciones de CO para el periodo de 8 horas de 2013 a 2022



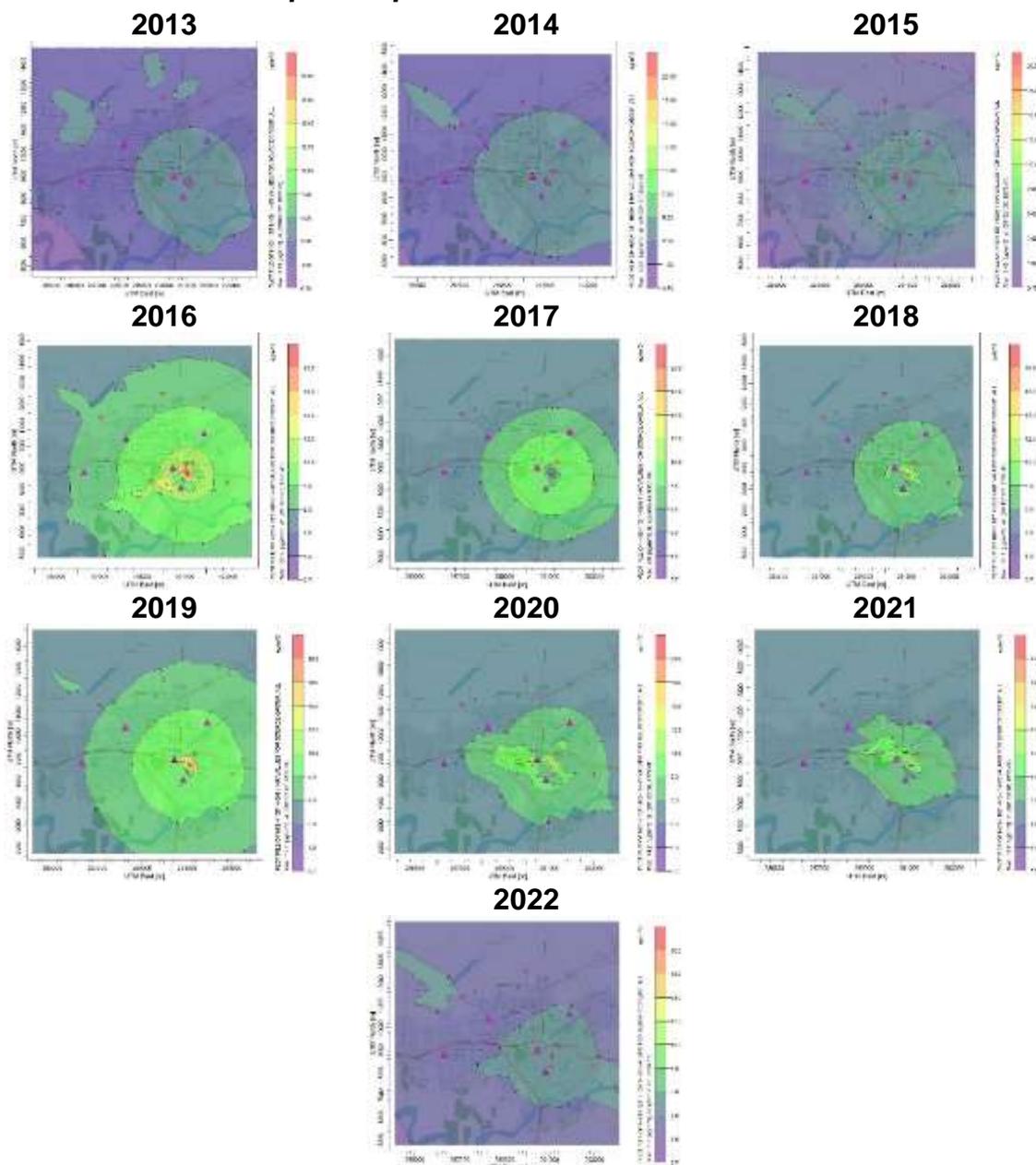
Elaborado por: El Autor, 2024

La figura 13 muestra las concentraciones estimadas de dióxido de nitrógeno (NO_2) para una hora a lo largo del periodo de estudio. Los más altos niveles de contaminación producto de las actividades de las centrales termoeléctricas se produjeron en los años 2016 a 2021 con máximas concentraciones en 2016 de 22.5

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (291121,10008770) zona centro-este del área de estudio y mínimas de $3.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al noroeste de las fuentes. En los años 2013 a 2015 y 2022 se presentó la menor dispersión del contaminante alcanzando valores máximos de $3.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 en el punto (291621,10008270) y mínimos de $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la periferia del área de interés.

Figura 13.

Simulaciones de NO_2 para el periodo de 1 hora de 2013 a 2022

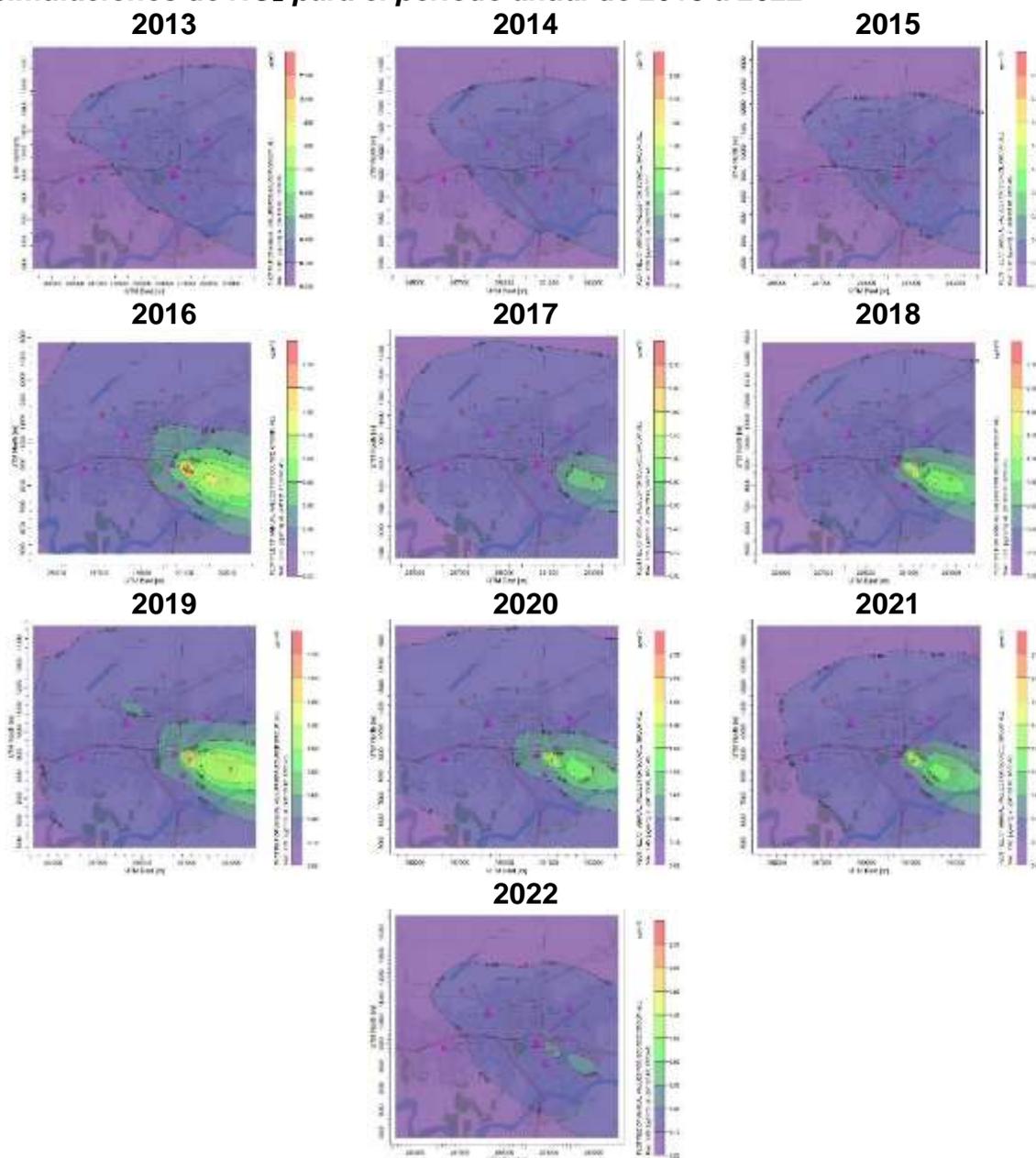


Elaborado por: El Autor, 2024

Los resultados de la simulación anual para el dióxido de nitrógeno se muestran en la figura 14. En el año 2016 se obtuvieron las máximas

concentraciones del contaminante llegando a $2.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (291121,10008770) del área de estudio. Las concentraciones más bajas se observaron en el año 2015 con $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (292621,10008270), seguido por 2013 y 2014 con $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en ambos periodos de tiempo en las ubicaciones (287121,10011270) y (292121,10008770) respectivamente. De 2016 a 2021 se presentaron mayores niveles del contaminante, especialmente del centro hacia el sureste en el área de estudio.

