



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Estudio de la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil
como resultado de las operaciones de los puertos y
aeropuerto utilizando un modelo de dispersión de
contaminantes”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL

Presentada por:

**Evelyn Elizabeth García León
Carlos Enrique Panchana López**

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2021

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestro director de proyecto, el MSc. Mario Patiño A., a nuestras hijas que son nuestra inspiración, y a nuestras familias por su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

Esta investigación está
dedicada a Dios,
nuestras hijas y
nuestras madres
quienes han sido
nuestro motor.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Ángel Ramírez M., PhD.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE**

**Mario Patiño A., MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO**

**Juan Peralta J., PhD.
VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Carlos Enrique Panchana López

Evelyn Elizabeth García León

RESUMEN

Para el desarrollo de este trabajo de titulación se procedió a realizar el inventario de emisiones de contaminantes que provienen del aeropuerto internacional José Joaquín de Olmedo (JJO) y los diferentes puertos habilitados de la ciudad de Guayaquil con datos del año 2018, con el objetivo de estudiar el impacto que tienen estas emisiones de contaminantes en la calidad del aire en un área de 50x50 KM con centro en el aeropuerto de Guayaquil.

Los datos fueron obtenidos a partir de información brindada por la Terminal Aeroportuaria de Guayaquil (TAGSA), entidad privada que administra y opera el aeropuerto de Guayaquil; y por la Secretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial (SPTMF), entidad pública que regulariza y protege los servicios públicos de transporte marítimo y fluvial del país. Para el caso del aeropuerto se consideran los ciclos de Despegue / Aterrizaje (LTO por sus siglas en inglés) de las aeronaves y para los puertos se consideran las actividades de maniobra (Manoeuvring) y estancia (Hoteling) de los buques.

Para la evaluación de la calidad del aire se empleó el modelo de dispersión de contaminantes AERMOD, que es un modelo de pluma Gaussiana de alta resolución a escala, mismo que estableció la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como modelo regulatorio a partir del año 2005, que nos permite visualizar la simulación de la dispersión de los contaminantes en el aire, en este caso, por los puertos y aeropuerto de la ciudad. Así también, nos permite estimar las concentraciones de dichos contaminantes a nivel del suelo.

AERMOD realiza los cálculos considerando la topografía y meteorología de la zona de estudio y para ello cuenta también con una base de datos actualizada. Los datos meteorológicos del área de estudio fueron obtenidos por un modelo de pronóstico meteorológico de meso-escala de quinta generación (MM5) en formatos SFC y PFL; así mismo, la información topográfica del área de investigación se ingresa al modelo utilizando la opción Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) que tiene una base de datos topográfica digital de alta resolución y se encuentra disponible en la red de forma gratuita.

El inventario de emisiones fue calculado a partir del método de factores de emisiones de la European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) y los resultados nos muestran que los contaminantes que más se emiten de los aeropuertos son: CO (59.6%) y NO_x (37.3%) seguido por SO₂ (2.8%) y que los contaminantes que más se emiten de los diferentes puertos son NO_x (51%) y SO_x (19%) seguidos de PM₁₀ (8%).

Luego de obtener el inventario de emisiones, la data meteorológica y la información topográfica, se continuó ingresando estos datos en el modelo AERMOD View de Lakes Environmental para realizar la simulación de la dispersión de los contaminantes en el aire y su deposición, lo que arrojó como resultado las concentraciones de cada uno de los contaminantes para los periodos de tiempo de 1 hora, 24 horas y 1 año;

así también se obtuvieron las curvas de iso-concentración (isopletras) en la zona de estudio.

Las mayores concentraciones que se obtuvieron se localizan junto a la pista de despegue y aterrizaje del Aeropuerto JJO, y fueron: 538.53 [$\mu\text{g CO}/\text{m}^3$] y 337.31 [$\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$] en el periodo de 1 hora; 84.41 [$\mu\text{g CO}/\text{m}^3$] y 52.87 [$\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$] para el periodo de 24 horas; y 28.91 [$\mu\text{g CO}/\text{m}^3$] y 18.11 [$\mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$] para el periodo de 1 año.

Finalmente, los resultados de la modelización son comparados con los límites máximos establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA) que es la normativa ecuatoriana que establece los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes a nivel de suelo en el aire ambiente fuera de los límites del predio de las fuentes de emisión estudiadas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1	
1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Problema a resolver.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación del proyecto.....	3
CAPÍTULO 2	
2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Antecedentes de la investigación	4
2.2. Bases teóricas	5
2.2.1. Meteorología	5
2.2.2. Topografía	10
2.2.3. Contaminantes atmosféricos	10
2.2.4. Emisión	13
2.2.5. Inventario de emisiones.....	14
2.2.6. Calidad del aire o Inmisión	18
2.2.7. Modelos de dispersión de contaminantes (inmisión).....	20
2.3. Normativa de la calidad del aire.....	22
CAPÍTULO 3	
3 MARCO METODOLÓGICO	24
3.1. Alcance de la investigación.....	24
3.2. Método de elaboración del Inventario de emisiones para el sector Aeroportuario	26
3.2.1. Técnicas de recolección de datos.....	29
3.2.2. Técnicas de procedimiento y análisis de datos.....	29
3.3. Método de elaboración de Inventario de emisiones para el sector Portuario 33	
3.3.1. Técnicas de recolección de datos.....	39

3.3.2.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	41
3.4.	Modelización de la calidad del aire	49
3.4.1.	Datos de entrada para la modelización.....	50
3.4.2.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	52
CAPÍTULO 4		
4	RESULTADOS.....	56
4.1.	Resultados esperados	56
4.2.	Resultados obtenidos	56
4.2.1.	Inventario de emisiones para Aeropuerto	56
4.2.2.	Inventario de emisiones para Puertos.....	60
4.2.3.	Modelización	65
CAPÍTULO 5		
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1.	Conclusiones	75
5.2.	Recomendaciones.....	76

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

AAG	Autoridad Aeroportuaria Guayaquil
ACI	Airports Council International (Consejo Internacional de Aeropuertos)
AERMOD	American Meteorology Society - Environmental Protection Agency Regulatory Model (Modelo Regulatorio de la Agencia de Protección Medio Ambiental - Sociedad de Meteorología Americana)
AFWA	Air Force Weather Agency (Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea)
APG	Autoridad Portuaria Guayaquil
ASOTEP	Asociación de Terminales Portuarios Privados del Ecuador
CAMAE	Cámara Marítima del Ecuador
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
EDMS	Emissions and Dispersion Modeling System (Sistema de Modelización de Dispersión y Emisiones)
EEA	European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme (Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación)
FAA	Federal Aviation Administration (Administración de Aviación Federal)
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite (Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental)
IATA	International Air Transport Association (Asociación Internacional de Transporte Aéreo)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organización de Aviación Civil Internacional)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Gubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)

IMO	International Marine Organization (Organización Marítima Internacional)
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
JJO	José Joaquín de Olmedo
LTO	Landing / Take off (Aterrizaje / Despegue)
MM5	Modelo de Pronóstico Meteorológico de Meso-Escala de Quinta Generación
NCAR	National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional para Investigación Atmosférica)
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NEI	Inventario Nacional de Emisiones.
NFR	Nomenclature for Reporting (Nomenclatura para presentación de informes)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)
OMS	Organización Mundial de la Salud
SPTMF	Secretaría de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Misión de topografía de radar de Transbordador Espacial)
UNECE	The United Nations Economic Commission for Europe (La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa)
US EPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América)
TAGSA	Terminal Aeroportuaria de Guayaquil Sociedad Anónima
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
WRF	Weather Research and Forecasting (Investigación y Pronóstico Climático)

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
3D	Tercera Dimensión
BFO	Bunker Fuel Oil
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
FE	Factor de Emisión
FEs	Factores de emisión
g	Gramos
GEIs	Gases de Efecto Invernadero
GT	Gross Tonnage (Tonelaje Bruto)
h	horas
HSD	High speed diesel
Km	Kilómetros
Kg	kilogramos
KW	Kilowatts
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
MCR	Maximum Continuous Rating
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gas Oil
min	Minutos

MSD	Medium Speed Diesel
N/A	No aplica
No.	Número
NO	Óxido de Nitrógeno
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
PM ₁₀	Material Particulado de diámetro menor o igual a 10 µm
PM _{2.5}	Material Particulado de diámetro menor o igual a 2.5 µm
R.O.	Registro Oficial
s	Segundos
SO ₂	Dióxido de Azufre
SO _x	Óxidos Sulfúricos
SSD	Slow Speed Diesel
Ton	Toneladas métricas
TSP	Total Suspended Particles (Partículas suspendidas totales)
µg	microgramos
µm	Micrómetro / Micrón
UTM	Universal Transverse Mecator (Mercator universal transverso)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Emisiones atmosféricas en aeronaves.....	4
Figura 2.2 Emisiones atmosféricas en buques.....	5
Figura 2.3 Estación meteorológica.....	6
Figura 2.4 Estación meteorológica automática.	7
Figura 2.5 Comparación de tamaño de las partículas de PM.....	12
Figura 2.6 Partículas primarias y secundarias.	13
Figura 2.7 Confiabilidad de la estimación vs costos.....	18
Figura 2.8 Proceso de mejora continua de la calidad del aire.	19
Figura 3.1 Ubicación de Aeropuerto y Puertos en Guayaquil.....	25
Figura 3.2 Puertos concentrados en el sector sur-oeste de Guayaquil.	26
Figura 3.3 Árbol de decisión para metodología de elaboración de inventario de emisiones para el sector Aeroportuario.....	27
Figura 3.4 Naves Arribadas a Guayaquil 2019.....	35
Figura 3.5 Árbol de decisión para metodología de elaboración de inventario de emisiones para el sector Portuario.....	36
Figura 3.6 Captura de Pantalla de la página principal de WebGIS.....	51
Figura 3.7 Ingreso de datos en AERMOD para la modelización	52
Figura 3.8 Captura de Pantalla de archivo “Source-Parameters.xls” con la data ingresada para simular las emisiones de CO para el Aeropuerto JJO.	53
Figura 3.9 Visualización de simulación de fuentes de emisiones referentes a los ciclos LTOs, exportado desde AERMOD VIEW a Google Earth.	54
Figura 3.10 Representación conceptual de la simulación de emisiones referentes a los ciclos LTO en el aeropuerto JJO (Wayson et al., 2003).....	54
Figura 3.11 Captura de Pantalla de archivo “Source-Parameters.xls” con la data ingresada para simular las emisiones de NO _x para puertos.	55
Figura 4.1 Aporte de contaminantes emitidos por las aeronaves en el aeropuerto JJO, año 2018.	57
Figura 4.2 Aporte de contaminantes por tipo de aeronave para el aeropuerto JJO.	58
Figura 4.3 Análisis de contribución por tipo de aeronave.	59
Figura 4.4 Aporte de contaminantes emitidos por los buques en los puertos para el año 2018.	61
Figura 4.5 Análisis de contribución por categoría de nave.	62
Figura 4.6 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NO _x , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	66
Figura 4.7 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 Año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NO _x , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	67

Figura 4.8 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	68
Figura 4.9 Mapa de Iso-Concentración promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO _x , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	69
Figura 4.11 Mapa de Iso-Concentración promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO _x , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	70
Figura 4.12 Mapa de Iso-Concentración promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM ₁₀ , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	71
Figura 4.13 Mapa de Iso-Concentración promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM ₁₀ , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación para estabilidad atmosférica de Pasquill – Gifford.....	9
Tabla 2. Criterio para definir clase de estabilidad atmosférica de Pasquill – Gifford.	10
Tabla 3. Normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente.....	23
Tabla 4. Ciclo LTO de referencia.....	31
Tabla 5. Factores de emisión del Nivel 1 para Aviación Civil (Locales, LTO).	31
Tabla 6. Modelos asumidos como equivalente por cada tipo de nave faltante.....	33
Tabla 7. Ubicación Geográfica de Puertos en Guayaquil.....	34
Tabla 8. Motor principal instalado como función de los Gross Tonnage (GT) de las naves.....	43
Tabla 9. Potencia Media para Motor principal, asumida para el cálculo.....	44
Tabla 10. Potencia Media para Motor principal, asumida para el cálculo.....	44
Tabla 11. Tiempo de Hoteling Medio, asumido para el cálculo.....	45
Tabla 12. Tipo de motor y tipo de combustible asumido según estadísticas de Flota mundial 2010.....	46
Tabla 13. Estimación de porcentaje de carga de motor principal y auxiliar para cada fase de la navegación.....	46
Tabla 14. Cantidad arribos de embarcaciones consolidado dentro del área de dominio en el año de 2018.....	47
Tabla 15. Cantidad arribos de embarcaciones por puertos o grupo de puertos dentro del área de dominio en el año de 2018.....	48
Tabla 16. Porcentajes de asignación asumidos para desagregar emisiones de TPH.....	49
Tabla 17. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para los ciclos LTO del Aeropuerto JJO, año 2018.....	56
Tabla 18 Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para las fases Manoeuvring y Hoteling por categoría de nave, año 2018.....	60
Tabla 19. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para CONTECON, año 2018.....	63
Tabla 20. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para ANDIPUERTO, año 2018.....	63
Tabla 21. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para BANANAPUERTO, año 2018.....	64
Tabla 22. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para TPG, año 2018.....	64
Tabla 23. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para FERTISA, año 2018.....	65
Tabla 24. Análisis cualitativo de concentración máxima promedio de contaminantes versus Legislación Vigente (TULSMA).....	73

Tabla 25. Análisis cualitativo de concentración máxima promedio de contaminantes versus Legislación Vigente (TULSMA) para los sectores de la ciudadela FAE y Universidad Estatal de Guayaquil.	74
---	----

CAPÍTULO 1

1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más críticos a nivel mundial, y está ligado fuertemente al desarrollo económico en el mundo. La contaminación en la atmósfera proviene de emisiones de fuentes naturales o antropogénicas. Las emisiones de fuentes antropogénicas son provocadas por las actividades del ser humano y pueden ser muy simples o complejas y van desde la siembra y cultivo de plantas, hasta el manejo de medios de transporte. Así como la economía ha crecido velozmente en los últimos 50 años, así también el uso de medios de transportes. Se considera que la contribución total de las emisiones de los aviones a las emisiones antropogénicas globales de CO₂ es aproximadamente el 2% (IPCC, 1999).

La ciudad de Guayaquil es conocida como una de las más importantes de Ecuador por tener uno de los puertos con mayor movimiento de mercancías en América Latina y El Caribe, ubicándose en el año 2019 en séptimo lugar del ranking de la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (Cepal) la misma que considera 118 puertos y zonas portuarias para su evaluación (El Universo, 2019). Así mismo, el aeropuerto internacional José Joaquín de Olmedo es considerado el mejor Aeropuerto en su categoría en América Latina y el Caribe (de 2 a 5 millones de pasajeros anuales) según el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI) (Tagsa, 2021).

Las emisiones atmosféricas más comunes de estos medios de transportes se componen por monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), y material particulado (PM). Las altas concentraciones de estos compuestos pueden producir un efecto negativo para el medio ambiente y la salud humana. Debido a esto, su concentración máxima a nivel de piso en el aire ambiente que puede ser respirada por el ser humano es controlada por normativas que varían en cada país. Para el caso de Ecuador las normativas referentes a la calidad del aire se encuentran en el TULSMA Libro VI Anexo 4. Así también, la Organización Mundial de la Salud (OMS) propone valores límites que aplican en cualquier contexto y se pueden tomar como referencia.

Cuando se evalúan los niveles de contaminación atmosférica, se pueden realizar distintas técnicas de monitoreo de la calidad del aire para poder determinar las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, sin embargo, estas técnicas varían en costo. La técnica más precisa es la de muestreo en campo a través de estaciones de monitoreo, pero su elevado costo limita poder aplicarlo de forma efectiva y constante. Es debido a esto que se utilizan los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Para poder aplicar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos es necesario contar con un inventario de emisiones de contaminantes de calidad por lo que se realizan procedimientos estandarizados para la estimación de las emisiones.

1.2. Problema a resolver

Uno de los problemas ambientales identificados en los sectores aéreos y marítimos es la falta de caracterización de emisiones a la atmósfera provocadas en los puertos y aeropuertos. Para el caso de Guayaquil, el último inventario encontrado del aeropuerto José Joaquín de Olmedo (JJO) fue publicado en el año 2008 (Efficacitas Consultora Cía. Ltda., 2008), luego, en el año 2013, se realiza un trabajo de titulación cuyo objetivo fue actualizar el inventario existente con datos del año 2012 y aplicar el modelo EDMS de la “Federal Aviation Administration” (FFA) de Estados Unidos (Neira Ruiz, 2013). En el caso de los puertos de Guayaquil, se halló un trabajo de titulación del año 2014 que identifica los niveles de contaminación por combustible fósil generada por los buques que atracan en el Puerto Marítimo de Guayaquil, a través de un inventario de gases de efecto invernadero y aplicando la metodología que propone el “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) 2006 con datos de estudio del 2005 al 2011 (Zambrano Mera, 2014), sin embargo, este estudio no brinda un inventario completo de actividades.

Debido a los escasos datos de monitoreo de la calidad del aire existentes a la presente fecha en la ciudad de Guayaquil, se hace necesario aplicar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos que nos permita evaluar el impacto sobre la calidad del aire de la ciudad de las emisiones provenientes del sector portuario y aeroportuario. Para ello, se requiere en primer lugar estimar las emisiones generadas en ambos sectores.

Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estimar el impacto de las principales fuentes de emisión de las actividades desarrolladas en los puertos y el aeropuerto de la ciudad de Guayaquil aplicando un modelo de dispersión de contaminantes que permita la evaluación de la calidad del aire en la ciudad.

1.2.2. Objetivos específicos

- Levantar información referente de las actividades desarrolladas dentro del aeropuerto y los puertos de la ciudad de Guayaquil para la sistematización de las fuentes significativas.
- Elaborar un inventario de emisiones estimativo, de las actividades dentro del aeropuerto y puertos de la ciudad de Guayaquil empleando la metodología de factor de emisiones.

- Aplicar un modelo de dispersión de contaminantes tipo gaussiano, para la elaboración de mapas de concentración de contaminantes a partir del inventario de emisiones del aeropuerto y puertos marítimos de la ciudad de Guayaquil.
- Analizar los resultados obtenidos para la identificación de las áreas donde pudiera presentarse la mayor afectación en la calidad del aire, considerando la acción de las fuentes de emisión significativas identificadas durante la elaboración del inventario de emisiones correspondiente a los puertos y el aeropuerto de la ciudad de Guayaquil.

1.3. Justificación del proyecto

En base a las investigaciones realizadas sobre “Inventario de emisiones de contaminantes del aire producidas por el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo de la ciudad de Guayaquil mediante la aplicación del modelo “Emissions and Dispersion Modeling System” (EDMS)” (Neira Ruiz, 2013), “Identificación de la contaminación atmosférica generada por buques de carga en el puerto de Guayaquil” (Zambrano Mera, 2014), “Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008” (Guevara Vilardell, 2010), “Estimating of shipping emissions in the Samsun port from 2010 to 2015” (Alver et al., 2018) y la guía para estimación de emisiones “Emission Guidebook 2019” de la “European Environment Agency” (EEA) (EMEP, 2019); se ha logrado entender la problemática causada a la calidad del aire provocada por las operaciones de puertos y aeropuertos donde se transportan cargas y/o personas por medio de buques y aeronaves en todo el mundo. En la literatura existente se indica que estos dos medios de transporte han presentado un incremento en su uso o afluencia, incrementando consigo sus aportes nocivos en la calidad del aire en sus medios circundantes. En términos de contaminación, las emisiones producidas por ambos sectores son consecuencia, en su mayor parte, por la combustión de los combustibles fósiles.

Finalmente, todos los estudios apuntan a la necesidad de realizar inventarios de emisiones y modelos de dispersión de contaminantes, con la finalidad de obtener una mayor comprensión de la dinámica de la contaminación atmosférica y contribuir a la toma de decisiones para mejorar la calidad del aire.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

El sector aéreo ha evolucionado, mejorando su eficiencia, disminuyendo así el consumo de combustible con la creación del jet fuel y el control legislativo impuesto por las entidades medio ambientales en cada país, lo que ha contribuido a la disminución de los aportes por vuelo, al calentamiento global, ocasionado por este sector de transporte. Por otro lado, en el sector marítimo, el uso de combustibles de baja calidad con altos contenidos de azufre, la falta de medidas correctivas y falta de controles legislativos ha mantenido sin cambio aparente el impacto de las emisiones sobre el calentamiento global y sobre la contaminación al aire en general.

Según la documentación publicada, se ha logrado determinar que los contaminantes emitidos principalmente, por tipo de transporte, son:

- Tráfico aéreo: Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Dióxido de Azufre (SO_2) (EMEP/EEA, 2019b).

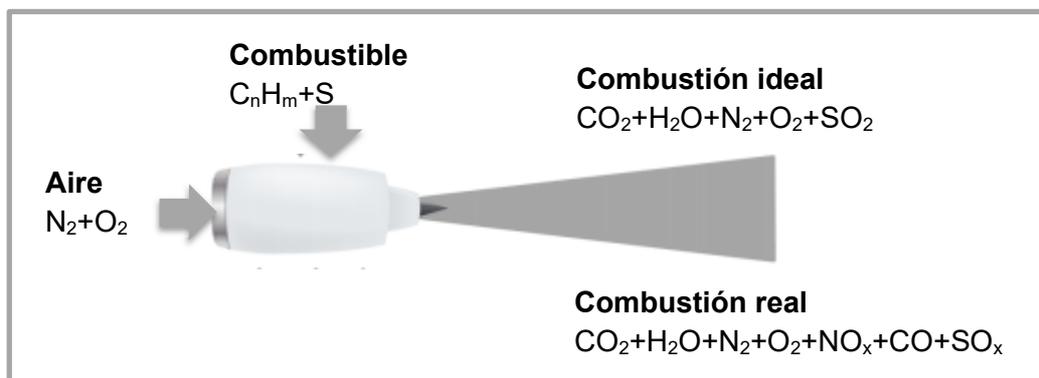


Figura 2.1 Emisiones atmosféricas en aeronaves.

Fuente: Adaptado del Libro Guía de Inventario de Emisiones "Emission Inventory Guidebook - 1.A.3.a Aviation 2019" (EMEP/EEA, 2019b).

Elaborado por: Autores, 2021.

- Tráfico marítimo de carga (buques): Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x) y Material Particulado menor a diez micrones PM_{10} (EMEP/EEA, 2019c).

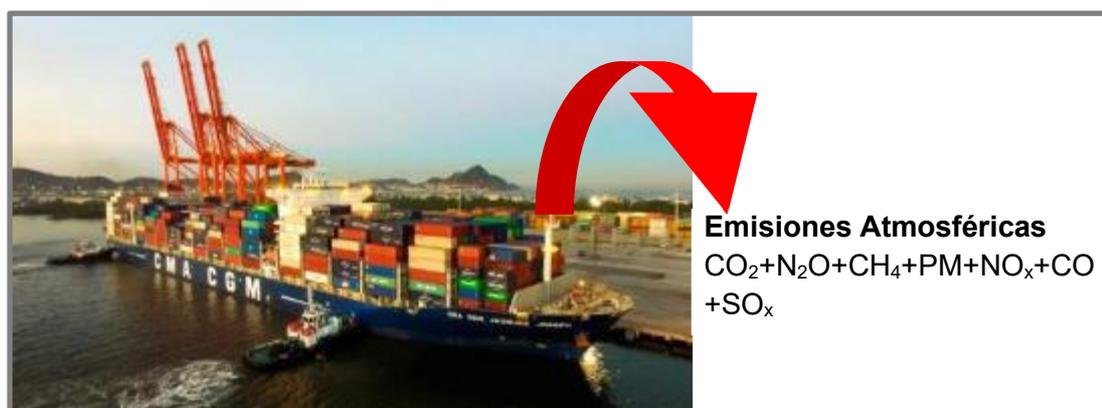


Figura 2.2 Emisiones atmosféricas en buques.
Fuente: Revista T21MX – Puerto de Contecon (T21 & Zanela, 2020).
Elaborado por: Autores, 2021.

Considerando el potencial de aportes al calentamiento global y la probable disminución de calidad del aire en ciudades donde se presenta actividad intensa del sector aeroportuario y portuario, se decide investigar la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil con la finalidad de identificar los lugares más afectados debido a la operación de puertos y aeropuertos en esta ciudad, además de establecer así una línea base, para la elaboración de planes de acción en favor de la comunidad, en el caso de ser requeridos. En la ciudad de Guayaquil la principal actividad económica se da en el puerto, pero existen pocos estudios relacionados a determinar la contaminación atmosférica provocada por este sector. Para el caso del aeropuerto de Guayaquil, el último inventario de contaminantes realizado fue en el año 2008 como parte del Estudio de Impacto Ambiental realizado para obtener la licencia ambiental para las operaciones y actividades del aeropuerto (Efficacitas Consultora Cía. Ltda., 2008).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Meteorología

La meteorología se ocupa de los estudios físicos, químicos y dinámicos de la atmósfera y de sus efectos sobre la superficie terrestre, los océanos y la vida que habita en la tierra. Las variables meteorológicas que tienen que ver con el modelo de dispersión de contaminantes del presente trabajo de titulación son: dirección del viento, velocidad del viento, temperatura ambiente, presiones atmosféricas, humedad relativa, precipitación, nubosidad y líneas de corriente.

Dispersión es el término que se aplica a los contaminantes del aire y se refiere a los procesos de dilución, transporte y transformación química que les ocurren a los contaminantes en la atmósfera. Es por esto que la dispersión de los contaminantes se ve influenciada por la topografía del área y la meteorología de la zona.

La recopilación de datos meteorológicos es fundamental para la modelización de la dispersión de contaminantes atmosféricos. Los datos meteorológicos se pueden medir a través de equipos e instrumentos que se colocan en una estación meteorológica. Las estaciones meteorológicas son de tipo mecánica o automática.

Las estaciones de tipo mecánica realizan los registros de las diferentes variables de forma continua, esta información es recopilada a horas establecidas del día por una persona u observador meteorológico.



Figura 2.3 Estación meteorológica.

Fuente: Campus Sur de la Universidad politécnica salesiana, Quito (INAMHI & Universidad Politécnica Salesiana, 2017).

Las estaciones automáticas realizan los registros de las diferentes variables a través de instrumentos meteorológicos electrónicos con sensores que se conectan a una unidad central donde la información es almacenada y procesada automáticamente, es decir, no es necesaria la presencia de una persona para recolectar la información. Luego, la información recolectada, es enviada a dispositivos de transmisión de datos que pueden ser radios, módems y conexiones de internet, también se pueden enviar los datos satélites geoestacionarios (GOES). Los equipos pueden ser instalado en una torre a 2 metros o 10 metros de altura dependiendo de los parámetros que se van a medir.



Figura 2.4 Estación meteorológica automática.

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI, 2017)

Elaborado por: Autores, 2021.

Es importante mantener un monitoreo y mantenimiento de estos instrumentos para el correcto funcionamiento y almacenamiento de datos.

Pronóstico Meteorológico

Se puede obtener información meteorológica usando modelos de pronósticos meteorológicos, entre ellos, el Modelo de Investigación y pronóstico del tiempo (WRF por sus siglas en inglés) y el Modelo Meteorológico de Mesoescala de quinta generación (MM5) que realizan predicciones numéricas del tiempo establecido para la investigación atmosférica y/o aplicaciones operativas. Existen muchas instituciones que han contribuido y siguen contribuyendo al desarrollo de este tipo de modelos de pronóstico con el objetivo de lograr un avance en el entendimiento de procesos atmosféricos y los pronósticos del tiempo.

Este tipo de modelos son útiles cuando no existen estaciones meteorológicas disponibles en el área de estudio, los datos de la estación están desactualizados, no hay datos disponibles para el periodo de tiempo de estudio, entre otros.

El modelo MM5 fue desarrollado por la Universidad de Pensilvania de Estados Unidos y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos. Se considera un modelo que integra todos los avances realizados en modelización meteorológica. El modelo WRF fue desarrollado por varias entidades entre las cuales están el NCAR, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Center for Environmental Prediction (NCEP), el Earth System Research Laboratory (ESRL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory (NRL) el Center for Analysis and Prediction Storms (CAPS) y la Federal Aviation Administration (FAA) (NSF et al., 2020). Tienen un código abierto por lo que puede ser adaptado a cualquier tipo de sistema operativo y puede ser utilizado en varias aplicaciones como la modelización de la calidad del aire. Su principal objetivo es convertirse en una herramienta de trabajo en modelización mesoescalar de nueva generación recopilando avances generados en la aplicación de modelos antiguos.

Este tipo de modelos se diferencian de las estaciones meteorológicas ya que pueden calcular velocidades bajas del viento con la misma precisión que las altas velocidades, esto es útil para el caso de los aeropuertos donde el enfoque se da en las altas velocidades ya que esto puede afectar a las aeronaves. Esto es de interés para el modelado de la dispersión de contaminantes en el aire ya que las concentraciones más altas se dan a menudo a bajas velocidades del viento (Lakes Environmental, 2021).

Rosa de los vientos

La rosa de los vientos es una representación del sistema de referencia cartesiano donde se encuentra la orientación de la superficie terrestre y se añaden puntos laterales y colaterales que son los puntos medios de las cuatro direcciones básicas del sistema cartesiano (Norte, Sur, Este y Oeste); en donde se indican datos de la dirección de los vientos de un lugar y periodo de tiempo dado, así también, pueden indicar los rangos de la velocidad y dirección del viento.

Altura de capa de mezcla

La altura de capa de mezcla es la representación de la altura máxima del volumen de aire que se encuentra disponible para la dispersión y transporte de los contaminantes emitidos desde las diferentes fuentes, es decir, la altitud hasta la cual los contaminantes pueden tener consecuencias locales del área determinada. Los contaminantes liberados se mezclarán hasta la altura de la capa de mezcla. Para fines de evaluación de la calidad del aire, los ciclos LTO son por debajo de la altura de la capa de mezcla que de acuerdo a ICAO es aproximadamente 914 metros. Los contaminantes emitidos por debajo de esta altura probablemente tengan mayor efecto en las concentraciones a nivel del terreno (Organización de Aviación Civil Internacional, 2020).

Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica describe la tendencia del aire a permanecer en su posición original o a elevarse, se ve fuertemente influenciada por la relación temperatura – elevación ya que los gradientes de temperatura se pueden usar para determinar el grado de estabilidad del aire en la atmosfera haciéndolo elevar o descender.

Se denomina condición estable a la inhibición del movimiento vertical del aire y condición inestable al movimiento vertical del aire, existen condiciones neutrales donde no ocurren movimientos verticales del aire.

En condiciones estables extremas ocurre el fenómeno de inversión que es cuando el aire frío cercano a la superficie terrestre queda atrapado por una capa de aire cálido, prácticamente impide la circulación vertical del aire, lo que se relaciona con las altas concentraciones de los contaminantes en el aire ambiente ya que las inversiones inhiben la dispersión de las plumas.

Pasquill y Gifford proponen un esquema para cuantificar la estabilidad atmosférica en 6 clases de estabilidad cuyo criterio de selección se basa en la Radiación solar y la nubosidad como se muestra en las tablas 1 y 2 a continuación.

Tabla 1. Clasificación para estabilidad atmosférica de Pasquill – Gifford.

Clases	Descripción
A	Muy inestable
B	Moderadamente inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutral
E	Ligeramente estable
F	Estable

Fuente: Air Pollution Control (Control de la contaminación del aire) (Cooper, 2011).
Elaborado por: Autores, 2021.

Tabla 2. Criterio para definir clase de estabilidad atmosférica de Pasquill – Gifford.

Velocidad del viento u(m/s) ^a	Día			Noche	
	Radiación Solar			Nubosidad	
	Fuerte ^b	Moderada ^c	Ligera	Nuboso (≥4/8) ^d	Despejado (≤3/8) ^e
<2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B - C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente: Air Pollution Control (Control de la contaminación del aire) (Cooper, 2011).

Elaborado por: Autores, 2021.

Notas

a: Mediciones a 10 m de altura.

b: Día de verano despejado con el sol más arriba de los 60° por encima del horizonte.

c: Día de verano con pocas nubes o día despejado con el sol a 35 – 60° por encima del horizonte.

d: Anochecer de otoño o día de verano nublado con el sol 15 – 35° por encima del horizonte.

e: Parcialmente cubierto de nubes.

f: Toma valores promedio de dispersión de dos clases.

2.2.2. Topografía

La topografía del área de estudio es muy importante en la dispersión de contaminantes ya que tiene influencia sobre la velocidad y dirección del viento. El Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es un modelo de elevación digital y resultado de un proyecto dirigido por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) disponible en la red. SRTM tiene datos de elevación de la mayor parte del mundo generando así una base de datos topográfica digital de alta resolución (NASA, 2021).

2.2.3. Contaminantes atmosféricos

Se llaman contaminantes atmosféricos a aquellas sustancias químicas o condiciones físicas, que provienen de fuentes naturales o antropogénicas con el potencial de afectar de forma negativa la salud, el confort y/o el bienestar del hombre y/o el medio ambiente. Existen contaminantes que son emitidos directamente de las fuentes y se llaman contaminantes primarios y existen contaminantes que se forman al reaccionar contaminantes primarios con otras sustancias de la atmósfera y estos toman el nombre de contaminantes secundarios.

Los contaminantes emitidos afectan la calidad del aire de la zona y, a través de corrientes de aire, su dispersión en la atmósfera puede afectar zonas aledañas en varios kilómetros durante un prolongado tiempo.

Se llama contaminante criterio a aquellos contaminantes que, por sus efectos nocivos en la salud y el bienestar de las personas y el ecosistema son considerados como referencias y tienen estandarizado un valor máximo de concentración permitido a nivel de suelo en el aire del ambiente para diferentes periodos de tiempo. Los contaminantes criterio evaluados para este trabajo de titulación tanto para tráfico aéreo, como tráfico marítimo son:

Tráfico aéreo: CO, NO_x y SO_x.

Tráfico marítimo de carga (buques): CO, NO_x, SO_x, PM₁₀.

a) Monóxido de Carbono (CO)

El CO es considerado uno de los mayores contaminantes en la atmósfera. Es un gas inodoro e incoloro que se forma por la combustión incompleta de combustibles fósiles, es decir, la quema de estos combustibles sin la presencia de oxígeno suficiente para formar CO₂. Se considera altamente peligroso y tóxico para el ser humano ya que, al ser inhalado, en grandes cantidades, impide que el oxígeno en la sangre entre al organismo y esto puede causar daño a los tejidos e incluso la muerte.

Sus principales fuentes de emisión son los automóviles y otros vehículos y maquinarias que queman combustible fósil (US EPA, 2016a).

b) Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son un importante grupo de gases contaminantes altamente reactivos, entre los más contaminantes están el Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y el Óxido de Nitrógeno (NO), siendo el NO₂ el de mayor afectación para la salud humana y el medio ambiente. El NO₂ es utilizado como indicador para el grupo más grande de óxidos de nitrógeno (US EPA, 2016b).

Los NO_x son generados por las altas temperaturas durante procesos de combustión, y al mezclarse con agua, oxígeno u otra sustancia química puede formar lluvia ácida (US EPA, 2016b). Estos óxidos son capaces de destruir el ozono durante su permanencia en la estratósfera, por tal motivo, la aviación agrava el efecto al inyectar esta sustancia directamente a la estratósfera.

c) Óxidos de Azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre son gases que se originan en las combustiones de los combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón, petróleo y algunos derivados. Las principales fuentes de emisión de los óxidos de azufre son las centrales térmicas, los procesos industriales y el tránsito de automóviles. Los óxidos de azufre más relevantes son el dióxido de azufre (SO₂) y trióxido de azufre (SO₃); siendo el SO₂ el que permanece con concentraciones más elevadas en la atmósfera. Existen otras fuentes más pequeñas de SO₂ que incluyen barcos, otros vehículos y equipo pesado que queman combustibles con alto contenido de azufre.

El SO_2 es un gas incoloro de olor fuerte que en concentraciones altas contribuye a la lluvia ácida, lo que daña el ecosistema; también es irritante para el sistema respiratorio y podría causar dificultad para respirar, además, puede dañar árboles y plantas. Las altas concentraciones de este contaminante en el aire conducen a la formación de otros óxidos de azufre, lo que puede provocar reacciones con otros compuestos y formar material particulado lo que ocasiona también contaminación y problemas de salud (US EPA, 2019).

d) Material Particulado (PM)

Los materiales particulados son partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidos en el aire, por ejemplo: hollín, aerosoles, neblinas, humos o polvos. Algunos PM son de color oscuro y de tamaño apreciable a la vista del ser humano, pero existen otras que son tan diminutas que solo pueden observarse a través de microscopios electrónicos. Generalmente se reportan los siguientes tamaños:

- PST, diámetro es menor o igual a 100 micrómetros.
- PM_{10} , diámetro es menor o igual a 10 micrómetros.
- $\text{PM}_{2.5}$, diámetro es menor o igual a 2.5 micrómetros.

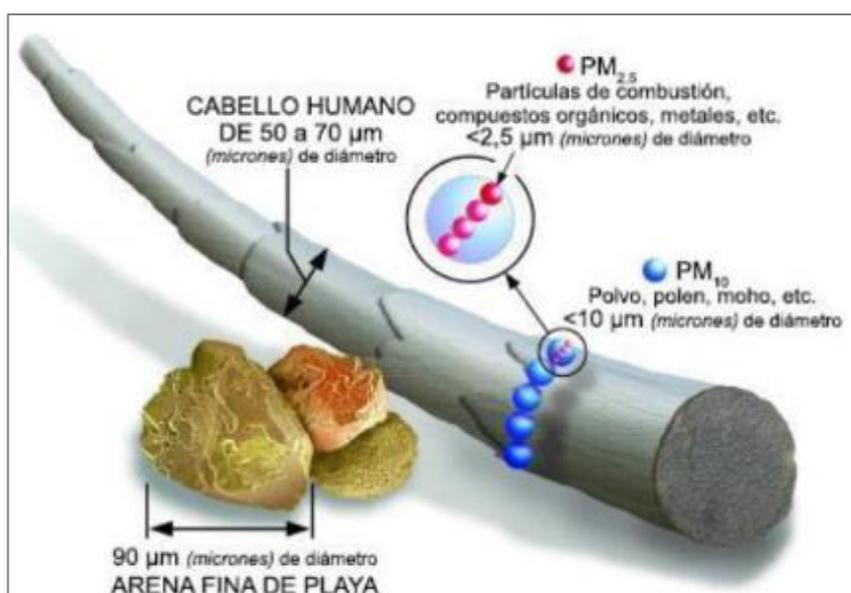


Figura 2.5 Comparación de tamaño de las partículas de PM.
Fuente: US-EPA, 2020 (US EPA, 2020).