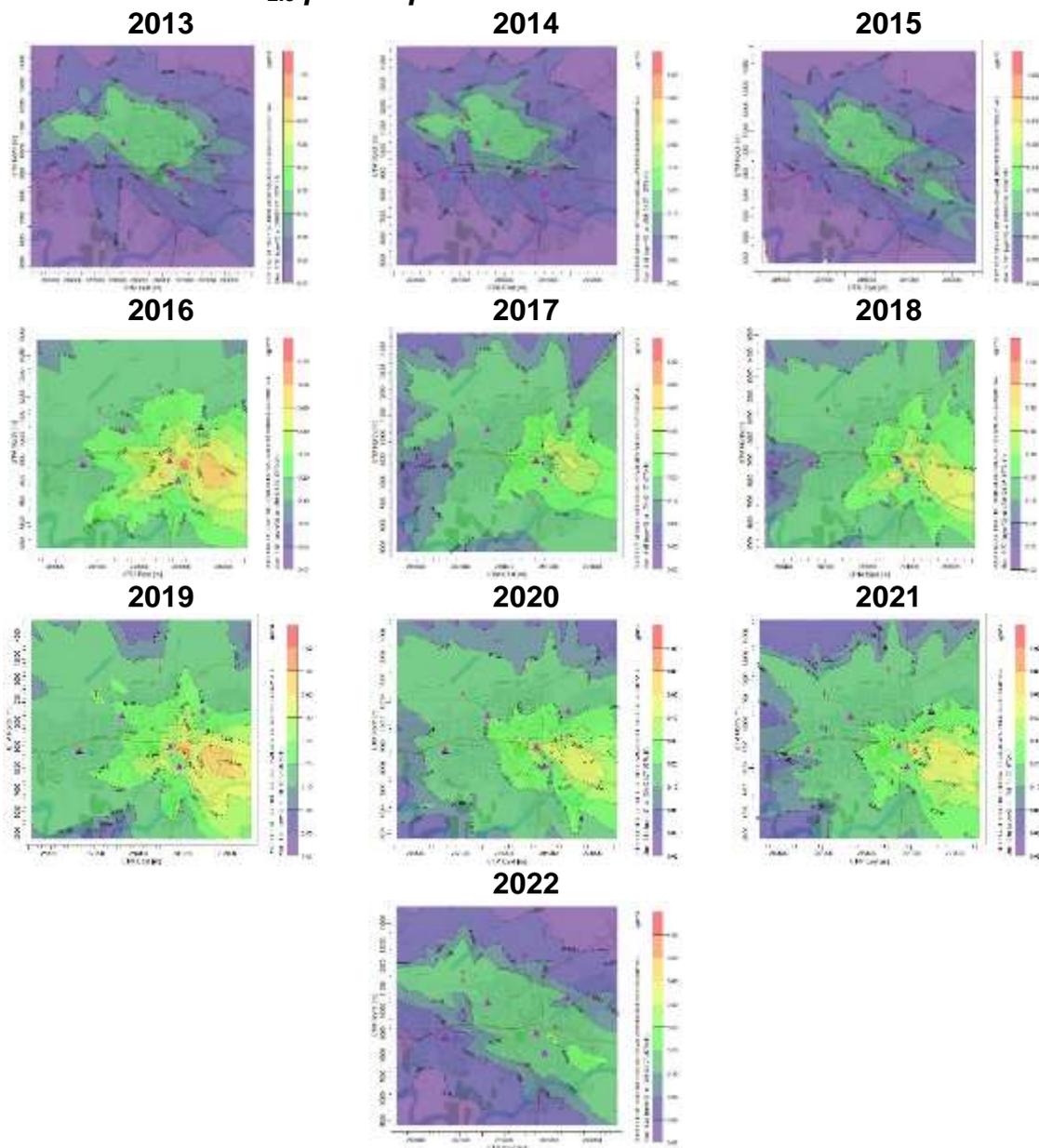
Figura 14.
Simulaciones de NO_2 para el periodo anual de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

A continuación, en la figura 15 se presentan los resultados de la simulación de material particulado ($PM_{2.5}$) para el periodo de 24 horas. Las concentraciones máximas del contaminante se dieron en 2016 y 2019, llegando a $1.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (291121,10008770) en ambos periodos de simulación. La mayor dispersión de contaminante se produjo en el periodo antes mencionado en la zona centro y sureste del área de estudio. En 2014 y 2015 se obtuvieron las concentraciones más bajas de $PM_{2.5}$ para el periodo de estudio, con un máximo de $0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (288121,10010770) para 2014 y (288254,10010397) en el 2015.

Figura 15.
Simulaciones de $PM_{2.5}$ para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022

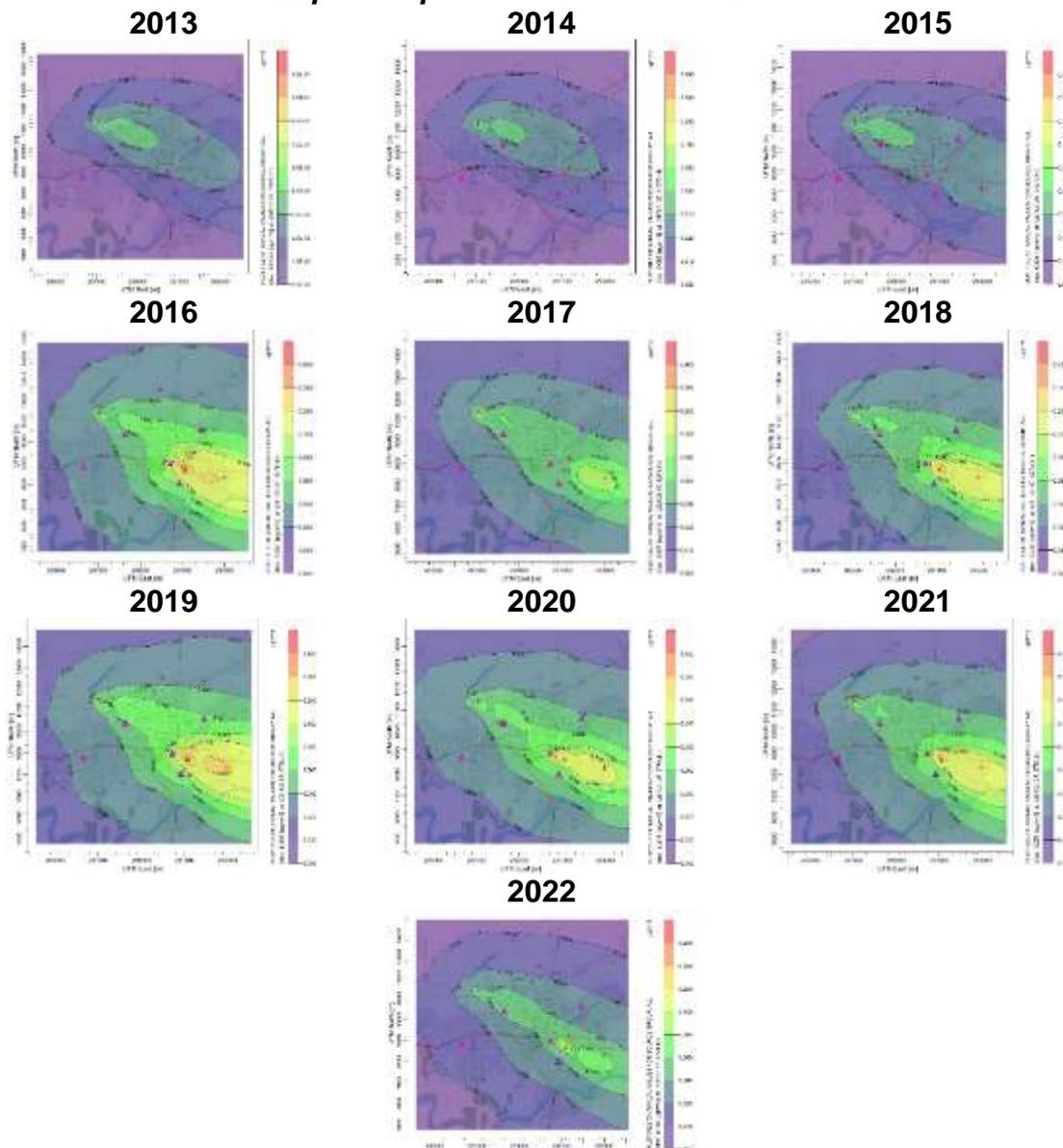


Elaborado por: El Autor, 2024

En la figura 16 se muestran los resultados para material particulado ($PM_{2.5}$) simulado de forma anual. En los tres primeros años del periodo de estudio se produjeron las menores concentraciones de contaminante llegando a un máximo de $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (287121,10011270). En este lapso y en 2022 se produjo la menor dispersión del contaminante en el área, especialmente en la periferia. La concentración más alta ($0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se obtuvo en 2016 en las coordenadas (291121,10008770), seguida por los $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alcanzados en 2019 en las mismas coordenadas. De 2016 a 2021 se observa una mayor dispersión, abarcando más territorio con mayores concentraciones de material particulado, estas concentraciones se acentúan en la zona sureste del área urbana en estudio.

Figura 16.