Las partículas con diámetro mayor a 100 micrómetros no son consideradas como emisiones al aire ya que por su peso tienden a depositarse de forma rápida. Los PM son emitidos desde varios tipos de fuentes, pero también se pueden formar en la atmósfera como resultado de reacciones químicas.

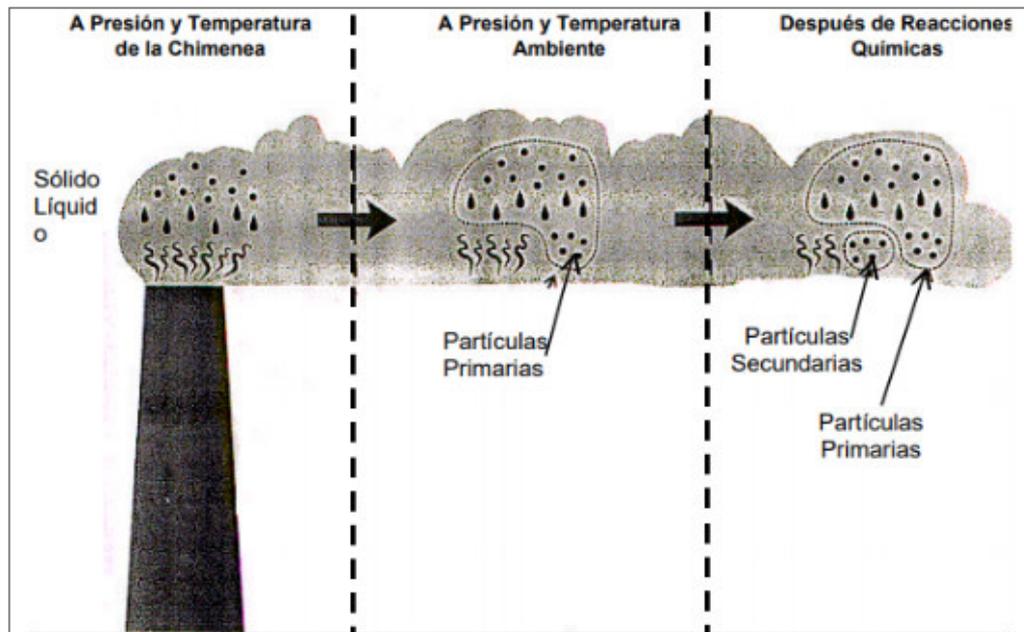


Figura 2.6 Partículas primarias y secundarias.

Fuente: Fundamentos de Inventarios de Emisiones (US EPA, BAC, et al., 1997).

Los PM_{10} son partículas tan pequeñas que al inhalarse logran alojarse en los alveolos pulmonares y provocar problemas serios de salud. Así también las $PM_{2.5}$ provocan deterioro en la visibilidad (bruma). Las partículas pueden viajar con las corrientes de viento largas distancia y depositarse en suelo o agua causando daños ambientales dependiendo de la composición química del PM.

2.2.4. Emisión

Se considera emisión a toda descarga de contaminación hacia la atmósfera que son provocadas por la actividad del hombre.

Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión pueden agruparse en dos categorías que son: fuentes fijas y fuentes móviles.

a) Fuentes fijas

Instalación o conjunto de instalaciones donde se desarrollan procesos industriales, comerciales o de servicio donde se emiten contaminantes a la atmósfera. Entre las fuentes fijas, tenemos:

- Fuente Puntual

Son fuentes de emisiones dadas en una ubicación conocida representada por coordenadas (x,y) que indica el punto de emisión principal. Ejemplo: plantas industriales o electricas.

- Fuente de Área

Fuentes que son muy numerosas o pequeñas para ser identificadas individualmente como fuentes puntuales o cuyas emisiones provienen de una gran area. Ejemplo: bosques, áreas residenciales y actividades administrativas/comerciales en áreas urbana.

Las fuentes de área pueden ser representadas por cuadrículas con celdas de tamaño identico, este tipo cuadrícula se caracteriza por coordenadas geográficas en el centro o esquina de la cuadrícula y una definición del tamaño de cada celda.

- Fuentes Naturales

Toda emisión causada por la actividad microbiana en suelos y océanos, por procesos abióticos y por la vegetación son fuentes naturales, entre las que tenemos:

- Las erupciones volcánicas.
- El aerosol de sal marina.
- Las plantas emitiendo compuesto orgánico volátil (COV).
- Emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales.

b) Fuentes móviles

Se denominan fuentes móviles a todo transporte a motor y vehículo automotor. Existen fuentes móviles que circulan por carreteras como automóviles y camiones; y las fuentes móviles que no circulan por carretera que son: aeronaves, trenes, embarcaciones marítimas comerciales, equipo agrícola, equipos para construcción y equipos recreativos.

2.2.5. Inventario de emisiones

Un inventario de emisiones atmosféricas es la compilación de datos que a través de sumatorias consolidan las emisiones de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero (GEIs) según el tipo de fuente, cantidad y tipo de contaminante emitido, el área geográfica y el intervalo de tiempo que se determine para el estudio (United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1999). El inventario de emisiones atmosféricas nos deja conocer la cantidad de fuentes existentes, los contaminantes que emiten y que cantidad fue emitida.

Algunos de los objetivos de los inventarios de emisiones atmosféricas se enlistan a continuación:

- Informar y orientar a las personas de interés para la toma de decisiones relacionadas a la protección del medio ambiente y el cuidado de la salud.
- Evaluar y formular estrategias para prevenir y controlar la contaminación del aire.
- Evaluar el desempeño ambiental según las emisiones atmosféricas para una actividad.
- Modelar la dispersión de los contaminantes en el aire.
- Diseñar sistemas de control y vigilancia de calidad del aire.

Un inventario de emisiones puede desarrollarse con dos enfoques que son: “de arriba hacia abajo” (top down) y “de abajo hacia arriba” (bottom up). La selección del enfoque que se dará al inventario depende de la calidad de información recopilada y el alcance planteado.

Inventario “Top Down “

Se parte de información general para llegar a información específica de las emisiones que se requieren.

Inventario “Bottom Up”

Se parte de información específica o detallada para llegar a información más general de las emisiones que se requieren. Para el desarrollo de este trabajo de titulación se escoge el enfoque Bottom Up.

Técnicas para estimar emisiones

La estimación de emisiones atmosféricas para el desarrollo de inventarios es clave para lograr una mejor gestión y monitoreo de la calidad del aire. Estimar las emisiones y desarrollar un inventario requiere de una actualización continua ya que esta información es la base para determinar estrategias de control y normas nacionales, entre otros beneficios.

Es importante partir de un manual de inventarios para poder desarrollar estimaciones de emisiones consistentes. Los manuales de inventarios deben ser estandarizados y actualizados continuamente. De acuerdo al Manual del Programa de Inventarios de Emisiones de México, desarrollado por la US EPA (US EPA et al., 1996), existen seis técnicas básicas de estimación de emisiones identificadas que son:

a) Muestreo en la fuente

Se realizan mediciones directas de las concentraciones de contaminantes en un volumen de gas conocido y de la tasa de flujo del gas en la chimenea. Generalmente se utilizan para fuentes de emisiones de combustión.

Los contaminantes pueden ser medidos a través de equipos de medición, métodos y procedimientos que están estandarizadas por la EPA y constan en el TULSMA, Libro VI – Anexo 3.

b) Modelos de emisión

Se desarrollan ecuaciones cuando las emisiones tienen relación con varios parámetros, en el caso de tener cálculos complejos se emplea el uso de computadores. Existen modelos computarizados que recomienda la US EPA como TANKS que se utilizan para la estimación de emisiones.

La exactitud de la estimación de un modelo de emisión depende de la calidad de los datos que se ingresan y los supuestos que se toman como base, es por eso que antes de seleccionar una técnica de estimación de inventario se deben analizar la disponibilidad de datos.

c) Factores de emisión

Es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera y la unidad de actividad asociada. La actividad realizada son datos basados en procesos o en censos. La publicación AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42 Recopilación de Factores de Emisión de Contaminantes del Aire) (US EPA, n.d.) y el documento “Air Pollutant Emission Inventory guidebook 2019” (Libro guía para inventario de emisiones de contaminantes al aire 2019)(EMEP/EEA, 2019e) son las fuentes más completas de factores de emisión de contaminantes criterio en Estados Unidos y en Europa, respectivamente.

Los factores de emisión (FEs) se expresan como la masa del contaminante por unidad de masa, volumen, distancia o duración de la actividad que emite este contaminante (US EPA & Ciolek, 2013).

Para el caso de aviación y navegación, la actividad se mide en cuanto al número de operaciones ya sean arribos y despegues o arribos y zarpes. Para la estimación de emisiones, en el aeropuerto y puertos de Guayaquil, se utilizará el método de factores de emisión. Actualmente, no se cuenta con una base de datos de factores de emisión de las actividades en puertos y aeropuertos en Guayaquil, sin embargo se aplicará la técnica de factores de emisión desarrollados en la guía para inventario de emisiones del “Programa Europeo de Evaluación y Monitoreo (EMEP por sus siglas en inglés) y la Agencia europea de Medio Ambiente (EEA por sus siglas en inglés)” (EMEP/EEA, 2019e). Los métodos de cálculo de emisiones sugeridos por la EMEP están estratificados en 3 niveles tanto para aeropuertos como para puertos de acuerdo al “Emission Inventory guidebook 2019” (EMEP/EEA, 2019c) (EMEP/EEA, 2019b).

La guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP / EEA proporciona orientación sobre la estimación de emisiones de fuentes de emisiones antropogénicas y naturales. Es un programa con base científica y orientado a políticas bajo el convenio de La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) sobre la contaminación atmosférica fronteriza a gran distancia. El manual está diseñado para facilitar los reportes de inventario de emisiones.

- Encuestas

Se realizan cuestionarios con el objetivo de recopilar datos de emisiones, generalmente para fuentes puntuales y fuentes de área.

- Balance de materiales

Se utilizan las mediciones de todos los componentes de un proceso, excepto el aire, para determinar las emisiones al aire. Son empleados para fuentes de evaporación de solventes.

- Extrapolación

Se extrapolan las emisiones de una fuente dada a otra basándose en un parámetro de escalamiento conocido por ambas fuentes.

El monitoreo de las emisiones con la técnica de muestreo en la fuente proporciona información lo más confiable posible, pero su implementación conlleva una alta complejidad e inversión inicial junto con sus costos agregados por mantenimiento, razón por la cual, para el presente trabajo de titulación se ha optado por el uso del método de factor de emisiones, con el cual se obtienen estimaciones de confiabilidad adecuada a un costo mucho menor, según se muestra en la figura 2.7. Así también, el uso de esta técnica facilita el poder realizar la modelización de la calidad del aire para diferentes tipos de fuentes, ya sea, de forma aisladas y/o todas juntas.

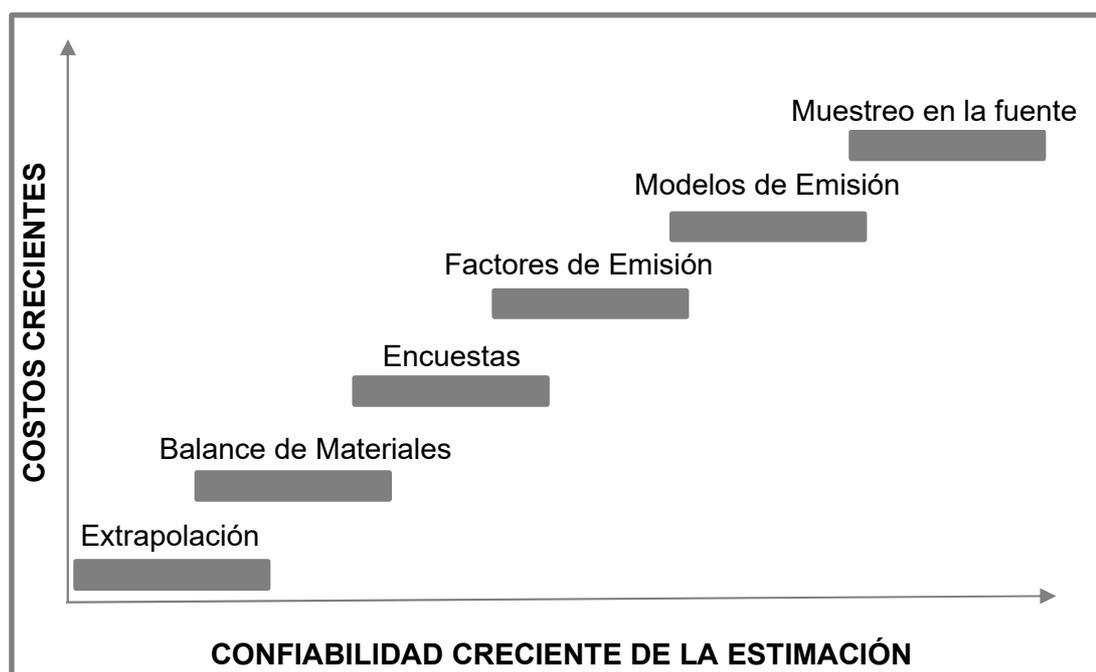


Figura 2.7 Confiabilidad de la estimación vs costos.

Fuente: Adaptado del Manual del Programa de Inventarios de Emisiones de México, Volumen 3 – Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones (US EPA et al., 1996).

Elaborado por: Autores, 2021.

2.2.6. Calidad del aire o Inmisión

Es importante establecer la diferencia entre emisión y calidad del aire o inmisión. Tal como se indica en el punto 2.2.3., se considera emisión a la concentración de un contaminante emitido desde una fuente, mientras que la calidad del aire tiene que ver con la concentración de un contaminante que existe a nivel de suelo en el aire ambiente y que puede ser respirado por el ser humano. Es por esto que existen diferentes técnicas de muestreo y análisis para emisiones e inmisiones.

Los monitoreos sirven como herramientas para identificar y evaluar problemas en la calidad del aire, y junto con los modelos de predicción e inventarios de emisiones se puede mejorar la gestión de la calidad del aire. Es importante reconocer que una correcta gestión en la calidad del aire requiere información continua, confiable y de calidad.

El objetivo principal del monitoreo de la calidad del aire es proporcionar esta información a los científicos, legisladores y planificadores para que se tomen las decisiones adecuadas en pro de una mejor gestión de la calidad del aire.

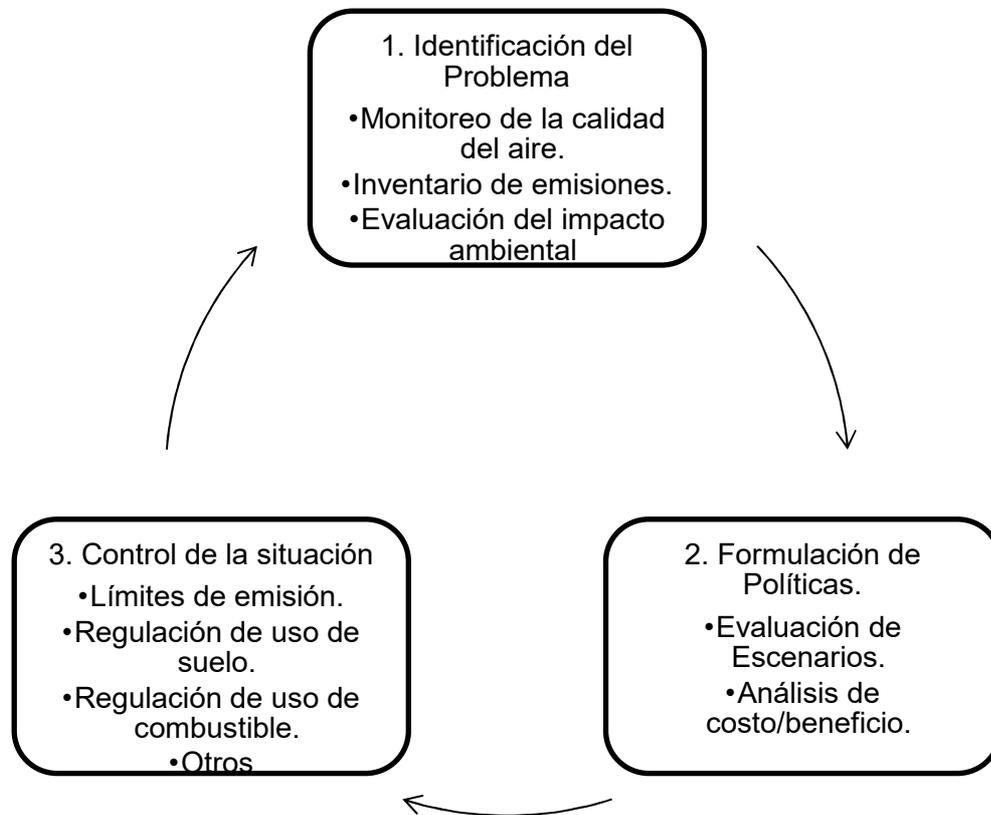


Figura 2.8 Proceso de mejora continua de la calidad del aire.

Fuente: Adaptado de Principios de Medición de la Calidad del Aire (Ine et al., 2016)

Elaborado por: Autores, 2021.

Técnicas de monitoreo

Para realizar el monitoreo de la calidad del aire se han desarrollado dos técnicas principales que son la de muestreo y modelización.

a) Muestreo

El muestreo de la calidad del aire se refiere a la medición de la contaminación del aire ambiente por medio de tomas de muestras de forma discontinua o continua.

Los métodos continuos implican captar y analizar el contaminante en el punto de muestreo de forma automática y continua a lo largo de un año. Este tipo de muestreo puede ser definido para diferentes periodos o en tiempo real.

Los métodos discontinuos implican captar el contaminante en el punto de muestreo, el transporte hacia el laboratorio donde será analizado y finalmente el análisis de la muestra de acuerdo con estándares y metodologías establecidas. Este tipo de muestreo puede ser periódico o puntual. El muestreo periódico se puede realizar por periodos estacionales, mensuales o un día de cada ocho días. El muestreo puntual se realiza un día y horas determinadas.