Simulaciones de $PM_{2.5}$ para el periodo anual de 2013 a 2022

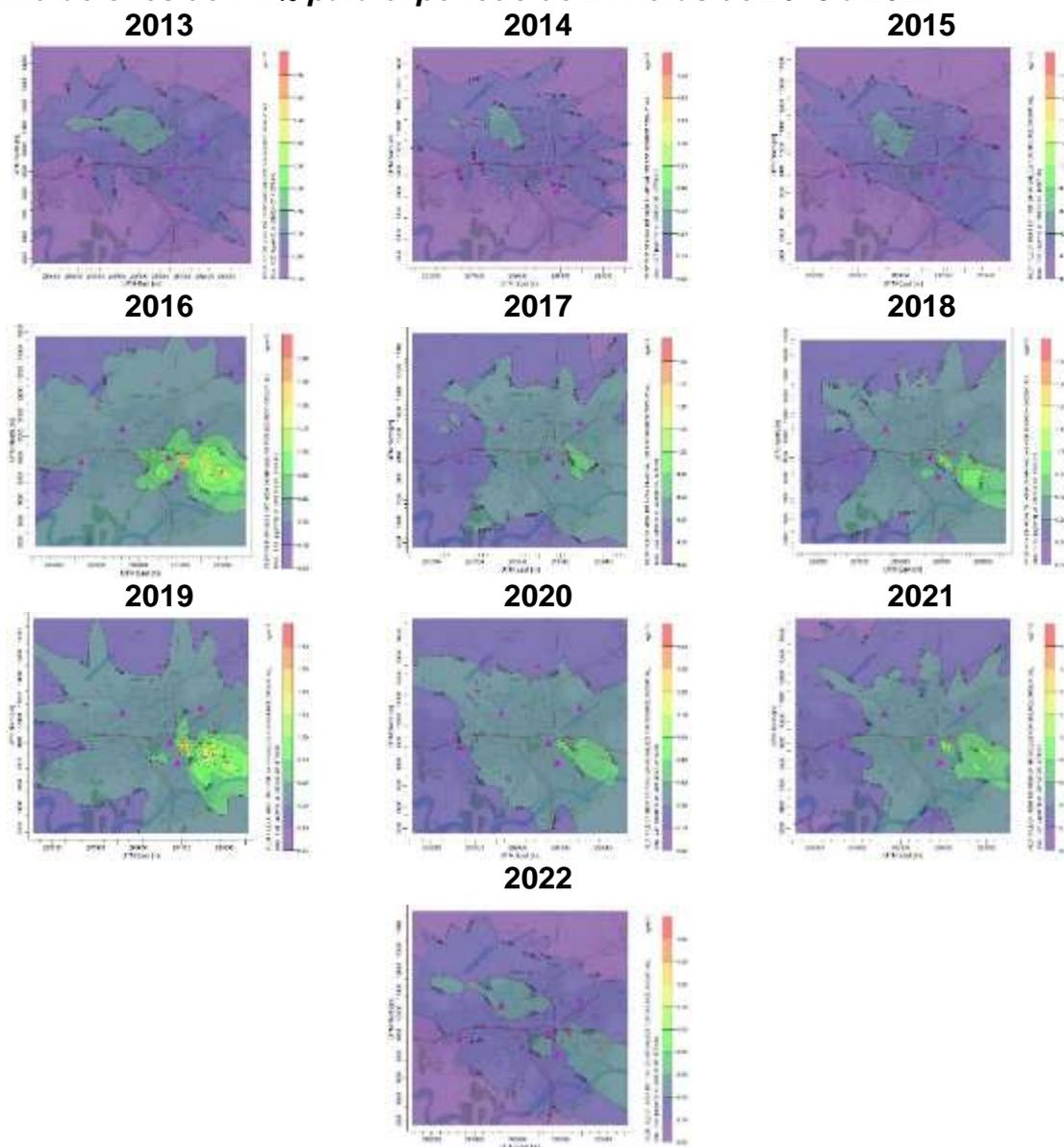


Elaborado por: El Autor, 2024

En la figura 17 se presenta las simulaciones del material particulado (PM₁₀) para un periodo de 24 horas. Las menores concentraciones se dieron en los años 2013, 2014, 2015 y 2022 con valores máximos de 0.29, 0.27, 0.28 y 0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, en este mismo lapso la dispersión se presentó en menor intensidad que los años restantes. En 2016 se observaron las máximas concentraciones de PM₁₀, llegando a 1.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las coordenadas (291121,10008770). Las concentraciones más altas de material particulado generadas por las centrales se revelaron en la zona centro y suroeste del área de estudio. De 2016 a 2021 se generó la mayor dispersión de material particulado sobre el territorio en análisis.

Figura 17.

Simulaciones de PM₁₀ para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022

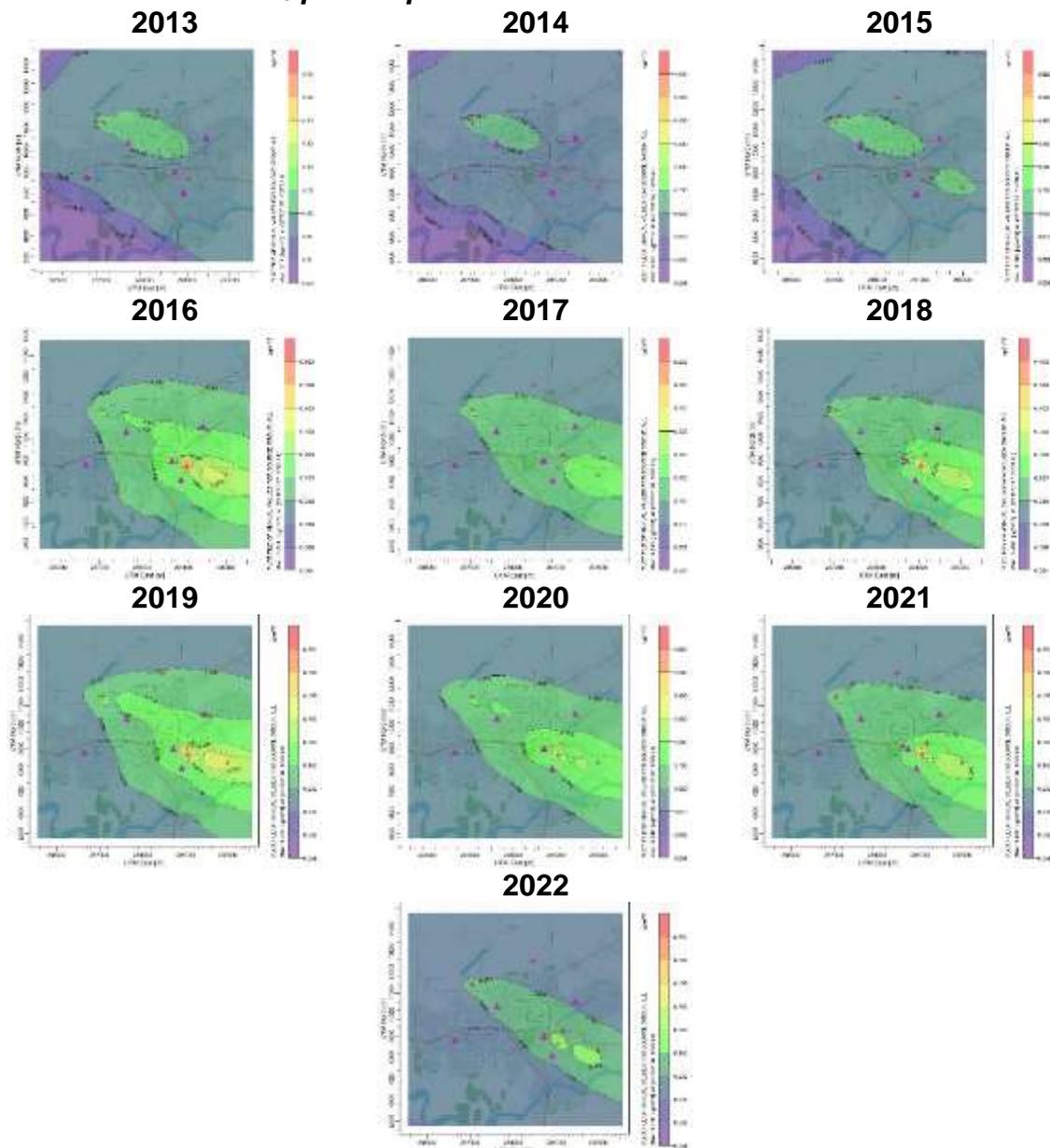


Elaborado por: El Autor, 2024

Los resultados de la simulación de material particulado (PM_{10}) anualmente se presentan en la figura 18. Durante los diez años de estudio las concentraciones de varían desde $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las observaciones más bajas a nivel del suelo en el área de estudio se dieron en los años 2013,2014 y 2015. De 2016 a 2022 las concentraciones resultantes tuvieron un comportamiento similar a lo largo de estos años alcanzando su pico máximo en 2016 con $0.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (291121,10008770). En este lapso se marca una alta dispersión del contaminante, alcanzando concentraciones relativamente elevadas en todo el territorio comparadas con los demás años en estudio.

Figura 18.

Simulaciones de PM_{10} para el periodo anual de 2013 a 2022

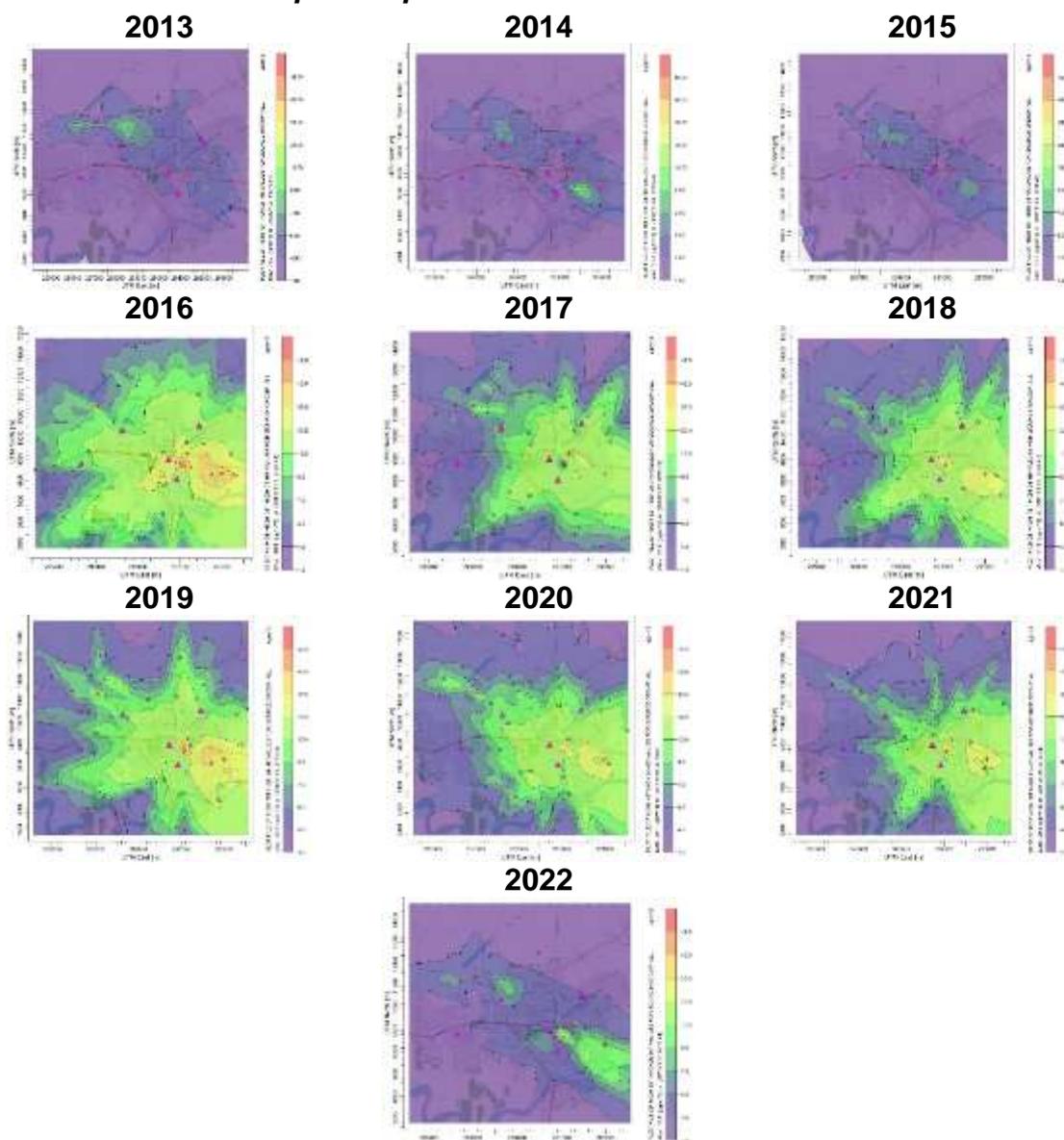


Elaborado por: El Autor, 2024

En la figura 19 se muestran los resultados de la simulación para el dióxido de azufre (SO_2) en un periodo de 24 horas. Los tres primeros años de estudio muestran las concentraciones más bajas de SO_2 a nivel del suelo, entre 7.3 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para 2016 se alcanzaron las concentraciones máximas en el área de estudio llegando hasta 48.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las coordenadas (291121,10008770). Este comportamiento es similar desde 2016 a 2021 donde se observó la mayor dispersión de contaminante en el área en cuestión con concentraciones que van desde los 8 hasta los 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superiores a los demás periodos de estudio. Los niveles más altos de contaminación se estiman en la zona centro y suroeste, y los más bajos en la periferia del área de interés.

Figura 19.

Simulaciones de SO_2 para el periodo de 24 horas de 2013 a 2022

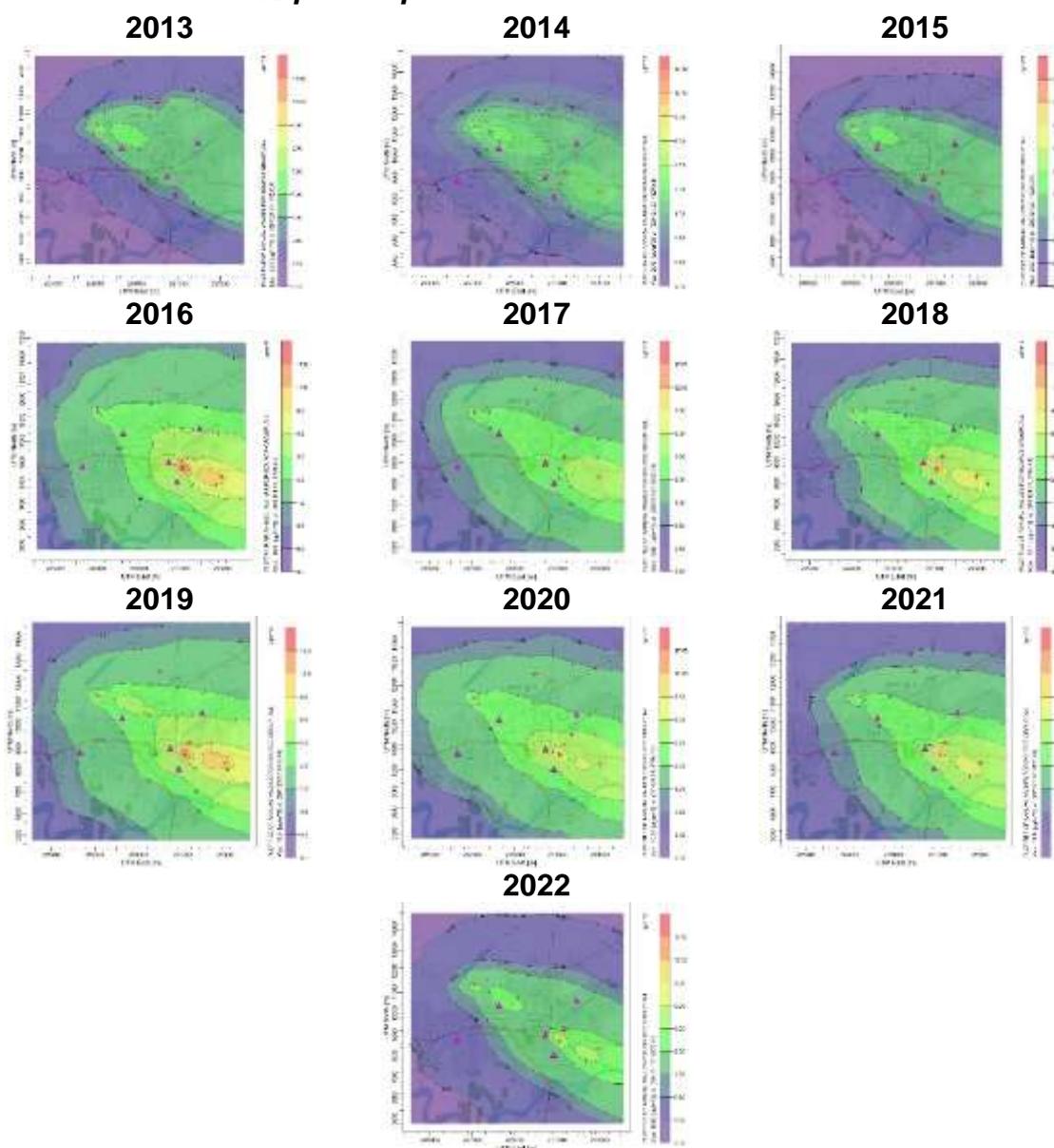


Elaborado por: El Autor, 2024

La figura 20 presenta los resultados de la simulación para dióxido de azufre (SO_2) anualmente. La escala de colores se basa en la concentración mínima ($0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y máxima ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) resultantes. En los años 2013, 2014, 2015 y 2022 se presentan gran parte de las concentraciones más bajas de SO_2 en el periodo de análisis, teniendo en 2015 un máximo de $2.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto (287121,10011270), en estos años se observó la menor dispersión en el área urbana. Las máximas concentraciones de SO_2 se presentan desde el año 2016 hasta 2021 en la zona centro y suroeste del área, estas alcanzan $18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016 en las coordenadas (291121,10008770), cerca de la Central Lago Agrio.

Figura 20.

Simulaciones de SO_2 para el periodo anual de 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

Los mayores niveles de dispersión de los contaminantes, y por ende las concentraciones más altas en el periodo de análisis se presentaron en el lapso de 2016 a 2021, coincidiendo con el consumo de combustibles. Como se puede observar en la tabla 13, de 2016 a 2020 se consumió más combustible que en los demás años de estudio, sin embargo, en el año 2021 no se consumió tanto como en otros periodos (2013 y 2014) pero se obtuvo mayores concentraciones de contaminantes debido al tipo de combustible consumido. En este periodo se consumió más crudo que diésel, este produce una mayor tasa de emisión de contaminantes.

En 2016 se consumieron aproximadamente 22.45 kTEP, produciendo la mayor tasa de emisiones en el periodo estudiado derivando en la mayor dispersión y concentración de contaminantes en el área urbana del cantón Lago Agrio. Por el contrario, en el año donde se consumió menor cantidad de combustibles fue en 2022 con solo 9.32 kTEP, representando menores tasas de emisión, dispersión y concentración de contaminantes a nivel del suelo.

Conforme crece la distancia a las fuentes de emisión la concentración de los contaminantes disminuye, obteniendo las menores concentraciones en la periferia norte, oeste y suroeste del área en estudio. En la periferia sureste sucede lo contrario debido a la dirección y velocidad del viento presente en el cantón Lago Agrio que va desde los 0.5 a 2.1 m/s sentido noroeste hacia el sureste. Esto se aprecia en la figura 23, donde las rosas de los vientos de cada año en el periodo de estudio tienen similares características.

Las bajas concentraciones resultantes de los contaminantes criterio se deben a un bajo consumo de combustibles fósiles asociado a una posible menor actividad operativa de las centrales termoeléctricas ya sea por la reducción en la demanda energética en la zona o por el reemplazo de dicha demanda con otro tipo de energía, como la hidroeléctrica. La gran disminución de combustibles consumidos en 2022 se debió a que la central Lago Agrio no consumiera la cantidad de crudo que venía consumiendo años anteriores, esto posiblemente por los obstáculos en la producción de petróleo que enfrentó el país en ese año, especialmente la ruptura de oleoductos.

De la misma forma, los resultados de las concentraciones altas de los contaminantes simulados están vinculados a un mayor consumo de combustibles fósiles para la generación de energía, posiblemente impulsado por un aumento en

la demanda energética regional o nacional. A medida que las centrales termoeléctricas aumentaron su producción de energía, las emisiones de los contaminantes incrementaron y se acumularon en el área de interés, especialmente en zonas con condiciones meteorológicas adversas, esto genera una menor dispersión y facilita la acumulación de contaminantes en la zona.

4.3 Elaboración de propuesta con medidas de control para las emisiones generadas por las centrales termoeléctricas en aquellos puntos con receptores sensibles donde se superen los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A.

En la tabla 8 se muestran los cinco receptores sensibles establecidos en el área urbana del cantón Lago Agrio, puntos donde existe aglomeración de población que de ser expuesta a altos niveles de contaminación existe un mayor riesgo de sufrir enfermedades.

Tabla 8.
Coordenadas de ubicación de los receptores sensibles identificados en el área urbana del cantón Lago Agrio

Código de identificación	Nombre	Ubicación	
		Este	Norte
RS-01	Hospital General Marco Vinicio Iza	286311	10008821
RS-02	Hospital IESS Nueva Loja	288255	10010397
RS-03	Mercado Central del Municipio de Lago Agrio	290438	10009008
RS-04	Escuela Jorge Gonzales Granda	291907	10010634
RS-05	Escuela De Educación Básica 20 de junio	290840	10008072

Nota: Coordenadas WGS-84, UTM 18S
Elaborado por: El Autor, 2024

En la figura 24 se presenta el mapa de ubicación de los receptores sensibles y su distribución en el área de estudio del cantón Lago Agrio.

Las concentraciones en los receptores sensibles por contaminante y por año se encuentran detalladas en el

apéndice n° 2. Los mayores niveles de contaminación generada por las centrales termoeléctricas se observaron en el RS-03 (Mercado Central del Municipio de Lago Agrio) en el año 2016. Este punto se encuentra relativamente cerca de la Central Lago Agrio, esta tuvo el mayor consumo de combustible, es decir, las mayores emisiones de las fuentes estudiadas. En el año 2013, 2015 y 2022 se observaron los menores niveles de concentración de todos los contaminantes en el RS-01 (Hospital General Marco Vinicio Iza) debido a la lejanía que presenta de las fuentes emisoras.

En ninguno de los puntos de receptores sensibles se superaron los límites máximos permisibles de la norma ecuatoriana, sin embargo, se obtuvieron concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) que sumadas a la contaminación preexistente podrían resultar en altos niveles de contaminación. Por ello a continuación se presentan las fichas con medidas de control de emisiones para la central con mayor tasa de emisión en el periodo analizado.