La elección del método de muestreo se debe basar en los objetivos de control, tiempo de resolución y presupuesto disponible, una elección incorrecta de equipos puede resultar en el fracaso de la meta.

b) Modelización

La modelización matemática de la calidad del aire es una herramienta eficaz para evaluar el impacto de las emisiones. Es una metodología sistemática y comprobada que ha tenido gran éxito en el entendimiento y descubrimiento de procesos en la naturaleza. Cuando existe una fuente que emite contaminantes a la atmósfera, se utilizan frecuentemente modelos de dispersión para evaluar la calidad del aire y el impacto de dichas emisiones sobre el medio ambiente y la salud de las personas. La modelización se ha implementado en una gran variedad de problemas ambientales. Existen muchos modelos diseñados para cualquier tipo de tarea que se pueda plantear, como la identificación de una localización óptima para un proyecto, el tratamiento de aguas residuales, pero es mucho más empleado para el modelamiento de la calidad del aire.

2.2.7. Modelos de dispersión de contaminantes (inmisión)

Un modelo de dispersión es una representación matemática para simular el comportamiento de los contaminantes cuando se dispersan en la atmósfera, que son emitidos a través de una o varias fuentes y que se ven influenciados por condiciones meteorológicas y topográficas de la zona.

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos generalmente necesitan emisiones por hora del contaminante emitido. Para modelar la dispersión de las emisiones de contaminantes, además de los inventarios de emisiones, se requieren de datos meteorológicos y de topografía del terreno del dominio de modelización a estudiar.

a) Escala Temporal

La mayor parte de las emisiones varían con el tiempo. Debido a esto se podría necesitar el reporte de estas emisiones en forma anual, mensual, diaria y horaria para así poder tener promedios más representativos de la calidad del aire en la zona de estudio.

b) Localización espacial

Se refiere al dominio geográfico del inventario y la resolución espacial que se utilizará para la modelización. El dominio del inventario se refiere al sector geográfico en donde se van a inventariar las fuentes de los contaminantes del aire. A veces, se hace necesario tratar fuentes externas al dominio definido, ya que, por el transporte meteorológico suelen tener influencia dentro del dominio establecido.

La escala o unidad en que se reporta el inventario de emisiones se conoce como resolución espacial. En general, la resolución espacial para las fuentes se realiza utilizando una malla cuadrículada, donde el tamaño de la celda está determinado por la exactitud que se quiere para la calidad del aire. El tamaño de la celda guarda relación con el tamaño del dominio, es decir, cuando el dominio es grande, las celdas suelen tener varios kilómetros por lado, y cuando el dominio es pequeño, las celdas podrían tener algunos cientos de metros por lado. Las fuentes serán ubicadas geográficamente usando coordenadas de longitud y latitud o coordenadas UTM (US EPA, WGA, et al., 1997).

Existen varios tipos de modelos que simulan la dispersión de contaminantes en el aire y que son empleados para realizar estimaciones de la concentración de uno o varios contaminantes emitidos desde diferentes tipos de fuentes, entre ellos se tiene:

- **Modelo tipo caja:** El más simple de todos los modelos, supone volumen de aire en forma de caja y que los contaminantes se encuentran distribuidos de manera homogénea.
- **Modelo Gaussiano:** El más antiguo de los modelos y más utilizado, supone dispersión de contaminantes tipo Gaussiana.
- **Modelo Lagrangiano:** Este modelo sigue matemáticamente las parcelas de las plumas y usa un marco de referencia en movimiento.
- **Modelo Euleriano:** Similar al lagrangiano, pero usa a la cuadrícula cartesiana tridimensional fija como referencia en lugar del marco de referencia en movimiento.

Ecuación de la pluma gaussiana

La ecuación de la pluma gaussiana supone que la dispersión del viento es función de la clase de estabilidad y de la distancia viento abajo y aplica la función de densidad de probabilidad para conocer los movimientos y difusión del penacho. Proporciona flexibilidad necesaria para modelar la dispersión de contaminantes. Esta ecuación se adapta para fuentes puntuales, lineales y de área. Para fuentes puntuales se define como:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\}$$

Fuente: Manual sobre la calidad del aire, Pág. 164 (ICAO & Aviaci, 2020).
Elaborado por: Autores, 2021.

AERMOD

Es un modelo de última generación tipo gaussiano de pluma en estado estacionario y es el escogido para desarrollar este trabajo de titulación, mismo que ha sido adoptado por la “Environmental Protection Agency” (EPA) desde el año 2005 como modelo regulatorio. Se ingresará las emisiones estimadas, en el modelo AERMOD para poder conocer de qué forma impactan las emisiones de los contaminantes en la calidad del aire y determinar los niveles de contaminación en los diferentes sectores dentro del área estudiada.

AERMOD simula la dispersión de cada uno de los contaminantes atmosféricos y su deposición. Sus cálculos son realizados considerando las características del terreno (topografía) y presencia de edificios cercanos a la fuente en caso de que aplicara; así también, considera datos meteorológicos de la capa superior atmosférica.

AERMOD View es la plataforma que Lakes Environmental ha diseñado para conceder al usuario mayor facilidad de manejo y recursos como:

- Visualización en 3D de la información de entrada y los resultados.
- Exporta resultados a Google Earth para que el usuario logre observar la dispersión del contaminante sobre el área de interés.
- Modela la dispersión de múltiples sustancias de forma simultánea utilizando la herramienta Multi-Contaminantes (Multi-Chemical)
- Preprocesamiento completo del clima.
- Elabora la gráfica de la rosa de los vientos y frecuencias.
- Genera contornos de iso-concentración automáticamente.
- Recibe información en forma de texto, gráficas o archivos previamente elaborados.
- Aísla el impacto ambiental de las fuentes de emisión una por una o en grupo o grupos a conveniencia del usuario.

2.3. Normativa de la calidad del aire

En el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) Libro VI Anexo 4, se establecen los valores de los límites máximos permisibles de concentración, a nivel de suelo, de los contaminantes criterio en el aire ambiente durante los periodos de tiempo promedio de muestreo determinados para no afectar la salud de las personas y el medio ambiente.

A continuación, se presentan los límites máximos permisibles de calidad del aire para los contaminantes criterio del presente trabajo de titulación:

Tabla 3. Normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente.

Contaminante Criterio	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			
	1 h	8 h	24 h	Anual
Monóxido de Carbono (CO)	30000	10000	-	-
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	200	-	-	40
Dióxido de Azufre (SO ₂)	-	-	125	60
Material Particulado (PM ₁₀)	-	-	100	50
Material Particulado (PM _{2.5})	-	-	50	15

Fuente: TULSMA, Registro Oficial – Edición Especial N°387 del 4 de noviembre del 2015, Acuerdo Ministerial N°97. Libro VI Anexo 4, Pág. 55 (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015a).

Elaborado por: Autores, 2021.

La tabla 3 contiene los valores con los que se debe comparar, los resultados que se obtengan de la modelización de dispersión de contaminantes obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

CAPÍTULO 3

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcance de la investigación

Según lo indicado en los capítulos anteriores, este trabajo de titulación tiene dentro de sus áreas de interés, proveer un mayor entendimiento referente a la influencia ejercida sobre la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil, considerando la operación del terminal aeroportuario José Joaquín De Olmedo operado por TAGSA y de la operación de los terminales portuarios habilitados, ubicados en diferentes sectores de la ciudad concentrados mayormente en el sector sur, entre los cuales se encuentran los terminales conocidos como CONTECON, ANDIPUERTO, BANANAPUERTO, TPG, FERTISA. Con la finalidad de realizar el análisis se ha seleccionado como dominio del estudio para el alcance de este proyecto un área de 50 x 50 km teniendo como punto de referencia al aeropuerto (25 km alrededor del centro).

En el marco de este proyecto de titulación, se han definido dos etapas para su desarrollo:

- Elaboración de inventario de emisiones para el sector aeroportuario y portuario en la ciudad de Guayaquil.
- Modelización de la calidad aire en la ciudad de Guayaquil, mediante la aplicación del modelo AERMOD de US-EPA.

En la etapa de elaboración de inventario de emisiones, se utilizó en términos generales el método de factores de emisión. Los factores de emisión escogidos, fueron recopilados de bibliografía europea (EMEP/EEA, n.d.) de acuerdo con la actividad realizada, información que se encuentra publicada en diferentes guías, desarrollados con el objetivo de proveer una base común para la construcción de inventarios de emisiones. Actualmente, no se cuenta con una base de datos de factores de emisión para las actividades en puertos y aeropuertos de Ecuador, sin embargo, se toma como premisa de este trabajo de titulación, que los factores de emisión publicados, en la guía “Environmental Monitoring, Evaluation and Protection / European Environment Agency” (EMEP/EEA)(EMEP/EEA, n.d.), desarrollados por investigadores de la Unión Europea (EU), pueden ser considerados como base de una aproximación razonable al ser utilizados en Ecuador (EMEP/EEA, 2019c) (EMEP/EEA, 2019b).

Los procedimientos guía aplicados para la construcción de los inventarios de emisiones fueron escogidos de secciones específicas pertenecientes al Emission guidebook 2019 (EMEP/EEA, 2013):

- 1.A.3.a Aviation 2019(EMEP/EEA, 2019b). Guía para elaboración del inventario relacionado a la actividad aeroportuaria.

- 1.A.3.d Navigation (Shipping) 2020(EMEP/EEA, 2019c). Guía para elaboración del inventario relacionado al sector portuario en sus actividades importación y exportación.

Para la modelización de la calidad del aire se utilizó como herramienta el programa AERMOD View versión 9.9.0, desarrollado por Lakes Environmental, el cual tiene integradas funciones que permiten obtener datos topográficos y predicciones meteorológicas, información que es requerida como data de entrada para la ejecución del modelo de dispersión de emisiones AERMOD de US-EPA.

La información técnica fue solicitada a TAGSA, entidad privada que administra y opera el aeropuerto, mediante un oficio. Es importante mencionar que para el presente trabajo de titulación será considerado solo el ciclo LTO (Landing / Take off), no se considera la fase de crucero ya que las emisiones provocadas no afectan directamente al área estudiada.

Así también, se solicitó a la Subsecretaría de Puertos, Transporte Marítimo y Fluvial (SPTMF) mediante un oficio, brindar información técnica y estadística de naves que transitan en los terminales portuarios dentro del dominio utilizado para este trabajo de titulación, incluyendo información como el consumo de combustible de estas naves, tiempos de Hoteling (estadía) y modelos de motor principal y auxiliar de las naves. Para este análisis de inventario se considerarán solo dos de las tres fases o etapas de navegación, considerando así las etapas de estancia y maniobras (Hoteling y Manoeuvering); la operación de crucero no es considerada ya que no afecta directamente a el área de dominio de este trabajo, ya que se efectúa en mar abierto.



Figura 3.1 Ubicación de Aeropuerto y Puertos en Guayaquil.

Fuente: Google Earth.

Elaborado por: Autores, 2021.



Figura 3.2 Puertos concentrados en el sector sur-oeste de Guayaquil.

Fuente: Google Earth.

Elaborado por: Autores, 2021.

3.2. Método de elaboración del Inventario de emisiones para el sector Aeroportuario

El área de dominio para análisis cuenta con un único terminal aeroportuario habilitado para transporte de personal y de carga, con arribos nacionales e internacionales. Este terminal aeroportuario es el Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo (JJO), el cual según información publicada por su operador-administrador TAGSA, tiene una afluencia anual de 2 a 5 millones de pasajeros por año, en el 2018 tuvo un total de aproximadamente 73500 vuelos, se encuentra ubicado dentro del perímetro urbano en el sector noreste de Guayaquil.

A continuación, se presentan algunos datos técnicos del aeropuerto JJO:

- Ubicación en Coordenadas UTM: Zona 17M 624115.00 m E 9761424.00 m S.
- Cantidad de Pistas de aterrizaje y despegue: 1.
- Longitud de la pista: 2680 m.
- Ancho de la pista: 45 m.

Siguiendo la guía 1.A.3.a Aviation 2019 (EMEP/EEA, 2019b), se identifican que existen tres niveles para la realización del inventario, aplicables según la información disponible o el propósito del inventario. El árbol de decisión descrito a continuación es útil para determinar el nivel apropiado para su aplicación.

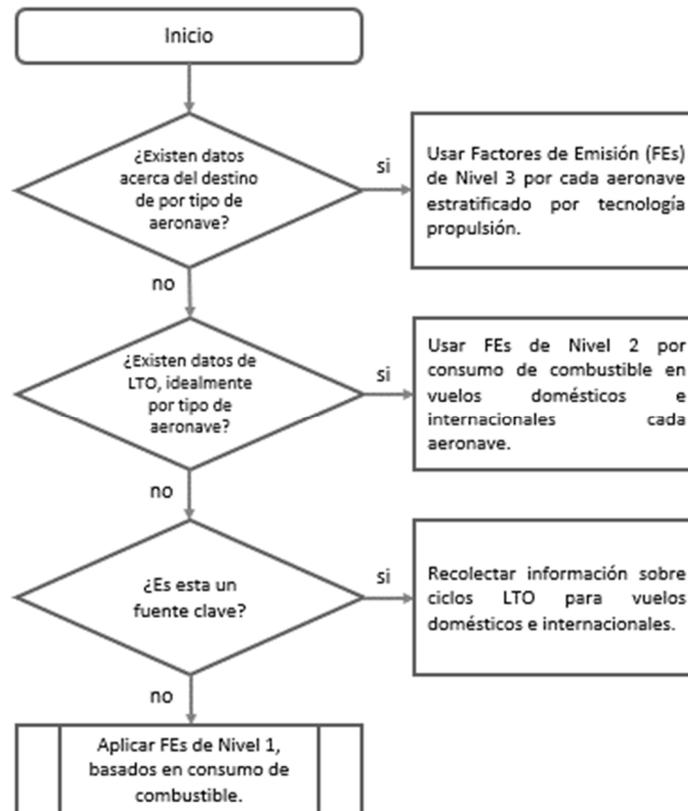


Figura 3.3 Árbol de decisión para metodología de elaboración de inventario de emisiones para el sector Aeroportuario.

Fuente: Traducción de 1.A.3.a Aviation 2019, Pag 14.(EMEP/EEA, 2019b).

Elaborado por: Autores, 2021.

Los datos de entrada de acuerdo con cada nivel son:

Nivel 1

Consiste en una aproximación basada en datos de consumo de combustible en el sector aeroportuario dividido por la cantidad de ciclos LTO para vuelos domésticos e internacionales.

(Ecuación: 3.2-1)

$$E_{pollutant} = AR_{fuel\ consumption} \times EF_{pollutant}$$

$E_{pollutant}$: Emisión anual de contaminantes por fase LTO o CCD de los vuelos domésticos e internaciones.

$AR_{fuel\ consumption}$: Tasa de actividad por consumo de combustible para cada fase de vuelo y tipo de vuelo.

$EF_{pollutant}$: Factor de emisión por contaminante para la correspondiente fase de vuelo y tipo de vuelo.

Nivel 2

Consiste en una aproximación aplicada en el caso que se obtenga la información de los ciclos LTO por cada tipo de aeronave, aunque no se cuente con la información correspondiente las distancias recorridas en el ciclo CCD. Es decir, se usa factores de emisión promedio para los ciclos CCD, estableciéndose como una metodología Top-Down.

Se debe contar con el consumo total de combustible para poder hacer la división entre las etapas LTO y CCD por sustracción.

(Ecuación: 3.2-2)

$$E_{pollutant} = \sum_{Aircraft\ types} (AR_{fuel\ consumption, aircraft\ type} \times EF_{pollutant\ aircraft\ type})$$

$E_{pollutant}$: Emisión anual de contaminantes por fase LTO o CCD de cada tipo de aeronave (modelo).

$AR_{fuel\ consumption, aircraft\ type}$: Tasa de actividad por consumo de combustible para cada fase de vuelo y tipo de aeronave (modelo).

$EF_{pollutant\ aircraft\ type}$: Factor de emisión por contaminante para la correspondiente fase de vuelo y tipo de aeronave (modelo).

Para estimar el consumo de combustible de la fase LTO, se sugiere utilizar el archivo "1.A.3.a Aviation - Annex 5 - LTO emissions calculator 2019"(EMEP/EEA, 2019a), mencionado en la guía.

Nivel 3

Consiste en una aproximación aplicable en el caso que además de contar la información de los ciclos LTO por cada tipo de aeronave, también se cuente con la información correspondiente las distancias recorridas en el ciclo CCD, información que utilizada para efectuar el cálculo de las emisiones atribuibles a esta fase, mediante el uso del archivo "1.A.3.a Aviation - Annex 5 - Master emissions calculator 2019"(EMEP/EEA, 2019a). Se establece como una metodología bottom-Up.

Para estimar el consumo de combustible de la fase LTO, se sugiere utilizar el archivo 1.A.3.a Aviation - Annex 5 - LTO emissions calculator 2019(EMEP/EEA, 2019a), mencionado en la guía, al igual que se efectúa en el nivel 2.

3.2.1. Técnicas de recolección de datos

Contando con el conocimiento previo de que existe únicamente un terminal aeroportuario en el dominio de este trabajo de titulación, administrado y operado por TAGSA, se realizó una solicitud formal de información estadística directamente a esta empresa. La información fue proporcionada a través de correos electrónicos y consta de lo siguiente:

- Estadística mensual del tráfico del aeropuerto JJO para el año 2018, sin incluir subclasificación estadística por tipo de aeronave.
- Movimientos mensuales de pasajeros y aeronaves desde el año 2003 al 2018.
- Estadística anual y datos técnicos por tipo de nave que operaron en el año 2017.
- Tiempos promedios de Taxi-in & Taxi-out, aplicable a todos los ciclos LTOs, sin diferenciación alguna entre modelos.

Variables disponibles en la información recopilada

- Operaciones mensuales de llegada y salida (LTO) en el aeropuerto JJO para el año 2018.
- Datos técnicos de cada tipo de avión que operó en el aeropuerto en el año 2017. Incluyendo tipo de motor típico para cada modelo de avión.
- Tiempo de ocupación de pista de los aviones (Taxi-in y Taxi-out).

3.2.2. Técnicas de procedimiento y análisis de datos

De acuerdo los datos disponibles que fueron proporcionados para el desarrollo de este trabajo de titulación se decidió utilizar el nivel 3, debido a que se recibió información detallada correspondiente a los arribos y despegues ocurridos en el periodo del año 2018, además para el año 2017 se proporcionaron los detalles del tipo y/o modelo de avión utilizado en cada arribo y despegue, con esta información se realizó una extrapolación 2017-2018 ya que, según lo indicado por TAGSA, el comportamiento de distribución por tipo de aeronaves, fue similar tanto en el periodo 2017 como el periodo 2018. Además, el alcance de este proyecto no considera la influencia de la etapa o ciclo de CCD: Climb, Cruise, Descent (Escalado, Crucero, Descenso) debido que sus emisiones asociadas tienen una incidencia baja en la calidad del aire de la ciudad, esto se debe a que la ejecución de esta etapa es desarrollada mayormente fuera del área de dominio de este proyecto.

Para los propósitos del desarrollo de este trabajo de titulación se ha considerado únicamente, el efecto que tienen los ciclos LTO de los vuelos en la calidad del aire, quedando fuera del alcance de este análisis, los equipos de apoyo en tierra, las unidades auxiliares y vehículos tampoco fueron considerados (Makridis & Lazaridis, 2019).

Las magnitudes de emisiones de contaminantes fueron calculadas a través del Anexo 5 (1.A.3.a Aviation - Annex 5 - LTO emissions calculator 2019) del libro guía, las cuales se expresan en [Kg/LTO] y la tasa de actividad AR es reemplazada por el correspondiente número de ciclos LTO por tipo de aeronave, con lo cual se obtienen las emisiones totales para cada tipo de aeronave.