Tabla 9.

Ficha N° 1 Control de gases para la central termoeléctrica Lago Agrio

FICHA No. 1

A. CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Central Termoeléctrica Lago Agrio

B. UBICACIÓN

Este	Norte
291104	10008693

C. MEDIDA No. 1

Control de gases (SO₂, NO₂, CO)

D. OBJETIVO

Reducir la tasa de emisión de los gases (SO₂, NO₂, CO) producidos por la combustión en el proceso de generación de energía eléctrica en la central Lago Agrio.

FICHA No. 1

E. IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS ENFRENTADOS

Efectos no deseados en la salud humana como intoxicación e irritación del sistema respiratorio.

Contaminación del aire, evitando la formación de partículas en suspensión

Reducción en la formación de ozono troposférico y ácido sulfúrico que contribuye a la lluvia ácida.

F. DESCRIPCIÓN DE LA MEDIDA DE CONTROL

Analizar la posible sustitución del tipo de combustible utilizado en la producción de energía, el crudo produce mayores emisiones de contaminante que el diésel. Considerar en este análisis la posibilidad de utilizar combustibles alternativos más limpios, como gas natural, biocombustibles, e incluso integrar tecnologías híbridas que incluyan energías renovables.

Implementar sistemas avanzados de control mediante sensores avanzados de oxígeno y sistemas de gestión de aire combustión con el fin de optimizar la quema, reduciendo la temperatura de los gases y las emisiones de monóxido de carbono.

Utilizar tecnologías de quemadores de bajo NO_x y recirculación de gases de combustión para reducir la formación de NO₂. Incluir sistemas de monitoreo continuo de emisiones para ajustar en tiempo real las condiciones de combustión y mantener los niveles óptimos de oxígeno, minimizando así las emisiones de NO₂ y CO.

Introducir un programa de mantenimiento predictivo de la caldera y horno para detectar problemas antes de que ocurran fallas críticas. Esto no solo mejora la eficiencia, sino que también reduce las emisiones.

G. RESULTADOS ESPERADOS

Menores tasas de emisión de contaminantes (SO₂, NO₂, CO) resultante de las actividades de la central termoeléctrica Lago Agrio.

Tabla 10.
Ficha N° 2 Control de material particulado para la central termoeléctrica
Lago Agrio

FICHA No. 2

A. CENTRAL TERMOELÉCTRICA

Central Termoeléctrica Lago Agrio

B. UBICACIÓN

Este	Norte
291104	10008693

C. MEDIDA No. 2

Control de material particulado (PM₁₀, PM_{2.5})

D. OBJETIVO

Reducir la tasa de emisión de material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}) producidos por la combustión en el proceso de generación de energía eléctrica en la central Lago Agrio.

E. IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS ENFRENTADOS

Efectos negativos en la salud humana, desde problemas leves respiratorios hasta complicaciones cardiovasculares, derrames cerebrales y cáncer de pulmón.

Afectación a la calidad del aire, estos contaminantes disminuyen la visibilidad y calidad de vida.

Afectación a ecosistemas terrestres y acuáticos ya que se deposita en suelo y cuerpos de agua, puede interferir en la fotosíntesis provocando daños en la vegetación.

F. DESCRIPCIÓN DE LA MEDIDA DE CONTROL

Aplicar un sistema de precipitación electrostática en el punto de salida de las emisiones. Este sistema mediante carga eléctrica separa las partículas sólidas de los gases haciendo que caigan en placas colectoras y no se liberan a la atmosfera. Además, se podría implementar un sistema de monitoreo de eficiencia del precipitador que permita ajustar la carga eléctrica

FICHA No. 2

y la velocidad del flujo de gas en tiempo real, garantizando una mayor captación de partículas en condiciones variables.

Mantenimiento de los tanques de almacenamiento de los combustibles, eliminando escorias y suciedades que deterioran la calidad de este. Además, implementar limpieza en línea de calderas y hornos con sistemas de soplado de hollín para mantener una eficiencia óptima en el proceso.

G. RESULTADOS ESPERADOS

Menores tasas de emisión de material particulado resultante de las actividades de la central termoeléctrica Lago Agrio.

Elaborado por: El Autor, 2024

5. DISCUSIÓN

En Ecuador cerca del 30% de la energía eléctrica es producida por centrales termoeléctricas que generan emisiones debido a la quema de combustibles fósiles. Resulta importante evaluar la contaminación generada por estas emisiones mediante monitoreos o simulaciones. El modelo gaussiano AERMOD es ampliamente usado para modelar emisiones y la dispersión de los contaminantes (Siahpour et al., 2022).

Al igual que en el trabajo de la ICM (2021), la estimación de las emisiones mediante el método de factor de emisión, proporcionados por la EPA para cada combustible consumido por las centrales termoeléctricas, indica una relación directamente proporcional entre la cantidad de combustible consumido con la tasa de liberación de contaminantes a la atmosfera. En los estudios de Moharreri et al. (2020) y Siahpour et al. (2022) las concentraciones simuladas de los contaminantes alcanzan valores máximos muy por encima de las concentraciones máximas obtenidas en el área de estudio, excepto para el dióxido de azufre, en 2016.

Siahpour et al. (2022) analizan las emisiones de la central Shazand con una capacidad de 1300 MW, Moharreri et al. (2020) basa su estudio en la central termoeléctrica Mashhad con una capacidad de 328 MW, ambas centrales en Irán, y en México la ICM (2021) estudia la influencia de la central termoeléctrica de Tula que posee una capacidad de 890 MW. La diferencia significativa radica esencialmente en las capacidades de producción de energía de las centrales termoeléctricas estudiadas, y por ende de la cantidad de combustible consumido. En este estudio la central termoeléctrica con mayor capacidad es Lago Agrio con 13.8 MW.

Debido a limitaciones económicas, operativas y la falta de información de la contaminación generada por otras fuentes, el presente estudio no considera la validación de las estimaciones. Los estudios de Afzali et al. (2017) y Moharreri et al. (2020) muestran que no existen diferencias significativas entre las concentraciones simuladas y las concentraciones reportadas en los monitoreos de validación del modelo. Al igual que en las investigaciones antes mencionadas, el presente estudio utilizó el modelo gaussiano AERMOD para simular la dispersión de contaminantes en un área urbana incluyendo las características físicas y químicas de las fuentes emisoras, las propiedades de emisión y los parámetros meteorológicos que pudieran afectar a la dispersión de los contaminantes.

Las máximas concentraciones resultantes se observaron muy cercanas a la mayor fuente de emisiones (Central Termoeléctrica Lago Agrio), esto concuerda con los resultados del trabajo investigativo de Siahpour et al (2022) donde luego del análisis de las concentraciones de los contaminantes a diferentes distancias de la fuente, determina que la máxima concentración se da a un kilómetro de distancia, muy cerca de la misma. Las concentraciones de los contaminantes criterio no superan los estándares nacionales en los puntos sensibles establecidos en la zona urbana de Lago Agrio. A pesar de ello se proponen medidas para controlar y reducir las emisiones de las centrales termoeléctricas buscando disminuir las concentraciones de los contaminantes a nivel del suelo. Este proceder es respaldado por el trabajo de Wan et al. (2023) en China, que afirma que implementar medidas de control reduce la contaminación, en especial si se hace renovación de unidades preexistentes.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En el área urbana del cantón Lago Agrio operan cinco centrales termoeléctricas (Amazonas, Celso Castellanos, Frontera, Lago Agrio y Tapi) que generan emisiones. A lo largo del periodo de análisis las centrales identificadas consumieron diésel, crudo y gas natural, este último solo en la central Lago Agrio en el año 2018. La mayor cantidad de NO_2 , CO y SO_2 se libera a la atmósfera en 2016, año donde se consume la mayor cantidad de combustibles. El material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) se libera en mayor cantidad en 2019. La tasa de emisión de contaminantes es directamente proporcional a la cantidad y el tipo de combustible consumido por las centrales para la producción de energía eléctrica.

Los mayores niveles de concentración de los contaminantes se presentan en la zona centro-este del área de estudio, muy cerca de la principal fuente de emisiones en estudio (Central Termoeléctrica Lago Agrio). Conforme la observación se aleja de las fuentes las concentraciones disminuyen. En los análisis anuales los contaminantes se dispersan en la misma dirección de la predominancia de los vientos en el área de estudio.

En los cinco receptores sensibles identificados en el área de estudio las concentraciones de los contaminantes no superan los límites máximos permisibles establecidos en la norma. Sin embargo, para la fuente de mayores emisiones se sugiere reemplazar el crudo por un combustible menos contaminante, implementar sistemas automatizados de inyección de oxígeno/combustible, mantenimientos de caldera y horno, precipitadores electrostáticos y mantenimientos de los tanques de almacenamiento de combustible.

Por lo antes expuesto se rechaza la hipótesis planteada en el presente estudio, en el 100% de los receptores sensibles los niveles de inmisiones generados por las termoeléctricas no superan los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 4 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A para los contaminantes criterio (CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$).

6.2 Recomendaciones

Se ve necesaria la realización de un inventario completo de emisiones, incluyendo las emisiones por proceso, las fuentes móviles y las demás industrias en la zona de estudio. La idea es mantener un inventario actualizado de las

emisiones lo que permitirá validar y ajustar las estimaciones de emisión en tiempo real, aumentando la precisión de los modelos predictivos y mejorando la efectividad de las medidas de mitigación y control.

Para investigaciones donde se consideren centros urbanos de mayor dimensión se podría utilizar el software CALPUFF en lugar de AERMOD. Si bien ambos softwares funcionan con el modelo gaussiano, CALPUFF es más robusto y adecuado para largas distancias, terrenos complejos, capaz de manejar meteorología variable y procesos atmosféricos complejos. Adicional a ello, con la misma información y parámetros se podría utilizar otros softwares de simulación de dispersión con el fin de comparar los resultados de este estudio.

Validar los resultados del modelo AERMOD mediante campañas de monitoreo en sitios estratégicos en el área de estudio, tanto en puntos aleatorios como en los puntos de receptores sensibles determinados previamente, no sin antes la consideración de las demás fuentes, ya que validar un modelo cuesta mucho dinero. La combinación de monitoreo y modelado proporcionará datos de mayor calidad y ayudará a ajustar simulaciones futuras para mejorar la precisión en la estimación de concentraciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Afzali, A., Rashid, M., Afzali, M., y Younesi, V. (2017). Prediction of air pollutants concentrations from multiple sources using AERMOD coupled with WRF prognostic model. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1216-1225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.196>
- Alvarez, C., Teodoro, A., y Ramirez, L. (2019). Spatial estimation of surface ozone concentrations in Quito Ecuador with remote sensing data, air pollution measurements and meteorological variables. *Environmental Monitoring Assessment*, 191(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7286-6>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2015, 18 de diciembre). Ley Orgánica de Salud. *Registro Oficial Suplemento 423*. <https://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2017/03/LEY-ORG%C3%81NICA-DE-SALUD4.pdf>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2015, 4 de noviembre). Acuerdo Ministerial 097. *Registro Oficial Edición Especial 387*. https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017, 12 de abril). Código Orgánico del Ambiente. *Registro Oficial Suplemento 983*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2019, 12 de junio). Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. *Registro Oficial Suplemento 507*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/REGLAMENTO-AL-CODIGO-ORGANICO-DEL-AMBIENTE.pdf>
- Asociación de Bancos Privados del Ecuador [ASOBANCA]. (2022). *Guía de Generación Termoeléctrica*. Quito. <https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2022/12/16.-Guia-Generacion-termoelectrica.pdf>
- Comunidad de Madrid. (2018). *Evaluación de las emisiones difusas de partículas sedimentables*. Madrid. https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/atm-e-ed-04_it_evaluacion_emisiones_difusas_particulas_sedimentables_2018-06_rev1.pdf

- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Artículo 14, 32, 71, 72, 276, 395, 396, 397, 414. [Título II, VI, VII]. *Registro Oficial 449 de 20 de octubre de 2008*. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Cortés, S., Yohannessen, K., Tellerías, L., y Ahumada, E. (2019). Exposición a contaminantes provenientes de termoeléctricas a carbón y salud infantil: ¿Cuál es la evidencia internacional y nacional? *Revista Chilena de Pediatría*, 90(1), 102 - 114.
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2022). *Guidelines on the information to be contained in Environmental Impact Assessment Reports*. Irlanda.
- Environmental Protection Agency [EPA]. (17 de enero de 2017). *Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw_17.pdf
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2018). *SUBCHAPTER C—AIR PROGRAMS PART 50*. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-1/subchapter-C/part-50?toc=1>
- Eurofins Environment Testing Spain. (5 de agosto de 2023). *Modelos de dispersión Atmosférica*. <https://www.eurofins-environment.es/es/modelos-de-dispersion-atmosferica/>
- European Environment Agency [EEA]. (2019). *List of environmental terms used by EEA*. https://www.eea.europa.eu/help/glossary#c4=50&c0=A&b_start=650
- European Environment Agency [EEA]. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*. Copenhagen.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF]. (2020). *El aire que respiramos: Los efectos de la contaminación del aire y del cambio climático en la salud de la niñez en el Ecuador*. Quito: UNICEF Ecuador.
- Gobierno de Aragón. (2018). *Contaminación Atmosférica: El aire que respiramos*. https://www.aragon.es/documents/20127/674325/CONTAMINACION_ATMOSFERICA.pdf/9271acea-8a9b-de61-900f-2ae65565a69e#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20es,deterioren%20bienes%20de%20cualquier%20na
- Health Effects Institute [HEI]. (2020). *State of Global Air 2020*. Boston: Special Report.

- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. México D.F.: INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Iniciativa Climática de México [ICM]. (2021). *Estudio sobre la influencia de la Central Termoeléctrica de Tula, Hidalgo, en la calidad de aire regional*. Ciudad de México: Iniciativa Climática de México. https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/05/Termoele%CC%81ctrica-Tula_190521-3-1.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Glosario Meteorológico*. Subdirección de Meteorología. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorol%C3%B3gico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8e>
- International Finance Corporation [IFC]. (19 de diciembre de 2008). *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Thermal Power Plants*. <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2008-thermal-power-ehs-guidelines-en.pdf>
- Khoshakhlagh, A., Mohammadzadeh, M., y Morais, S. (2023). Air quality in Tehran, Iran: Spatio-temporal characteristics, human health effects, economic costs and recommendations for good practice. *Atmospheric Environment: X*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100222>
- Kumar, P., Singh, A., Arora, T., Singh, S., y Singh, R. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Science of The Total Environment*, 872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162163>
- Kumar, V., Kumar Saxena, V., Kumar, R., y Kumar, S. (2023). Energy, exergy, sustainability and environmental emission analysis of coal-fired thermal power plant. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102416>
- Landigran, P., Fuller, R., Acosta, N., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., . . . Zhong, M. (2017). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Lelieveld, J., Evans, J., Fnais, M., Giannadaki, D., y Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>

- Li, M., y Mallat, L. (2018). Health impacts of air pollution. *Score Paper*(42).
https://www.scor.com/sites/default/files/sp42-air_pollution.pdf
- Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas*. Dirección de desarrollo sectorial sostenible.
<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527666/Protocolo+fuentes+fijas.pdf/65780586-e70d-434a-9da7-264d3649b2ba>
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA]. (2019). *Guía metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuentes puntuales*. Santiago de Chile: Departamento de Información Ambiental. <https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/Guia-metodologica-para-la-estimacion-de-emisiones-provinientes-de-fuentes-puntuales.pdf>
- Moharreri, M., Arkian, F., Lari, K., y Salehi, G. (2020). PM10 and CO dispersion modeling of emissions from four thermal power plants in Mashhad, Iran. *Scientia Iranica*, 27(5), 2433-2442.
<https://doi.org/10.24200/SCI.2019.52259.2625>
- Moreira-Romero, A. (2018). Contaminación del aire en el medio ambiente por las emisiones de gases tóxicos de empresas insustriales en Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 3(21), 273-280.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. Ginebra: Organizacion Mundial de la Salud.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- Organizacion Mundial de la Salud [OMS]. (19 de diciembre de 2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P., y Petrova-Antonova, D. (2022). Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. *Atmosphere*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>
- Quesada Molina, F., y Bustillos Yaguana, D. (2018). Indoor Environmental Quality of Urban Residential Buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort Standard. *Buildings*, 8(7), 90-109.
- Radian Corporation. (1996). *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México*. Sacramento.

- Rodríguez-Guerra, A., y Cuvi, N. (2019). Contaminación del aire y justicia ambiental en Quito, Ecuador. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 8(3), 13-46.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2013). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (16 de junio de 2018). *Gobierno de México: Fuentes de Contaminación Atmosférica*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica#:~:text=Se%20agrupan%20en%3A,transporte%20y%20los%20veh%C3%ADculos%20automotores>.
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA*. https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/02.FEB/28/Guia-Calidad-del-aire_V.4-final.pdf
- Siahpour, G., Jozi, S., Orak, N., Fathian, H., y Dashti, S. (2022). Estimation of environmental pollutants using the AERMOD model in Shazand thermal power plant, Arak, Iran. *Toxin Reviews*, 41(4), 1269-1279. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.2004429>
- Silva, A., y Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras y Proyectos*, 4-10. <https://www.scielo.cl/pdf/oyp/n9/art01.pdf>
- Sistema de Análisis y Modelado Comunitario CMAS. (15 de junio de 2015). *Archivo de parámetros de reemplazo de pila de fuente puntual*. <https://www.cmascenter.org/smoke/documentation/4.5/html/ch08s09s03.html#t>
- Tancara, C. (1988). La investigación documental en la investigación científica. *Centro Nacional de Documentación científica y Tecnológica.*, 6-9.
- Theodore, L. (2008). *Air Pollution Control Equipment Calculations*. Jhon Wiley and Sons Inc.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *America's Children and the Environment*. Washington, D.C.

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=515537&Lab=NCEE

U.S. Environmental Protection Agency. (11 de julio de 2023). *Particulate Matter (PM) Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

Valencia, V., Hertel, O., Ketzler, M., y Levin, G. (2020). Modeling urban background air pollution in Quito, Ecuador. *Atmospheric Pollution Research*, 11(4), 646-666. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.12.014>

Wan, R., Tang, L., Guo, J., Zhai, W., Li, L., Xie, Y., . . . Wu, J. (2023). Cost-benefits analysis of ultra-low emissions standard on air quality and health impact in thermal power plants in China. *Journal of Environmental Management*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118731>

ANEXOS

Figura 21.
Mapa de ubicación del área urbana del cantón Lago Agrio, Sucumbíos, Ecuador



Elaborado por: El Autor, 2024

Tabla 11.
Formato de ficha para las medidas de control

FICHA No.

H. CENTRAL TERMOELÉCTRICA

I. UBICACIÓN

J. MEDIDA No.

K. OBJETIVO

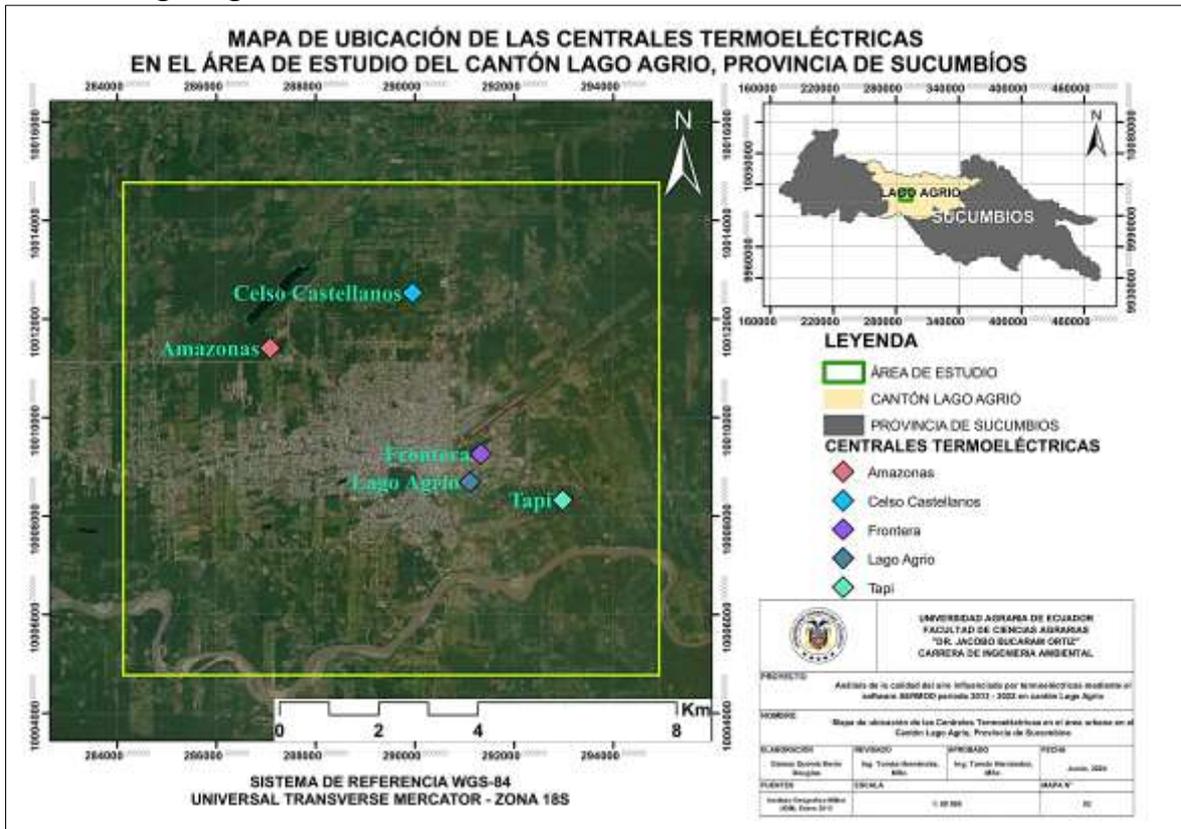
L. IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS ENFRENTADOS