Al usar el LTO emissions calculator 2019-2020, fue necesario proporcionar la información recabada durante el desarrollo de este trabajo de titulación, llenando los siguientes campos:

- **Type of Aircraft:** Tipo de aeronave, indicando modelo y tipo de motor.
- **Taxi out Time:** Tiempo de movilización desde zona de embarque hasta ingreso a pista previo a despegue. Según lo indicado por TAGSA para el aeropuerto JJO, corresponde a 5 min igual a 300 segundos.
- **Taxi in Time:** Tiempo de movilización desde salida de pista hasta zona de desembarque. Según lo indicado por TAGSA para el aeropuerto JJO, corresponde a 5 min igual a 300 segundos.

Así también se llenaron de forma manual los campos referentes a los datos del aeropuerto JJO (incluyendo código ICAO) junto con el periodo de realización del estudio, aunque esto no tiene influencia en el cálculo. Anexo 1 (Captura de pantalla de ingreso de datos).

Una vez completada la información indicada líneas arriba en el LTO emissions calculator 2019, este obtiene de su base de datos integrada, los factores de emisión y consumo de combustible, por cada motor por unidad de tiempo cuando este opera al 100% de su capacidad (máximo thrust), ver anexo 2. Este dato es utilizado para ser multiplicado por el factor de sollicitación de potencia, requerido en cada sub-fase del ciclo LTO, los factores de sollicitación de potencia utilizados corresponden a los valores publicados como referencia ICAO en el documentos Doc 9889.-ICAO Airport Air Quality Manual (ICAO, 2016), mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Ciclo LTO de referencia.

Fase de Operación	Tiempo por Fase [minutos]	% de Potencia Máxima
Aproximación de aterrizaje	4	30
Movimiento hacia Pista / Movimiento desde Pista	26 (Desde pista: 7, Hacia pista: 19)	7
Despegue	0,7	100
Ascenso	2,2	85

Fuente: Traducción de Table 3-A1-1. Reference emissions LTO cycle (ICAO, 2016).
Elaborado por: Autores, 2021.

Además para el cálculo de emisiones de SO_x, se utilizó como premisa la información propuesta por EMEP en la guía de 1.A.3.a Aviation 2019 (EMEP/EEA, 2019b), aplicando el factor de emisión correspondiente según lo indicado en la Tabla 5, aplicable en la metodología de Nivel 1.

Tabla 5. Factores de emisión del Nivel 1 para Aviación Civil (Locales, LTO).

Factores de Emisión Nivel 1					
Combustible: Jet Gasoline and Aviation Gasoline					
Contaminante	Valor	Unidad	95 % de Intervalo de Confianza		Referencia
			Bajo	Alto	
NO _x	4	Kg/Ton de Combustible	2	8	Calculado usando el método del Nivel 2
CO	1200	Kg/Ton de Combustible	600	2400	Calculado usando el método del Nivel 2
NM VOC	19	Kg/Ton de Combustible	9,5	38	Calculado usando el método del Nivel 2
SO _x	1	Kg/Ton de Combustible	0,5	2	Se asume 0,05% S por unidad de masa

Fuente: Traducción de Tabla 3.3 perteneciente al 1.A.3.a Aviation 2019 (EMEP/EEA, 2019b).

Elaborado por: Autores, 2021.

Esta secuencia es repetida para cada tipo de aeronave, con la finalidad de contabilizar los aportes de cada modelo y así obtener el total de emisiones ocasionadas por los ciclos LTOs ocurridos en el aeropuerto JJO, en el periodo estudiado.

Limitaciones

No se obtuvo información referente al consumo de combustible, por tanto, se usaron asunciones basadas en información bibliográfica.

No se obtuvo información de los tiempos registrados durante las sub-fases del ciclo LTO: Take-off, Approach (Despegue, Aproximación respectivamente), razón por la fue necesario efectuar asunciones basadas en información bibliografía.

Se logro obtener únicamente la estadística mensual por tipo de nave del año 2017.

Se tuvieron 64 tipos de naves diferentes que operaron en el aeropuerto JJO en el año 2018, de las cuales 22 no constaban dentro de la base de datos de factores de emisiones, publicadas por EMEP y por ICAO.

Asunciones

Dado que la información de cantidad de vuelos totales anuales, indica un comportamiento de trafico de vuelos similar entre los periodos 2017 y 2018, con una diferencia mínima (Aproximadamente 2%), y dada la información mensual del periodo 2017; se realizó una extrapolación para estimar la cantidad de vuelos mensuales por tipo de aeronave, para el periodo 2018.

Con la finalidad de superar la dificultad relacionada con los tipos de aeronaves que no constaban dentro de las bases de datos, publicadas por EMEP e ICAO, de las cuales no se encontró información referente a sus factores de emisiones, se asumió según lo sugerido en la guía utilizada para la construcción del inventario, asignarle los FEs de los tipos de aeronaves existentes en las bases de datos que contaban con consumo de combustible similar y año de fabricación cercano, al de las aeronaves faltantes, y así poder completar el inventario. Las asunciones realizadas para cada tipo de aeronave faltante en la base de datos, se encuentra en la Tabla 6.

Tabla 6. Modelos asumidos como equivalente por cada tipo de nave faltante.

Modelo de Aeronave Faltante en Base de Datos EMEP	Modelo Asumido como Equivalente	LTO 2018
ATR-42-300	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	2333
ATR-72-200	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	12
BAe ATP	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	95
Beech Super King 200B	LJ60 (Learjet 60)	275
Beech Super King 350	DHC4 (De Havilland Canada DHC-4 Caribou)	298
Beech T-6A Texan	TBM (General Motors TBM Avenger)	12
Bell 206B (*)	TBM (General Motors TBM Avenger)	47
Bell 430 (*)	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	848
C-130 Hercules	E35L (Embraer EMB-135BJ Legacy 600)	23
Cessna 208B	TBM (General Motors TBM Avenger)	1226
Dash 7	DHC4 (De Havilland Canada DHC-4 Caribou)	12
Dash 8-400	J328 (Fairchild Dornier 328JET)	106
DHC-6 Twin Otter	DHC4 (De Havilland Canada DHC-4 Caribou)	134
Dornier 228	DHC4 (De Havilland Canada DHC-4 Caribou)	11
EMB 120	E145 (Embraer ERJ-145ER)	310
EMB Legacy	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	752
Eurocopter AS332 (*)	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	12
Eurocopter AS350 (*)	DHC4 (De Havilland Canada DHC-4 Caribou)	12
Fokker F50	C25A (Cessna 525A Citation CJ2)	21
Pilatus PC-12	TBM (General Motors TBM Avenger)	23
Pilatus PC-21	TBM (General Motors TBM Avenger)	35
Piper PA31 Cheyenne	PA31 (Piper PA-31-300 Navajo)	3614
	TOTAL, LTO Asumidos como Equivalentes	10211

(*) Se asume avión equivalente para el Helicóptero faltante.

Fuente: 1.A.3.a Aviation - Annex 5 - LTO emissions calculator 2019

Elaborado por: Autores, 2021.

El total de LTOs asumidos como equivalentes, representan el 14% de todos los LTOs ocurridos en el periodo 2018.

3.3. Método de elaboración de Inventario de emisiones para el sector Portuario

Dentro del dominio de análisis, se identifican varios terminales portuarios, los cuales reportan actividades a la Subsecretaría de Puertos, Transporte Marítimo y Fluvial

(SPTMF). La actividad portuaria en Guayaquil concentra sus actividades básicamente en los terminales portuarios indicados en la Tabla 7.

Tabla 7. Ubicación Geográfica de Puertos en Guayaquil.

Nombre de Terminal Portuario	Nombre de Operador Portuario	Nombre Simplificado	Ubicación en coordenadas UTM Zona 17M
Autoridad Portuaria de Guayaquil-Terminal de contenedores.	Contecon	Contecon	621354.00m E 9748065.00 m S
Autoridad Portuaria de Guayaquil-Terminal Granel	Andinave	Andipuerto	622175.00m E 9747630.00 m S
Terminal Portuario de Guayaquil	Inarpi	TPG (Fertigran)	619274.00 m E 9751514.00 m S
Terminal Portuario de Bananapuerto	Naportec	Bananapuerto	619486.00 m E 9750952.00 m S
Terminal Portuario Fertisa	Fertisa	Fertisa	621316.00 m E 9750744.00 m S
Terminal portuario Industrial Molinera	Industrial Molinera	Industrial Molinera	623781.00 m E 9754839.00 m S
Terminal Portuario Ecuabulk	Ecuabulk	Ecuabulk	623394.00 m E 9753006.00 m S
Terminal Portuario Ecuatoriana de Granos S.A.	Ecuagran	Ecuagran	624255.00 m E 9752026.00 m S
Terminal Portuario QC terminales Ecuador	QC terminales	QC terminales	624340.00 m E 9751878.00 m S
Terminal petrolero del Salitral	Suinsa	Suinsa	615860.00 m E 9753556.00 m S
Terminal Portuario Internacional Puerto Hondo S.A.	TPI	TPI	609408.00 m E 9757475.00 m S

Fuente: Google Earth.

Elaborado por: Autores, 2021.

Realizando la investigación referente a la intensidad de actividad portuaria de los puertos antes tabulados, se comprende que los terminales portuarios con mayor actividad son los conocidos como: Contecon, TPG, Bananapuerto, Fertisa y Andipuerto, considerando publicaciones realizadas por la Asociación de Terminales Portuarios del Ecuador, (Asotep, 2020).

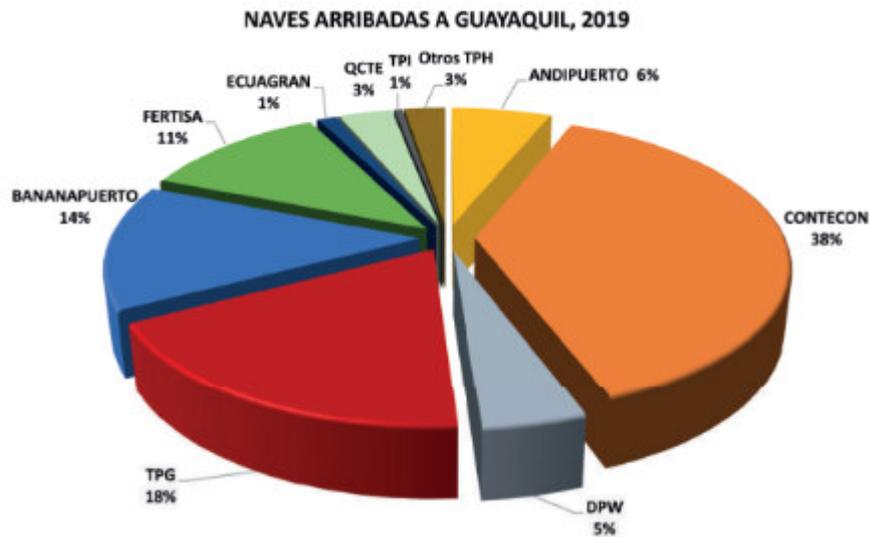


Figura 3.4 Naves Arribadas a Guayaquil 2019.

Fuente: Memoria de Puertos privados, pág. 78 (Asotep, 2020).

Al igual que en el sector aeroportuario, se utilizó la metodología propuesta en el Emission Guidebook 2019 (EMEP/EEA, 2013), aplicando la guía 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019(EMEP/EEA, 2019d), la cual cuenta también con tres niveles, que se aplican según lo descrito en el árbol decisión indicado a continuación:

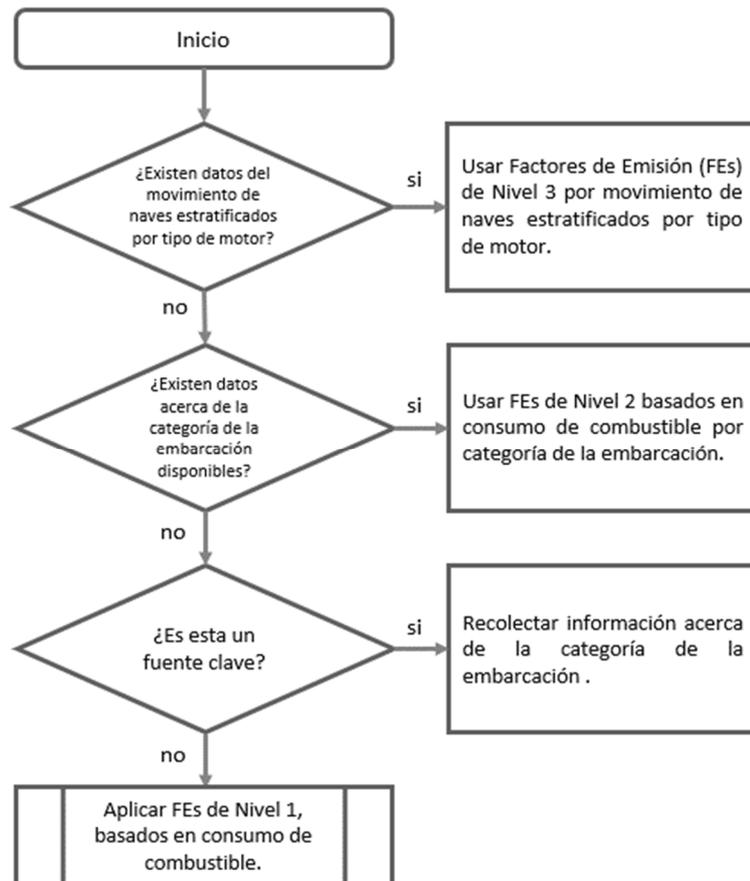


Figura 3.5 Árbol de decisión para metodología de elaboración de inventario de emisiones para el sector Portuario.

Fuente: Traducción de 1.A.3.d Navigation 2019, pág. 12 (EMEP/EEA, 2019d).

Elaborado por: Autores, 2021.

Nivel 1

Consiste en una aproximación basada en datos de consumo de combustible en el sector portuario, agrupado por su uso (Navegación internacional, navegación nacional, pesca, militar, recreacional).

(Ecuación: 3.3-1)

$$E_i = \sum_m [FC_m \times EF_{i,m}]$$

E_i : Emisión del contaminante i en kilogramos.

FC_m : Masa de combustible tipo m vendido en el país de navegación (Ton).

$EF_{i,m}$: Factor de emisión específico para el tipo de combustible utilizado, para cada contaminante i .

m : Tipo de combustible utilizado (Bunker fuel Oil, Marine Diesel Oil, Marine Gas Oil, gasolina).

Nivel 2

Consiste en una aproximación que usa también el consumo de combustible, pero requiere datos específicos que indiquen el tipo de motor en el que es utilizado el combustible. En este nivel es posible hacer diferenciación entre las etapas de la navegación.

(Ecuación: 3.3-2)

$$E_i = \sum_m \left[\sum_j FC_{m,j} \times EF_{i,m,j} \right]$$

E_i : Emisiones anuales del contaminante i en toneladas.

$FC_{m,j}$: Masa de combustible tipo m por embarcación con tipo de motor j .

$EF_{i,m,j}$: Factor de emisión promedio para el contaminante i por embarcación con tipo de motor j usando el combustible tipo m .

Nivel 3

Este nivel a más de considerar lo indicado en el nivel 2, hace diferenciación entre las etapas de la navegación. Expresando las emisiones con la siguiente ecuación:

(Ecuación: 3.3-3)

$$E_{Trip} = E_{Hoteling} + E_{Manoeuvring} + E_{Cruising}$$

Trip = Viaje; Hoteling=Estancia; Manoeuvring=Maniobra o Remolcamento; Cruising=Crucero.

La ecuación correspondiente a este Nivel, para embarcaciones comerciales se expresa como:

(Ecuación: 3.3-4)

$$E_{trip,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p})$$

E_{Trip} : Emisiones en el viaje completo (Ton).

FC : Consumo de combustible (Ton).

EF : Factor de emisiones de la tabla 3-9 del texto guía (EMEP/EEA, 2019c).

i : Contaminante (NOx, NMVOC, PM).

m : Tipo de combustible (Bunker fuel Oil, Marine Diesel Oil/ Marine Gas Oil (MDO/MGO, gasolina).

j : Tipo motor (Slow, Medium, and High-speed diesel, gas turbine and steam turbine).

p : Las diferentes fases de la navegación (Hotelling, Manoeuvring, Cruising).

Además, se ofrece como alternativa en ausencia de información referente al consumo de combustible en la apertura requerida, el uso de la siguiente ecuación:

(Ecuación: 3.3-5)

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p \left[T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p}) \right]$$

E_{Trip} : Emisiones en el viaje completo (g).

EF : Factor de emisiones de la tabla 3-10 del texto guía (EMEP/EEA, 2019c), dependiendo del tipo de embarcación (g/kWh).

LF : Factor de sollicitación de potencia (%).

P : Potencia nominal de motor (kW).

T : Tiempo (Horas).

e : Categoría de Embarcación por tipo de Carga (Carga contenerizada, Carga General, Graneles líquidos, Graneles sólidos, Carga Autotransportable, Pesca, Pasajeros, otros)

i : Contaminante (NOx, NMVOC, PM).

j: Tipo motor (Slow, Medium, and High-speed diesel, gas turbine and steam turbine).

m: Tipo de combustible (Bunker fuel Oil, Marine Diesel Oil/ Marine Gas Oil (MDO/MGO, gasolina).

p: Las diferentes fases de la navegación (Hotelling, Manoeuvring, Cruising).

El tiempo de crucero en caso de ser desconocido se puede estimar como sigue:

(Ecuación: 3.3-6)

$$T_{cruising}(horas) = \frac{Distancia\ recorrida\ (km)}{Velocidad\ Promedio\ de\ Crucero\ \left(\frac{km}{hr}\right)}$$

En este nivel también se presentan ecuación para las embarcaciones pequeñas, pero por estar fuera del alcance de este proyecto no se amplía esta sección en el presente documento.

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

Se solicitó a la Subsecretaria (SPTMF), mediante una petición formal por escrito, se comparta con fines de desarrollo de este proyecto de titulación, información estadística correspondiente al año 2018, indicando datos específicos de actividad y características de las naves que atracaron en cada terminal portuario habilitado, indicando el siguiente detalle:

- Inventario de buques que arriban a cada puerto de Guayaquil (Cantidad por puerto).
- Inventario de buques que zarpan de cada puerto de Guayaquil (Cantidad por puerto).
- Tipo de buque*.
- Tipo de motor principal por buque.
- Tipo de motor auxiliar por buque.
- Combustible por tipo de motor principal.
- Combustible por tipo de motor auxiliar.
- Consumo combustible del motor principal desde su arribo hasta que zarpa.
- Consumo combustible del motor auxiliar desde su arribo hasta que zarpa.
- Tiempo de permanencia del buque desde su arribo hasta que zarpa.
- Tiempo de operación del motor principal desde su arribo hasta que zarpa.
- Tiempo de operación del motor auxiliar desde su arribo hasta que zarpa.

(*) Tipo de buque clasificación por su tipo de carga: Liquid Bulk Ships (Carga de Graneles Líquidos), Dry Bulk Carriers (Carga de Graneles Sólidos), Container (Carga Contenerizada), General Cargo (Carga general), Ro Ro Cargo (Carga autotransportable o rodada), Passenger (Pasajeros o Turismo), Fishing (Pesca), Other (Otros).

En respuesta a la solicitud planteada se recibió el Boletín Estadístico Portuario y Transporte Marítimo del 2018(MTOP, 2018).

El documento antes mencionado cuenta con información agrupada por cada puerto, disponible en Ecuador. Refiriéndose exclusivamente al alcance del presente proyecto es posible extraer información útil, de los siguientes puertos:

- Contecon
- Andipuerto
- TPH (*)
- Salitral

(*) TPH: Terminales Portuarios Habilitados, conformados por: Bananapuerto, Ecuabulk, Ecuagran, Fertigran, Fertisa, Industrial Molinera, NIRSA, Puerto Hondo, QC Terminales.

Luego del análisis respectivo y con la finalidad de complementar la información compartida por la Subsecretaria (SPTMF), la cual fue utilizada para definir la actividad o cantidad de movimientos por categoría de embarcaciones en cada puerto, se contacta a cada Terminal portuario y se solicita información adicional:

- Listado de naves que atracaron durante el año 2018, indicando su código IMO (International Maritime Organization), fecha y hora de atraque.
- Listado de naves que zarparon durante el año 2018, indicando su código IMO, fecha y hora de zarpe.

Con los códigos IMO recabados, se logra obtener datos referentes a la capacidad de almacenamiento de las embarcaciones en “Gross Tonnage” y su tipo de Buque clasificado por su tipo de carga (IMO, 2018). Mientras que la información de fecha, horas de arribos y zarpe es utilizada para obtener un promedio de los tiempos de hoteling (Estancia) para cada embarcación. Cabe recalcar que, durante el desarrollo de este trabajo de titulación, únicamente se logró obtener los códigos IMO de las embarcaciones que atracaron en los terminales portuario operados por Contecon y QC Terminales, lo cuales corresponden a una muestra de la actividad portuaria en Guayaquil, aproximadamente el 38% y 3% de la actividad portuaria respectivamente.

Variables disponibles en la información recopilada.

- Tráfico mensual de Naves clasificadas por su calado al arribo.
- Tráfico mensual de Naves clasificadas por su calado al zarpe.
- Tráfico mensual de Naves clasificadas por su eslora (Longitud de nave).
- Tráfico mensual de Naves clasificadas por su TRB (Tonelaje de Registro Bruto).
- Tráfico mensual de Naves clasificadas por su Tipo de Buque (Carga contenerizada, Carga General, Graneles líquidos, Graneles sólidos, Carga Mixta, No trajo carga, Pasajeros, Visita Oficial).

- Descripción general de equipos de apoyo en tierra sin detallar su régimen de utilización.

Entre otros datos, cantidad de carga movilizada, cantidad de contenedores movilizadas, clasificados por la procedencia de su nave de transporte o naviera, sin considerar su agrupación por tipo de Buque.

No fue proporcionado detalle alguno, referente al consumo de combustible para el sector portuario, ni de forma generalizada, ni agrupada.

Además, se obtuvieron códigos IMO, fechas y horas de arribo y zarpe únicamente para los terminales portuarios operados por Contecon y QC terminales.

3.3.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Aunque no se cuenta con la información estadística completa solicitada, se encuentra viable la aplicación de la metodología del Nivel 3 correspondiente a la guía 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019(EMEP/EEA, 2019d), al emplear supuestos basados en bibliografía, utilizando datos publicados para la flota mundial, con la finalidad de completar de manera estimativa la información faltante.

Según la metodología aplicada para este nivel, es necesario contar con la siguiente información estadística, agrupada por Categoría de embarcación por tipo de carga (**):

- a) Cantidad de tráfico de embarcaciones.
- b) Potencia nominal promedio instalada en la embarcación, segregando en motor principal y motor auxiliar o en su defecto capacidad promedio de las embarcaciones expresada en Gross Tonnage (Tonelaje Bruto).
- c) Tiempo promedio empleado en cada fase de navegación (Cruising, Hoteling, Manoeuvring).
- d) Tecnología (Slow, Medium, High Speed Diesel, gas turbine, Steam turbine) instalada en la embarcación, segregando en motor principal y motor auxiliar.
- e) Tipo de combustible utilizado por la embarcación para su operación (Bunker Fuel Oil, Marine Diesel Oil, Marine Gas Oil).
- f) Factor de carga promedio tomada por el motor principal y motor auxiliar en cada fase de navegación, expresado como porcentaje (%).

(**) Categorías o tipos de Carga: Carga contenerizada, Carga General, Graneles líquidos, Graneles sólidos, Carga Autotransportable, Pesca, Pasajeros, otros.

Para los propósitos de este proyecto se ha considerado únicamente, el efecto que tiene la etapa de la navegación conocida como Hoteling (Estancia) (EMEP/EEA, 2019d) en la calidad del aire, quedando fuera del alcance de este análisis, la etapa de Cruising (Crucero) y Manoeuvring (Maniobra) (Alver et al., 2018), ya que la ejecución de Cruising se desarrolla mayormente fuera del área de dominio y para

manoeuvring el aporte al total de los contaminantes dispersados en la ciudad de Guayaquil para el sector portuario es mínimo.

Limitaciones

No se obtuvo información de la potencia instalada en el motor principal de cada una de las embarcaciones que circularon en Guayaquil en el periodo estudiado, tampoco el tipo de tecnología de propulsión utilizada, ni el tipo de tecnología de su motor auxiliar.

No se obtuvo la información desagregada por categoría de embarcación referida a los tiempos empleados en las diferentes etapas de navegación. Además, no existe información específica de los puertos en Guayaquil, respecto del tipo de combustible utilizado por las embarcaciones, ni tampoco su factor de carga promedio.

No se obtuvo información de movimientos de embarcaciones, desagregada para cada uno de los puertos agrupados, denominados como TPH.

Asunciones

La estimación referente a la potencia instalada en los motores principales y auxiliares de las embarcaciones, se realizó de forma indirecta utilizando la información detallada obtenida para un volumen de información considerable de embarcaciones (muestra representativa superior al 40% del total de arribos y zarpes) compartida por los operadores portuarios Contecon y QC Terminales, mediante la aplicación de las ecuaciones de regresión no lineal propuestas por Carlo Trozzi (Trozzi, 2010) para la flota mundial se logra realizar una aproximación asumida como aceptable. En la tabla 8 se muestra la base de este cálculo.

Tabla 8. Motor principal instalado como función de los Gross Tonnage (GT) de las naves.

Categoría de Embarcación	Flota Mundial 2010
Liquid bulk ships	14,755 x GT ^{0,6082}
Dry bulks carriers	35,912 x GT ^{0,5276}
Container	2,9165 x GT ^{0,8719}
General cargo	5,56482 x GT ^{0,7425}
Ro Ro cargo	164,578 x GT ^{0,4350}
Passenger	9,55078 x GT ^{0,7570}
Fishing	9,75891 x GT ^{0,7527}
Other	59,049 x GT ^{0,5485}
Tugs	54,2171 x GT ^{0,6420}

Fuente: Extracto de la tabla 8, Emission estimate methodology for marine navigation (Trozzi, 2010).

Elaborado por: Autores, 2021.

Se asume que la potencia media o promedio instalada en el motor principal (Main Engine: ME) y los tiempos de Hoteling medios o promedios, obtenidos para cada categoría de embarcación, calculados a partir de la información entregada por Contecon y QC terminales, puede ser utilizada en el resto de los puertos como una aproximación referencial. Se considera también que para estimar la potencia media instalada en el motor auxiliar (Auxiliary Engine: AE) por categoría, es posible emplear la Tabla 3-13, indicadas en la guía 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019 (EMEP/EEA, 2019c). Los supuestos utilizados para los cálculos se indican en las subsiguientes Tablas 9, 10 y 11.

Tabla 9. Potencia Media para Motor principal, asumida para el cálculo.

Categoría de Embarcación	Potencia Media para ME según Flota Mundial 2010 [kW]	Potencia Media para ME según la Muestra de Guayaquil [kW]	Potencia Media para ME Asumida (*) [kW]
Liquid bulk ships	6543	4707	4707
Dry bulks carriers	4397	7804	7804
Container	14871	20355	20355
General cargo	2555	7174	7174
Ro Ro cargo	4194	14062	14062
Passenger	10196	12075	12075
Fishing	734		734
Other	2469	8472	2469
Tugs	2033		2033

Fuente: Autores,2021

Elaborado por: Autores, 2021.

Tabla 10. Potencia Media para Motor principal, asumida para el cálculo.

Categoría de Embarcación	Relación de Potencia AE / ME Flota Mundial 2010	Potencia Media AE Asumida (*) [kW]
Liquid bulk ships	0,30	1412
Dry bulks carriers	0,30	2341
Container	0,25	5088
General cargo	0,23	1650
Ro Ro cargo	0,24	3374
Passenger	0,16	1932
Fishing	0,39	286
Other	0,35	864
Tugs	0,10	203

Fuente: Autores,2021

Elaborado por: Autores, 2021.

Tabla 11. Tiempo de Hoteling Medio, asumido para el cálculo.

Categoría de Embarcación	Tiempo de Hoteling Medio según Flota Mundial 2010 [Horas]	Tiempo de Hoteling Medio según la Muestra de Guayaquil [Horas]	Tiempo de Hoteling Medio según Asumido (*) [Horas]
Liquid bulk ships	38	132	38
Dry bulks carriers	52	54	54
Container	14	25	25
General cargo	39	29	29
Ro Ro cargo	15	22	22
Passenger	14	41	41
Fishing	60		60
Other	27	112	27

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021.

(*) Información asumida para el cálculo del presente inventario de emisiones.

Además para los tiempos de Manoeuvring (Maniobras), se consideran los tiempos indicados en la Tabla 3-14 Assumptions for the average cruise speed and average duration of in-port activities, indicadas en la guía 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019 (EMEP/EEA, 2019c).

También en lo referido al tipo de tecnología considerada como representativa en cada categoría de embarcación, se asume que esta coincide con la tecnología más utilizada según la información publicada para la flota mundial 2010, Carlo Trozzi (Trozzi, 2010), por cada categoría, la asunción efectuada se encuentra detallada en la Tabla 12. Se establece también con fines de cálculos para este trabajo de titulación, que son aplicables los porcentajes de sollicitación de potencia de motor publicados en la Tabla 3-15 Estimated % load of MCR (Maximum Continuous Rating) of Main and Auxiliary Engine for different ship activity, indicada en la guía 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019 (EMEP/EEA, 2019c)(EMEP/EEA, 2019d), la cual corresponde a la Tabla 13 del presente documento.

Tabla 12. Tipo de motor y tipo de combustible asumido según estadísticas de Flota mundial 2010.

Categoría de Embarcación	Tipo de Tecnología de ME instalada Asumida; Tipo de combustible utilizado Asumido.
Liquid Bulk Ships	SSD; BFO
Dry Bulk carriers	SSD; BFO
Container	SSD; BFO
General Cargo	SSD; BFO
Ro Ro Cargo	MSD; BFO
Passenger	MSD; BFO
Fishing	MSD; MDO/ MGO
Other	SSD; BFO
Tugs	HSD; MDO/ MGO

Fuente: Traducción de Tabla 3-7, 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019(EMEP/EEA, 2019d).

Elaborado por: Autores, 2021.

SSD: Slow Speed Diesel (Diesel de Baja Velocidad), MSD: Medium Speed Diesel (Diesel de Media Velocidad), High Speed Diesel (Diesel de Alta Velocidad), GT: Gas Turbine (Turbina de Gas), ST: Steam Turbine (Turbina de Vapor); MDO: Marine Diesel Oil, MGO: Marine Gas Oil; BFO: Bunker Fuel Oil.

Tabla 13. Estimación de porcentaje de carga de motor principal y auxiliar para cada fase de la navegación.

Fase de Navegación	% Carga de MCR en el ME	% Tiempo de ME operando	% load of MCR Auxiliary Engine
Cruising (Crucero)	80	100	30
Manoeuvring (Maniobras)	20	100	50
Hotelling - except tankers (Estancia excepto tanqueros)	20	5	40
Hotelling – tankers (Estancia tanqueros)	20	100	60

Fuente: Traducción de Tabla 3-15, 1.A.3.d Navigation (shipping) 2019 (EMEP/EEA, 2019d).

Elaborado por: Autores, 2021.

También debido a las limitaciones de información recopilada para el desarrollo de este trabajo de titulación, se asume que la tecnología y combustible utilizado en los motores auxiliares AE, corresponde a MSD y MDO/MGO respectivamente, apoyado en la información publicada por US EPA en su guía para la construcción de inventario de emisiones referente a puertos (US EPA, n.d.).

Además, debido a la ausencia de estudios locales, donde se publiquen factores de emisiones para los contaminantes analizados (NOx, CO, SOx, TSP, PM10), se asume que el uso de los factores de emisiones desarrollados y aplicados en la unión europea consiste en una aproximación para estimar el comportamiento de las emisiones referidas al sector portuario del Guayaquil.

Se asume también que la etapa de navegación conocida como cruising (cruce), puede ser excluida de alcance considerado para la construcción del inventario de emisiones, ya que esta etapa es desarrollada fuera del área designada para análisis.

Luego de realizar el análisis respectivo de la data disponible en cuanto actividad, considerando las limitaciones existentes y asunciones antes expuestas, se decidió utilizar los datos indicados en las Tablas 14, 15 y 16, con la finalidad de reflejar de manera estimativa durante la elaboración del inventario de emisiones, la actividad portuaria por categoría de embarcación, ocurrida dentro del dominio de este proyecto de titulación.

Tabla 14. Cantidad arribos de embarcaciones consolidado dentro del área de dominio en el año de 2018.

Cantidad de arribos de embarcaciones Año 2018 Por categoría Consolidados dentro del Área de dominio [Un]	
Categoría	Arribos
Liquid Bulk Ships	166
Dry Bulk carriers	362
Container	1131
General Cargo	119
Ro Ro Cargo	9
Passenger	1
Fishing	0
Other	8
Tugs	0
TOTAL	1796

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021.

Tabla 15. Cantidad arribos de embarcaciones por puertos o grupo de puertos dentro del área de dominio en el año de 2018.

Cantidad de arribos de embarcaciones Año 2018				
Por categoría				
Puertos o Grupo de Puertos en Guayaquil				
[Un]				
Categoría	CONTECON	ANDIPUERTO	TPH (*)	SALITRAL
Liquid Bulk Ships	50	4	44	68
Dry Bulk carriers	41	96	225	0
Container	465	0	666	0
General Cargo	88	28	3	0
Ro Ro Cargo	8	1	0	0
Passenger	1	0	0	0
Fishing	0	0	0	0
Other	1	0	7	0
Tugs	0	0	0	0
TOTAL	654	129	945	68

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021.

(*) TPH: Terminales Portuarios Habilitados, conformados por: Bananapuerto, Ecuabulk, Ecuagran, Fertigran, Fertisa, Industrial Molinera, NIRSA, Puerto Hondo, QC Terminales.

A más de lo expuesto en párrafos anteriores fue necesario realizar asunciones, debido a la limitación ocasionada por la falta de información desagregada para los puertos agrupados, bajo denominación de TPH por la SPTMF. Se utilizó porcentajes (%) de asignación basados en la cantidad de arribos reportados, según la información publicada en el Boletín Estadístico Portuario y Transporte Marítimo del 2018 (MTOP, 2018), con la finalidad de desagregar las emisiones de contaminantes calculadas para los TPH en forma agregada. Ver Tabla 16.

Tabla 16. Porcentajes de asignación asumidos para desagregar emisiones de TPH.

Porcentajes asumidos para Desagregación por cada puerto de TPH	
Nombre simplificado de Terminal Portuario	[%]
Bananapuerto	28.8
Ecuabulk	1.1
Ecuagran	3.0
TPG (Fertigran)	37.5
Fertisa	21.4
Industrial Molinera	0.8
Nirsa	1.0
TPI	0.2
QC Terminales	6.3
TOTAL	100

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021.

3.4. Modelización de la calidad del aire

Una vez definidos los inventarios de emisiones anuales correspondientes a la actividad aeroportuaria y portuaria, en función de las metodologías seleccionadas, se procede a la etapa de modelización de la calidad del aire.

La modelización es llevada a cabo mediante la aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes de tipo gaussiano, para la posterior obtención de mapas de iso-concentración de contaminantes, considerando únicamente las fuentes significativas identificadas durante la construcción de los inventarios de emisiones. El modelo de dispersión seleccionado para aplicación en este proyecto es AERMOD versión 19191 de US-EPA.

Para los propósitos de este trabajo de titulación, se asume que la tasa de emisiones de contaminantes diaria permanece invariable en todos los días del año. Se asume también, para simular los efectos de dispersión en la etapa de modelización de ciclos LTO para el aeropuerto JJO, la asignación de 300 metros medidos desde el nivel de piso, como altura máxima de liberación de contaminantes, es una aproximación razonable, basado en lo documentado mediante artículos científicos como el realizado para el aeropuerto Chania en Grecia (Makridis & Lazaridis, 2019).

Debido a las ventajas de fácil interacción con el usuario y su interfaz gráfica, se utilizó el programa AERMOD View versión 9.9.0, desarrollado por Lakes Environmental para generar un mapa de iso-concentración de contaminantes, con la finalidad de evaluar la calidad del aire afectado por las emisiones de diferentes fuentes en puertos y el

aeropuerto de la ciudad de Guayaquil. AERMOD es el modelo gaussiano adoptado por EPA (US EPA, 2015) que simula la dispersión de los contaminantes en el aire y su deposición, donde se integró la información recopilada y calculada para ambos sectores.

Los contaminantes criterio que se seleccionaron y modelizaron son: CO, NO_x, SO_x y PM₁₀.

El análisis de los resultados obtenidos de AERMOD VIEW, proveen al lector la identificación de áreas con mayor afectación en la calidad del aire, junto con la ubicación geográfica en donde se obtuvo la concentración máxima, datos que fueron utilizados para su comparación con las normativas vigentes (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015b).

3.4.1. Datos de entrada para la modelización

Antes de proceder con la creación del proyecto en AERMOD View, fue necesario efectuar la precarga de data meteorológica correspondiente al área de modelización. Generalmente los datos meteorológicos no se encuentran en una forma que pueda ser cargada directamente en AERMOD, por tanto, la información meteorológica, debe ser pre-procesada en AERMET. Para este proceso se utilizó AERMET View, programa que consiste en una interfaz amigable con el usuario.

Con la ayuda de AERMET es posible realizar el preprocesamiento de los datos meteorológicos, lo cual es realizado en etapas para así poder generar los archivos (*.SFC), (*.PFL) que son los utilizados por AERMOD.

Archivo Superficial (*.SFC): En donde se registran las estimaciones horarias que forman parte de la zona limite planetaria.

Archivo Profile (*.PFL): Corresponde a observaciones en diferentes niveles de la velocidad del viento, su dirección y datos específicos como su temperatura. Además, incluye también los datos estadísticos como lo es la desviación estándar de las fluctuaciones de los componentes del viento.