M. DESCRIPCION DE LA MEDIDA DE CONTROL

N. RESULTADOS ESPERADOS

Elaborado por: El Autor, 2024

Figura 22.
Mapa de ubicación de las centrales termoeléctricas en el área urbana el cantón Lago Agrio



Elaborado por: El Autor, 2024

Tabla 12.
Cantidad y tipo de combustible consumidos por las centrales termoeléctricas a lo largo del periodo de estudio

Año	Tipo de combustible	CENTRALES TERMOELÉCTRICAS					TOTALES (10 ³ gal)
		Amazonas	Celso Castellanos	Frontera	Lago Agrio	Tapi	
2013	Diesel	3.46	1190.88	-	2279.57	-	3473.91
	Crudo	707.05	-	-	-	-	707.05
2014	Diesel	4.59	346.79	91.77	2829.95	175.86	3448.96
	Crudo	672.40	-	-	-	-	672.40
2015	Diesel	5.95	239.21	169.20	1381.63	320.53	2116.51
	Crudo	640.51	-	-	351.52	-	992.03
2016	Diesel	7.32	327.08	202.26	2412.72	562.55	3511.94
	Crudo	596.54	-	-	2597.29	-	3193.83
2017	Diesel	5.86	148.56	235.60	2243.27	705.06	3338.35
	Crudo	651.81	-	-	2134.95	-	2786.76
2018	Diesel	3.02	33.80	395.66	958.75	600.12	1991.36
	Crudo	658.38	-	-	1912.96	-	2571.34
2019	Gas Natural	-	-	-	8.54*	-	8.54*
	Diesel	4.29	8.14	522.42	1580.29	658.87	2774.02
	Crudo	721.51	-	-	2551.32	-	3272.83
2020	Diesel	5.38	20.64	523.38	1458.79	551.86	2560.05
	Crudo	717.78	-	-	1686.10	-	2403.89
2021	Diesel	9.63	15.70	292.72	584.81	396.26	1299.12
	Crudo	669.63	-	-	1890.34	-	2559.97
2022	Diesel	3.11	288.37	333.49	377.23	400.99	1403.19
	Crudo	680.08	-	-	698.33	-	1378.41

* El gas natural se encuentra en kpc (mil pies cúbicos)

Fuente: ARCERNR, 2022

Elaborado por: El Autor, 2024

Tabla 13.
Cantidad y tipo de combustible consumidos por las centrales
termoeléctricas en kilotoneladas equivalentes de petróleo (kTEP)

Año	Tipo de combustible	Totales (10 ³ gal)	Toneladas equivalentes de petróleo (TEP)	kTEP por año
2013	Diesel	3473.91	11463.90	13.87
	Crudo	707.05	2403.97	
2014	Diesel	3448.96	11381.57	13.67
	Crudo	672.40	2286.16	
2015	Diesel	2116.51	6984.49	10.36
	Crudo	992.03	3372.89	
2016	Diesel	3511.94	11589.39	22.45
	Crudo	3193.83	10859.01	
2017	Diesel	3338.35	11016.55	20.49
	Crudo	2786.76	9474.99	
2018	Diesel	1991.36	6571.49	15.50
	Crudo	2571.34	8742.56	
2019	Gas Natural	8.54*	190.24	20.28
	Diesel	2774.02	9154.28	
	Crudo	3272.83	11127.63	
2020	Diesel	2560.05	8448.18	16.62
	Crudo	2403.89	8173.22	
2021	Diesel	1299.12	4287.09	12.99
	Crudo	2559.97	8703.89	
2022	Diesel	1403.19	4630.53	9.32
	Crudo	1378.41	4686.58	

* El gas natural se encuentra en kpc (mil pies cúbicos)

Fuente: ARCERNNR, 2022

Elaborado por: El Autor, 2024

Tabla 14.

Tasas de emisión de los contaminantes por año de estudio

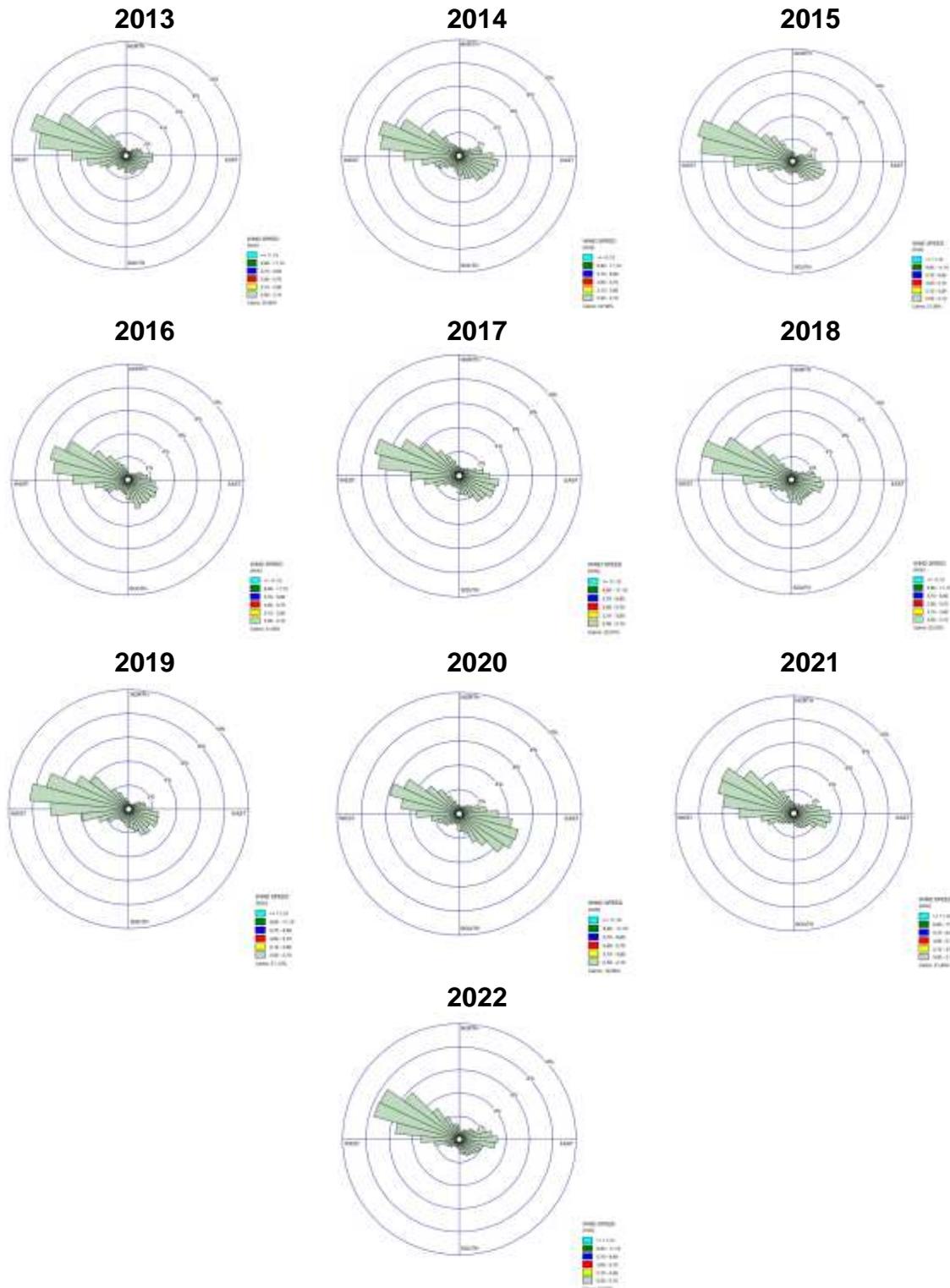
AÑO	Tasa de emisión de contaminante (g/s)				
	SO ₂	NO ₂	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}
2013	8.958	1.677	0.301	0.204	0.113
2014	8.727	1.645	0.296	0.196**	0.108**
2015	8.626**	1.401**	0.224	0.246	0.148
2016	23.052*	3.371*	0.482*	0.744	0.465
2017	20.505	3.036	0.440	0.653	0.406
2018	17.363	2.426	0.328	0.587	0.371
2019	22.443	3.170	0.435	0.751*	0.473*
2020	17.231	2.509	0.357	0.559	0.349
2021	16.310	2.179	0.278	0.575	0.367
2022	9.788	1.416	0.200**	0.320	0.200