Los datos meteorológicos utilizados para la modelización fueron obtenidos por un modelo de pronóstico meteorológico de meso-escala de quinta generación (MM5) con datos disponibles para el año 2015, se asumen los mismos datos para el año 2018 debido a que no existen muchas variaciones de año a año. Con esto se generaron los archivos (*.SFC) y (*.PFL) estos son cargados en AERMOD View.

La data topográfica utilizada es descargada a través de WebGIS, en donde es posible encontrar datos para terreno con resoluciones de 30 a 900 m con cobertura para el mundo entero.



Figura 3.6 Captura de Pantalla de la página principal de WebGIS
Fuente: www.webGIS.com

Una vez obtenida la información de AERMET y la data topográfica, se procede a crear el proyecto en AERMOD, donde es necesario ingresar el punto central del área de modelización, para lo cual se selecciona como referencia a las coordenadas correspondientes a la ubicación del aeropuerto JJO, y se ingresa como dominio de modelización 50x50 Km, seleccionando una resolución de la malla con cuadrículas de 1x1 Km obteniendo una malla de 2500 receptores, esta selección del tamaño de las cuadrículas fue asumida, basándose en la publicación de ICAO, Doc 9889: Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos, en donde según su Tabla 5-2, de la página 5-9 (ICAO & Aviación, 2020), se indica que para un enfoque entre simple y avanzado se debe considerar mallas con cuadrículas no menores a 0,5 x 0,5 Km.

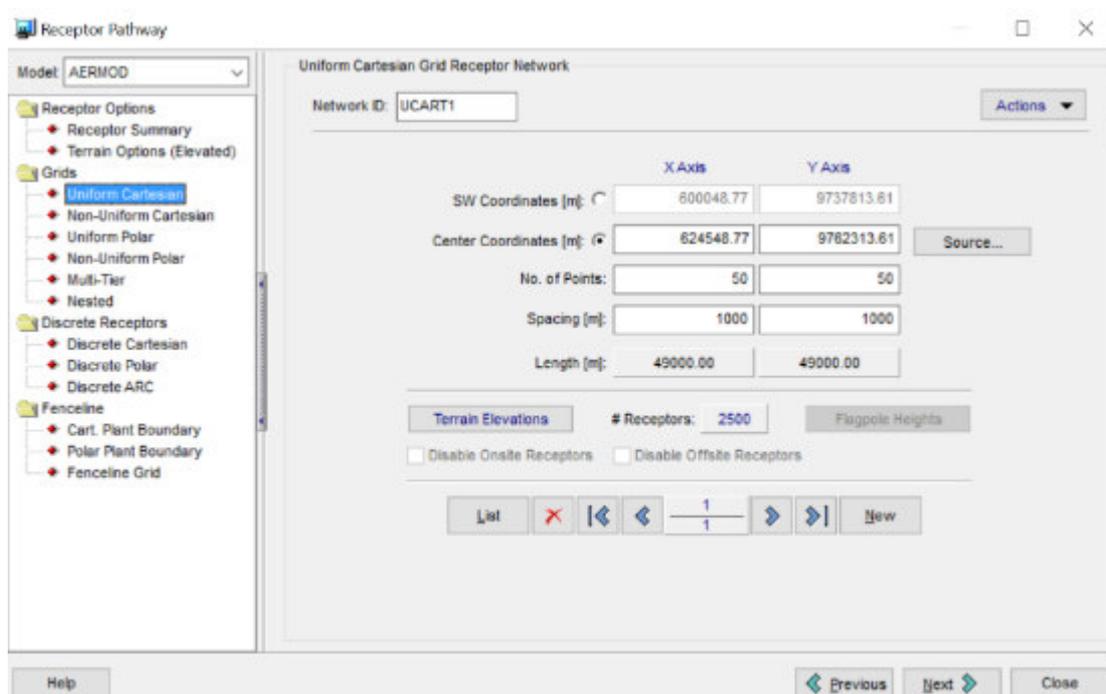


Figura 3.7 Ingreso de datos en AERMOD para la modelización
Elaborado por: Autores, 2021

Luego se procede a importar el mapa de base, el cual es muy útil para visualizar la ubicación de las fuentes de emisión. Después se realiza la selección del tipo de fuente que simule de mejor manera las características de la fuente real, luego de un análisis se decidió modelizar a las fuentes de emisiones ocasionada en puertos, como fuentes puntuales. De manera similar, luego de realizar el análisis respectivo se decidió modelizar a las fuentes de emisiones ocasionadas por el aeropuerto, como fuentes de área colocadas simultáneamente, al inicio se colocan a nivel de piso y luego en forma escalonada hasta alcanzar una altura de 300m (Makridis & Lazaridis, 2019). Finalmente se realiza la conversión de unidades utilizadas para la construcción del inventario de emisiones [Ton/Año], a las unidades solicitadas por AERMOD según el tipo de fuente seleccionado, para el caso de fuentes de área [$g/s/m^2$] y para fuentes puntuales [g/s].

3.4.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Una vez creado el proyecto en AERMOD se procede importar la data para simulación de las fuentes de emisiones en puertos y aeropuertos, para lo cual se utilizó el formato "Source-Parameters.xls", el cual es proporcionado por Lakes Environmental en el paquete de archivos que son ejecutados, al instalar el software AERMOD View.

Para simular las emisiones ocasionadas por los ciclos LTOs en el aeropuerto JJO, correspondientes al periodo 2018, se utilizan fuentes de área con dimensión 200x20m, colocadas en la siguiente configuración: 10 áreas se colocan

simultáneamente a nivel de piso (simulando la etapa de aceleración sobre la pista), seguidas de 15 áreas colocadas una delante de otra, pero con una separación vertical de 20m de altura entre ellas (simulando el take-off o despegue), hasta alcanzar los 300 m de altura, tal como se considera en el modelo conceptual del EDMS desarrollado por FFA, según lo indicado en la página 265, del Manual Técnico de AEDT(Federal Aviation Administration, 2020). A continuación, se muestra una imagen donde se puede visualizar la data ingresada para la simulación de emisiones del contaminante CO, seguido de imágenes que describen el concepto utilizado.

Type	ID	Desc	Height [m]	Release_ Type	Length _X [m]	Length _Y [m]	Rotation Angle [deg]	Emission_ Rate	Num_ Coords	X1 [m]	Y1 [m]
AREA	AEROPTO3_A	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624665.00	9762385.00
AREA	AEROPTO3_B	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624565.00	9762212.00
AREA	AEROPTO3_C	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624465.00	9762039.00
AREA	AEROPTO3_D	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624365.00	9761866.00
AREA	AEROPTO3_E	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624265.00	9761693.00
AREA	AEROPTO3_F	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624165.00	9761520.00
AREA	AEROPTO3_G	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	624065.00	9761347.00
AREA	AEROPTO3_H	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623965.00	9761174.00
AREA	AEROPTO3_I	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623865.00	9761001.00
AREA	AEROPTO3_J	JJO_CO	0	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623765.00	9760828.00
AREA	AEROPTO3_K	JJO_CO	20	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623665.00	9760655.00
AREA	AEROPTO3_L	JJO_CO	40	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623565.00	9760482.00
AREA	AEROPTO3_M	JJO_CO	60	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623465.00	9760309.00
AREA	AEROPTO3_N	JJO_CO	80	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623365.00	9760136.00
AREA	AEROPTO3_O	JJO_CO	100	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623265.00	9759963.00
AREA	AEROPTO3_P	JJO_CO	120	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623165.00	9759790.00
AREA	AEROPTO3_Q	JJO_CO	140	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	623065.00	9759617.00
AREA	AEROPTO3_R	JJO_CO	160	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622965.00	9759444.00
AREA	AEROPTO3_S	JJO_CO	180	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622865.00	9759271.00
AREA	AEROPTO3_T	JJO_CO	200	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622765.00	9759098.00
AREA	AEROPTO3_U	JJO_CO	220	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622665.00	9758925.00
AREA	AEROPTO3_V	JJO_CO	240	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622565.00	9758752.00
AREA	AEROPTO3_W	JJO_CO	260	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622465.00	9758579.00
AREA	AEROPTO3_X	JJO_CO	280	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622365.00	9758406.00
AREA	AEROPTO3_Y	JJO_CO	300	VERTICAL	20	200	30	0.0001621	1	622265.00	9758233.00

Figura 3.8 Captura de Pantalla de archivo “Source-Parameters.xls” con la data ingresada para simular las emisiones de CO para el Aeropuerto JJO.

Fuente: Autores,2021

Elaborado por: Autores, 2021



Figura 3.9 Visualización de simulación de fuentes de emisiones referentes a los ciclos LTOs, exportado desde AERMOD VIEW a Google Earth.

Fuente: Google Earth.

Elaborado por: Autores, 2021

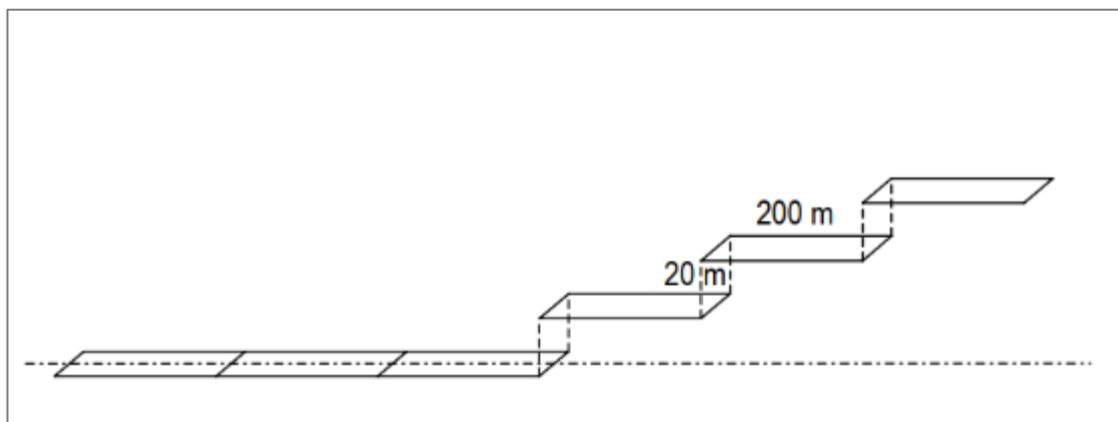


Figura 3.10 Representación conceptual de la simulación de emisiones referentes a los ciclos LTO en el aeropuerto JJO (Wayson et al., 2003).

Fuente: Integration of AERMOD into EDMS Abstract

Elaborado por: Autores, 2021

Así mismo para caso de los puertos, luego de analizar el inventario, se toma la decisión de modelizar únicamente la dispersión de los contaminantes producto de las emisiones provenientes de cinco puertos, conocidos como: Contecon, Andipuerto, Bananapuerto, TPG y Fertisa en donde se concentra la mayor actividad naviera. Con

la finalidad de simular las emisiones provenientes de cada uno de los puertos antes mencionados, se seleccionan fuentes puntuales, colocadas de manera representativa en el sitio de atraque de buques en cada uno de los puertos antes mencionados. A continuación, se muestra imagen donde se puede visualizar la data ingresada para la simulación de emisiones del contaminante NO_x.

Type	ID	Desc	Height [m]	Diam [m]	Exit_Vel [m/s]	Exit_Temp [K]	Release_Type	Emission_Rate	Num_Coords	X1 [m]	Y1 [m]
POINT	BANANAPTO1	BPT_NOX	22	1.2	25	558	VERTICAL	5.00333759	1	619274.00	9750851.00
POINT	FERTIGRAN1	TPG_NOX	22	1.2	25	558	VERTICAL	6.51169672	1	619178.00	9751386.00
POINT	FERTISA1	FTS_NOX	22	1.2	25	558	VERTICAL	3.71571395	1	621244.00	9750733.00
POINT	CONTECON1	CTC_NOX	22	1.2	25	558	VERTICAL	11.24388914	1	621328.00	9747805.00
POINT	ANDIPUERTO1	AND_NOX	22	1.2	25	558	VERTICAL	2.00858453	1	622119.00	9747470.00

Figura 3.11 Captura de Pantalla de archivo “Source-Parameters.xls” con la data ingresada para simular las emisiones de NO_x para puertos.

Fuente: Autores,2021

Elaborado por: Autores, 2021

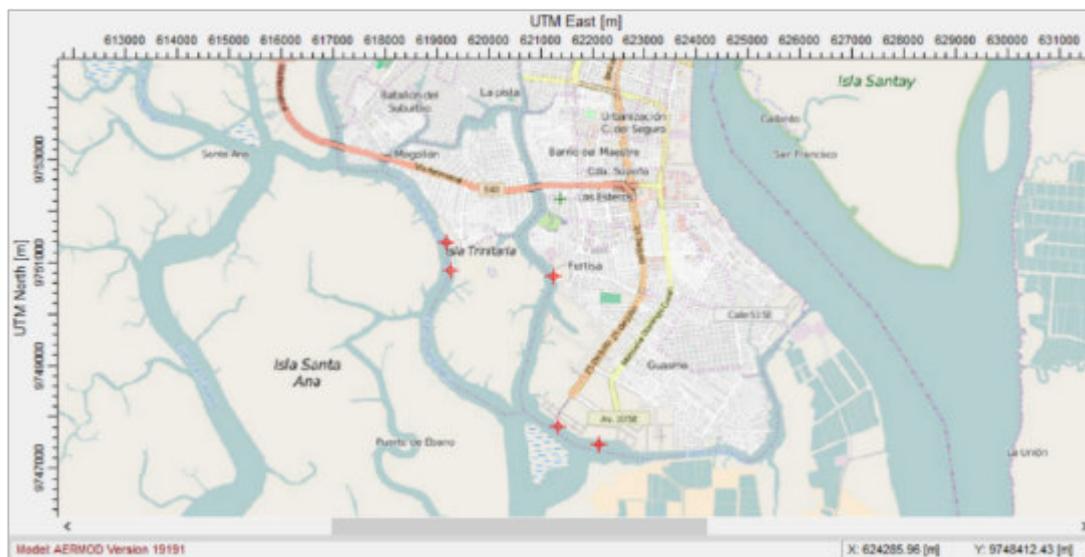


Figura 3.1 Visualización de simulación de fuentes de emisiones referentes a la fase de Hoteling en los puertos con mayor actividad, en AERMOD VIEW.

Fuente: Autores,2021

Elaborado por: Autores, 2021

Una vez completado el ingreso de información requerido, se procede a realizar la compilación del programa AERMOD View, del cual se obtienen reportes con las ubicaciones geográficas dentro del área de modelización, en donde se presenta la mayor concentración de contaminante a nivel de piso, así mismo se obtiene también los mapas de iso-concentraciones los cuales serán mostrados y discutidos en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1. Resultados esperados

- La compilación y sistematización de información base de las diferentes actividades desarrolladas en puertos y aeropuertos en la ciudad de Guayaquil.
- El inventario de emisiones a partir de los factores de emisión de los contaminantes criterio: CO, NO_x, SO_x, PM₁₀.
- A partir de la simulación desarrollada con el modelo de calidad de aire, se determinarán los mapas de iso-concentración de contaminantes criterio en la ciudad de Guayaquil por las actividades desarrolladas en puertos y aeropuerto.
- Las áreas afectadas en el dominio de modelización, (malla 50 x 50 km) debido a las emisiones atmosféricas en puertos y aeropuertos de la ciudad de Guayaquil; determinando si estas sobrepasan o no los niveles permitidos de calidad del aire en algún punto de la ciudad (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015a).

4.2. Resultados obtenidos

4.2.1. Inventario de emisiones para Aeropuerto

A continuación, se presenta el inventario de emisiones anuales referido a la ejecución de los 73499 ciclos LTOs en el aeropuerto JJO, realizados en el 2018 en la tabla 17. El cual se muestra también de manera gráfica en la Figura 4.1.

Tabla 17. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para los ciclos LTO del Aeropuerto JJO, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 Aeropuerto JJO		
Descripción	Unidad	Cantidad
NO _x	Ton	320.10
CO	Ton	511.05
SO _x	Ton	23.95
PM ₁₀	Ton	2.46

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

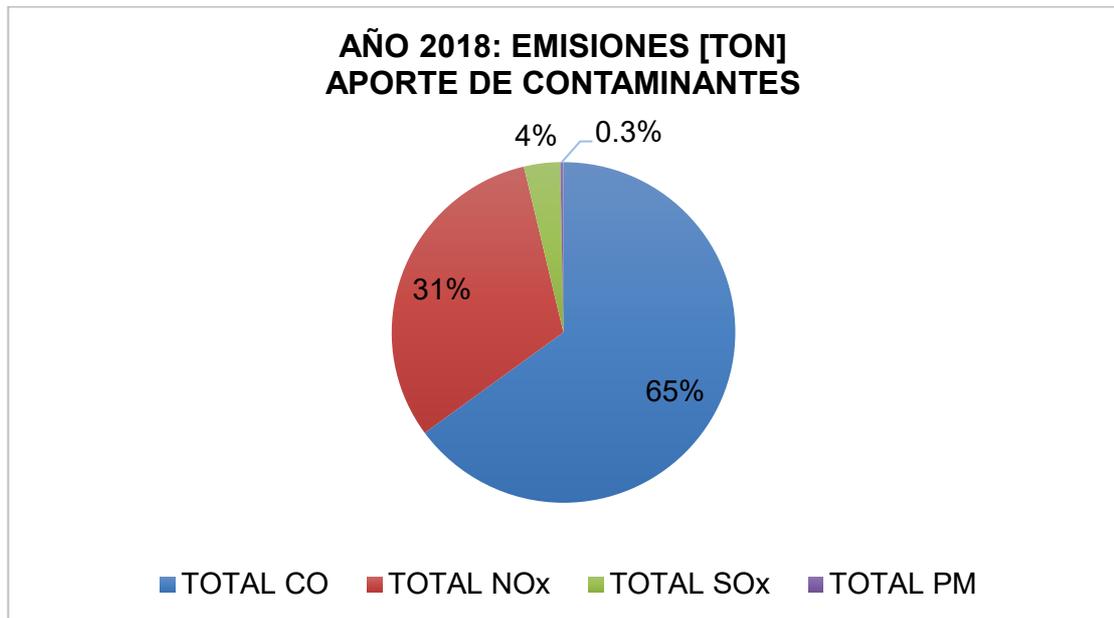


Figura 4.1 Aporte de contaminantes emitidos por las aeronaves en el aeropuerto JJO, año 2018.

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Con un breve análisis de la gráfica en la Figura 4.1, se observa que los contaminantes más emitidos referidos a las operaciones del aeropuerto JJO, teniendo en cuenta únicamente los ciclos LTOs, considerados según el alcance de este proyecto, son CO y NOx. Además, se destaca que los valores de SOx y PM₁₀ son mínimos en comparación con los antes mencionados.

En la Figura 4.2 se muestra los resultados por contaminante de 12 naves que representan más del 80% del total de emisiones. Los resultados obtenidos sugieren que el tipo de aeronave que aportó más contaminantes en el año 2018 fue el Airbus 318/319 con un total de 13442 LTOs, seguido por el Airbus 320 con un total de 10316 LTOs.