* Emisiones máximas en el periodo de estudio

** Emisiones mínimas en el periodo de estudio

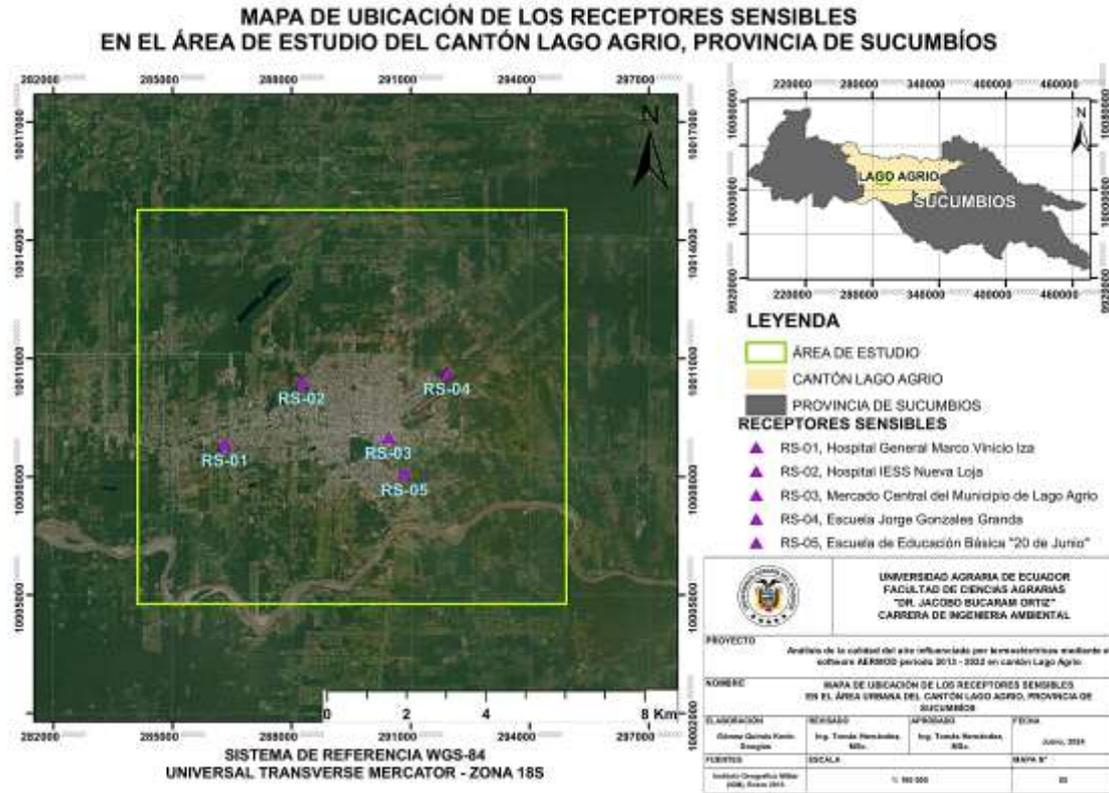
Elaborado por: El Autor, 2024

Figura 23.
Rosas de los vientos anuales del área urbana del cantón Lago Agrio en los años 2013 a 2022



Elaborado por: El Autor, 2024

Figura 24.
Mapa de ubicación de los receptores sensibles en el área urbana del cantón Lago Agrio



Elaborado por: El Autor, 2024

APÉNDICES

Apéndice N° 1:

Promedios anuales de los parámetros meteorológicos utilizados en el software para la simulación

Año	Cobertura de Nubes (décimos)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (mbar)	Dirección Viento (deg)	Velocidad Viento (m/s)	Altura Nubes (m)	Precipitación (mm)	Radiación Global (W/m ²)
2013	7,18	24,03	88,31	973,16	211,91	0,67	330,00	0,29	85,41
2014	7,18	24,52	85,03	973,15	198,89	0,70	330,00	0,22	84,46
2015	7,18	24,52	86,04	973,28	210,15	0,69	330,00	0,28	83,81
2016	7,18	24,69	86,82	973,33	206,51	0,68	330,00	0,26	84,95
2017	7,18	24,36	87,29	973,21	201,32	0,69	330,00	0,26	87,59
2018	7,18	24,14	86,78	973,46	206,03	0,71	330,00	0,24	83,63
2019	7,18	24,39	87,25	973,49	209,41	0,70	330,00	0,27	79,87
2020	7,19	25,40	82,04	973,08	190,41	0,71	330,00	0,16	85,70
2021	7,18	24,18	87,35	973,43	205,34	0,70	330,00	0,25	84,31
2022	7,18	24,03	87,43	973,36	203,81	0,70	330,00	0,28	88,19

Elaborado por: El Autor, 2024.

Apéndice N° 2:

Concentraciones estimadas en los receptores sensibles identificados en el área urbana del cantón Lago Agrio y su comparación con el estándar nacional ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Contaminante/Periodo	Receptores Sensibles	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	¿Supera el límite permisible?
SO ₂ (24 Horas)	RS-01	1.80	2.78	2.12	9.28	4.77	4.30	5.83	4.15	5.48	2.56	NO
	RS-02	6.70	5.17	7.20	9.66	6.84	7.15	9.22	7.55	7.68	6.56	NO
	RS-03	3.14	4.19	3.92	23.00	16.95	12.18	15.18	10.73	12.80	5.36	NO
	RS-04	3.75	4.66	3.29	10.70	9.85	9.27	10.55	7.51	8.50	4.07	NO
	RS-05	3.82	4.20	4.46	13.23	10.98	10.12	16.05	11.39	10.58	6.03	NO
SO ₂ (1 Año)	RS-01	0.35	0.50	0.43	1.13	0.92	0.84	1.03	0.82	0.88	0.58	NO
	RS-02	1.51	1.46	1.46	2.36	2.14	2.10	2.44	2.11	2.20	2.00	NO
	RS-03	1.07	1.17	1.16	4.34	2.52	3.08	4.00	3.03	3.00	1.92	NO
	RS-04	1.22	1.27	1.26	2.89	1.91	2.15	2.78	2.34	2.00	1.31	NO
	RS-05	0.76	0.95	0.89	3.89	2.19	2.95	3.66	2.73	2.88	1.70	NO
NO ₂ (1 Hora)	RS-01	1.38	1.54	1.22	5.50	3.52	3.52	4.90	3.58	3.19	1.36	NO
	RS-02	1.67	2.06	1.63	6.92	4.80	4.36	6.11	4.44	4.17	1.64	NO
	RS-03	3.28	4.24	3.22	11.10	9.82	7.03	9.67	7.05	6.44	2.75	NO
	RS-04	2.25	2.91	2.26	8.64	6.64	5.49	7.69	5.61	5.00	2.15	NO
	RS-05	3.27	4.18	3.19	10.79	9.40	7.13	9.82	7.30	6.41	2.90	NO
NO ₂ (1 Año)	RS-01	0.07	0.08	0.06	0.16	0.13	0.11	0.14	0.11	0.11	0.08	NO
	RS-02	0.22	0.20	0.19	0.32	0.28	0.27	0.32	0.28	0.27	0.25	NO
	RS-03	0.19	0.19	0.17	0.62	0.36	0.41	0.54	0.42	0.38	0.26	NO

Contaminante/Periodo	Receptores Sensibles	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	¿Supera el límite permisible?
CO (1 Hora)	RS-04	0.22	0.21	0.18	0.41	0.27	0.29	0.39	0.32	0.25	0.18	NO
	RS-05	0.14	0.17	0.14	0.56	0.32	0.40	0.50	0.39	0.37	0.23	NO
	RS-01	0.24	0.32	0.22	0.77	0.52	0.46	0.66	0.50	0.39	0.18	NO
	RS-02	0.34	0.43	0.29	0.97	0.70	0.56	0.81	0.62	0.50	0.22	NO
	RS-03	0.68	0.88	0.57	1.56	1.42	0.92	1.29	1.00	0.79	0.37	NO
CO (8 Horas)	RS-04	0.47	0.61	0.40	1.21	0.96	0.71	1.02	0.78	0.61	0.31	NO
	RS-05	0.68	0.87	0.56	1.52	1.36	0.95	1.34	1.05	0.81	0.41	NO
	RS-01	0.14	0.17	0.10	0.47	0.28	0.24	0.29	0.23	0.26	0.14	NO
	RS-02	0.15	0.20	0.14	0.43	0.44	0.23	0.39	0.30	0.30	0.14	NO
	RS-03	0.32	0.41	0.29	1.00	0.93	0.37	0.65	0.50	0.50	0.23	NO
PM ₁₀ (24 Horas)	RS-04	0.23	0.46	0.23	0.56	0.36	0.39	0.40	0.32	0.42	0.20	NO
	RS-05	0.47	0.54	0.32	0.79	0.69	0.45	0.77	0.60	0.45	0.26	NO
	RS-01	0.07	0.10	0.08	0.30	0.16	0.14	0.20	0.13	0.20	0.09	NO
	RS-02	0.26	0.19	0.28	0.33	0.23	0.26	0.33	0.27	0.28	0.25	NO
	RS-03	0.12	0.13	0.12	0.75	0.54	0.42	0.52	0.35	0.46	0.18	NO
PM ₁₀ (1 Año)	RS-04	0.16	0.14	0.11	0.35	0.31	0.32	0.35	0.24	0.30	0.15	NO
	RS-05	0.15	0.09	0.16	0.43	0.36	0.35	0.54	0.37	0.38	0.20	NO
	RS-01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	NO
	RS-02	0.06	0.05	0.05	0.08	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	NO
	RS-03	0.04	0.03	0.04	0.14	0.08	0.11	0.14	0.10	0.11	0.07	NO

Contaminante/Periodo	Receptores Sensibles	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	¿Supera el límite permisible?
PM _{2.5} (24 Horas)	RS-04	0.04	0.03	0.04	0.10	0.06	0.07	0.10	0.08	0.07	0.04	NO
	RS-05	0.02	0.02	0.03	0.13	0.07	0.10	0.13	0.09	0.10	0.06	NO
	RS-01	0.04	0.07	0.05	0.19	0.10	0.09	0.12	0.08	0.13	0.06	NO
	RS-02	0.17	0.13	0.18	0.21	0.15	0.17	0.21	0.17	0.18	0.16	NO
	RS-03	0.08	0.08	0.08	0.47	0.34	0.27	0.33	0.22	0.30	0.11	NO
	RS-04	0.10	0.09	0.07	0.22	0.19	0.20	0.22	0.15	0.19	0.10	NO
PM _{2.5} (1 Año)	RS-05	0.09	0.06	0.10	0.27	0.22	0.22	0.34	0.23	0.24	0.12	NO
	RS-01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	NO
	RS-02	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	NO
	RS-03	0.02	0.02	0.02	0.09	0.05	0.07	0.09	0.06	0.07	0.04	NO
	RS-04	0.02	0.02	0.03	0.08	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	0.03	NO
	RS-05	0.01	0.01	0.02	0.08	0.04	0.07	0.08	0.06	0.07	0.04	NO

Elaborado por: El Autor, 2024