En la Figura 4.3, se muestra el análisis de contribución efectuado por tipo de aeronave, donde se observa de manera gráfica el contaminante que es más emitido por cada una de ellas.

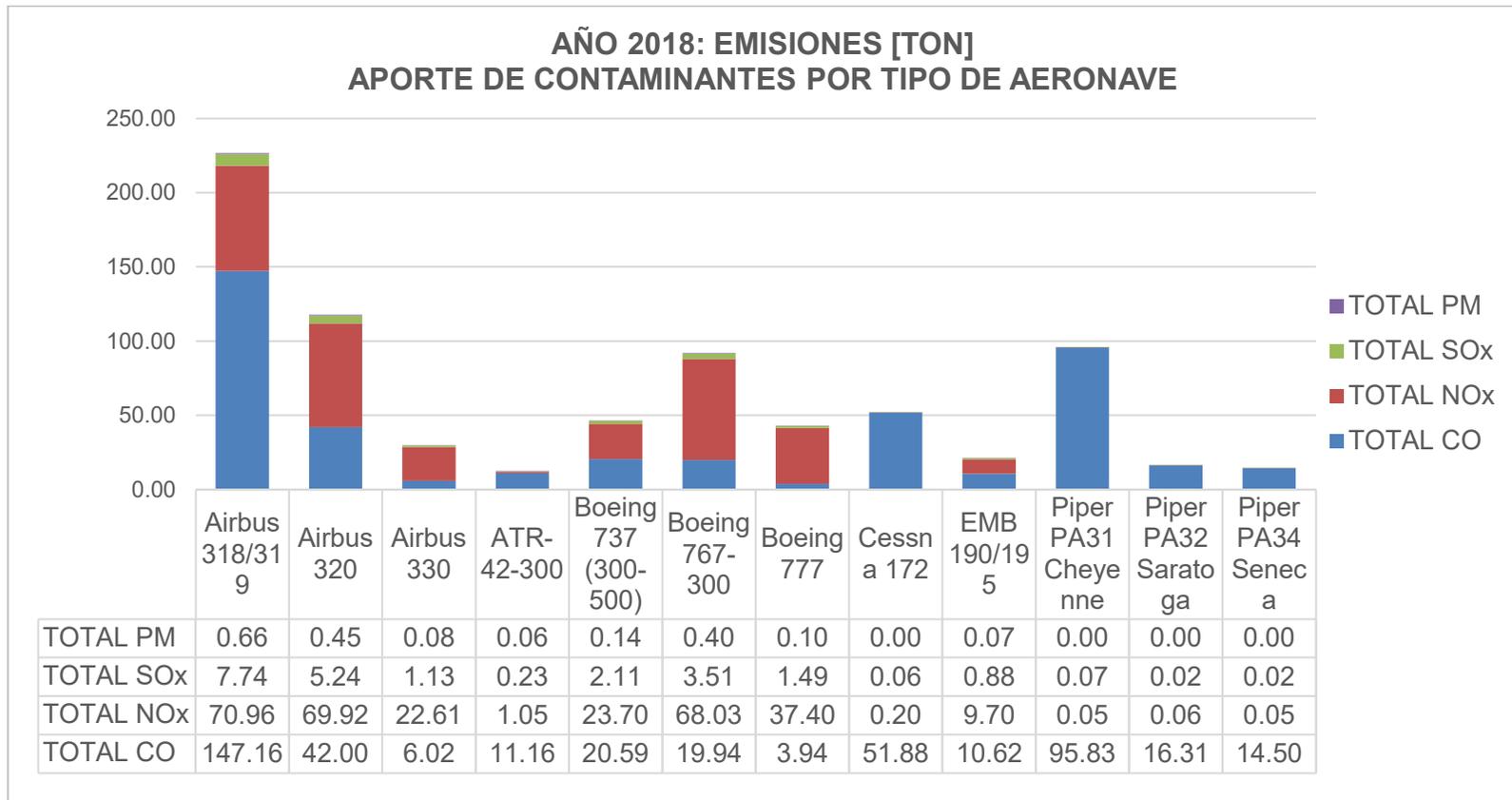


Figura 4.2 Aporte de contaminantes por tipo de aeronave para el aeropuerto JJO.

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

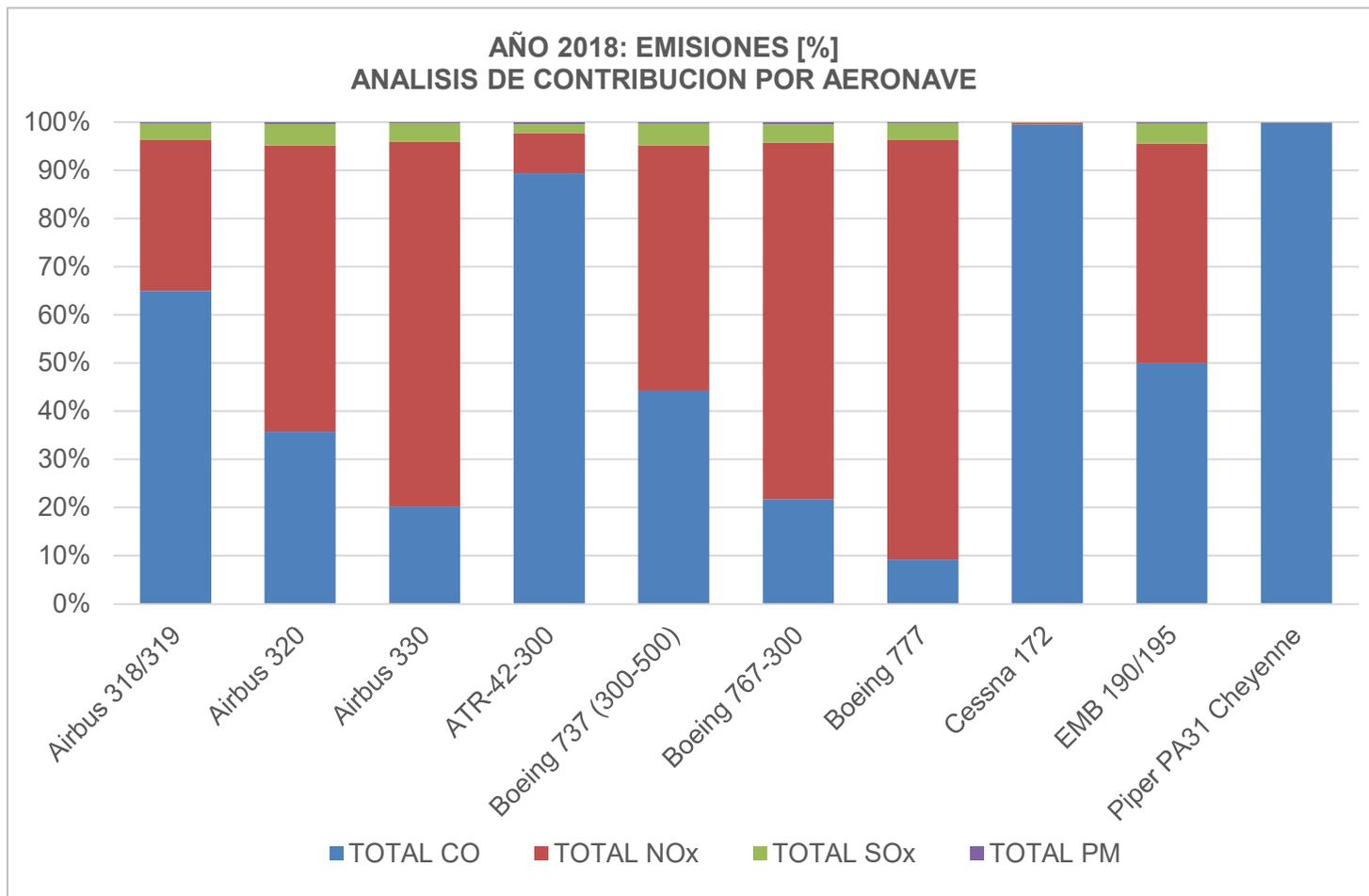


Figura 4.3 Análisis de contribución por tipo de aeronave.

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

4.2.2. Inventario de emisiones para Puertos

Para la cantidad total de arribos descritos en la Tabla 14, se obtuvo como resultado el inventario de emisiones mostrado en la Tabla 18, el cual considera las fases de Manoeuvring (Maniobra), Hoteling (Estancia), excluyendo la fase de Cruising (Crucero) y equipos de apoyo en tierra.

Tabla 18 Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para las fases Manoeuvring y Hoteling por categoría de nave, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Manoeuvring & Hoteling) Puertos de Guayaquil [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	136.34	44.18	18.71	19.54
Dry Bulk carriers	214.34	30.28	34.35	21.94
Container	745.60	121.75	117.41	80.01
General Cargo	29.19	4.82	4.59	3.14
Ro Ro Cargo	3.40	0.63	0.57	0.39
Passenger	0.40	0.08	0.07	0.05
Fishing	0.00	0.00	0.00	0.00
Other	0.90	0.13	0.14	0.09
Tugs	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	1130.17	201.87	175.83	125.16

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

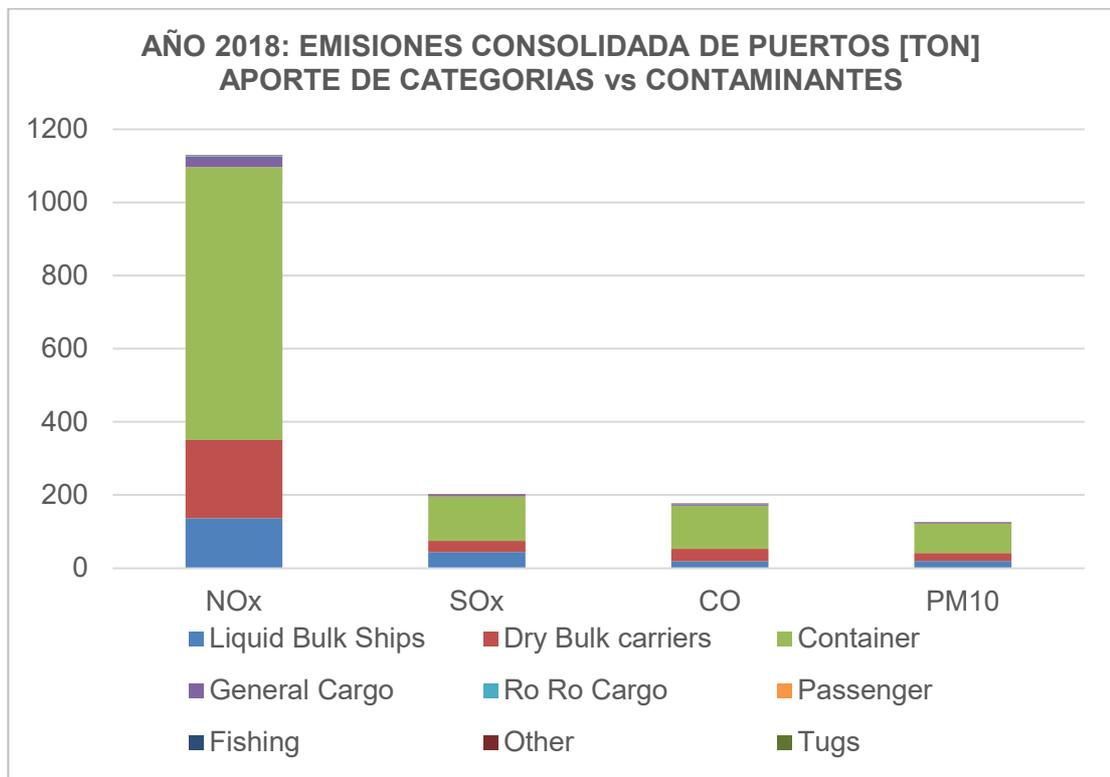


Figura 4.4 Aporte de contaminantes emitidos por los buques en los puertos para el año 2018.

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Según lo indicado en la gráfica presentada en la Figura 4.4, las tres categorías que aportan mayor carga de contaminantes a la atmosfera referidos al sector portuario son Container, Dry Bulk Carriers y Liquid Bulk Ships. Siendo la categoría de Container la que representa el mayor aporte.

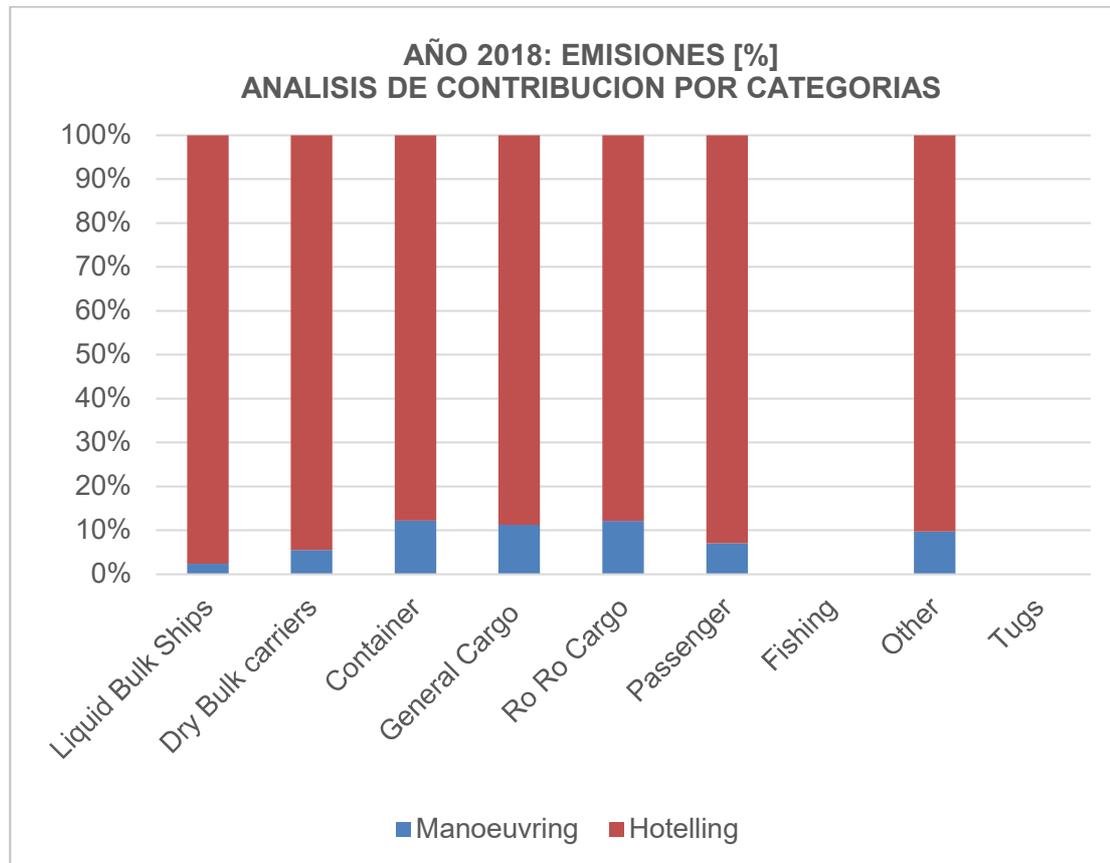


Figura 4.5 Análisis de contribución por categoría de nave.

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

De acuerdo a lo mostrado en el análisis de contribución de la Figura 4.5, la fase que predomina en la emisión de contaminantes es la denominada Hotelling (Estancia) sobre la de Manoeuvring, superando el 85% de participación en del total del inventario, por tanto se decide considerar solo esta fase en la etapa de modelización, además se decide también modelizar únicamente el efecto de los puertos de mayor actividad, los cuales son los conocidos como: Contecon, Andipuerto, TPG, Bananapuerto y Fertisa, con base en la información de Figura 3.4. de los puertos antes mencionados. Los inventarios de emisiones correspondientes a cada fuente modelizada correspondiente a puertos, se describen a continuación las Tablas desde la 19 hasta la 23.

Tabla 19. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para CONTECON, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Hoteling) CONTECON [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	40,08	12,97	5,50	5,74
Dry Bulk carriers	22,94	2,97	3,71	2,29
Container	269,28	36,79	43,31	27,29
General Cargo	19,16	2,69	3,07	1,96
Ro Ro Cargo	2,66	0,39	0,44	0,28
Passenger	0,37	0,06	0,06	0,04
Fishing	0,00	0,00	0,00	0,00
Other	0,10	0,01	0,02	0,01
Tugs	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	354,59	55,89	56,11	37,60

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Tabla 20. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para ANDIPUERTO, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Hoteling) ANDIPUERTO [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	3,21	1,04	0,44	0,46
Dry Bulk carriers	53,71	6,96	8,68	5,36
Container	0,00	0,00	0,00	0,00
General Cargo	6,10	0,85	0,98	0,62
Ro Ro Cargo	0,33	0,05	0,06	0,03
Passenger	0,00	0,00	0,00	0,00
Fishing	0,00	0,00	0,00	0,00
Other	0,00	0,00	0,00	0,00
Tugs	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	63,34	8,90	10,16	6,48

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Tabla 21. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para BANANAPUERTO, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Hoteling) BANANAPUERTO [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	10,15	3,29	1,39	1,45
Dry Bulk carriers	36,23	4,70	5,86	3,61
Container	111,01	15,17	17,85	11,25
General Cargo	0,19	0,03	0,03	0,02
Ro Ro Cargo	0,00	0,00	0,00	0,00
Passenger	0,00	0,00	0,00	0,00
Fishing	0,00	0,00	0,00	0,00
Other	0,20	0,03	0,03	0,02
Tugs	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	157,79	23,20	25,17	16,36

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Tabla 22. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para TPG, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Hoteling) TPG [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	13,21	4,28	1,81	1,89
Dry Bulk carriers	47,15	6,11	7,62	4,70
Container	144,48	19,74	23,24	14,64
General Cargo	0,24	0,03	0,04	0,02
Ro Ro Cargo	0,00	0,00	0,00	0,00
Passenger	0,00	0,00	0,00	0,00
Fishing	0,00	0,00	0,00	0,00
Other	0,27	0,03	0,04	0,03
Tugs	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	205,35	30,20	32,76	21,29

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Tabla 23. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos para FERTISA, año 2018

Inventario de Emisiones Año 2018 (Hoteling) FERTISA [Ton]				
Categoría	NOx	SOx	CO	PM10
Liquid Bulk Ships	7,54	2,44	1,03	1,08
Dry Bulk carriers	26,91	3,49	4,35	2,68
Container	82,44	11,26	13,26	8,35
General Cargo	0,14	0,02	0,02	0,01
Ro Ro Cargo	0,00	0,00	0,00	0,00
Passenger	0,00	0,00	0,00	0,00
Fishing	0,00	0,00	0,00	0,00
Other	0,15	0,02	0,02	0,01
Tugs	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	117,18	17,23	18,69	12,15

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

4.2.3. Modelización

Los mapas de iso-concentración obtenidos producto de la modelización en AERMOD View 9.9.0, consisten en una primera aproximación del posible patrón de dispersión de contaminantes, debido al efecto combinado de las fuentes modelizadas para aeropuertos y puertos. Los mapas de iso-concentración de efecto combinado que simulan la dispersión de contaminantes para los periodos de tiempo de 1 h, 24 h y 1 año, se muestran a continuación.

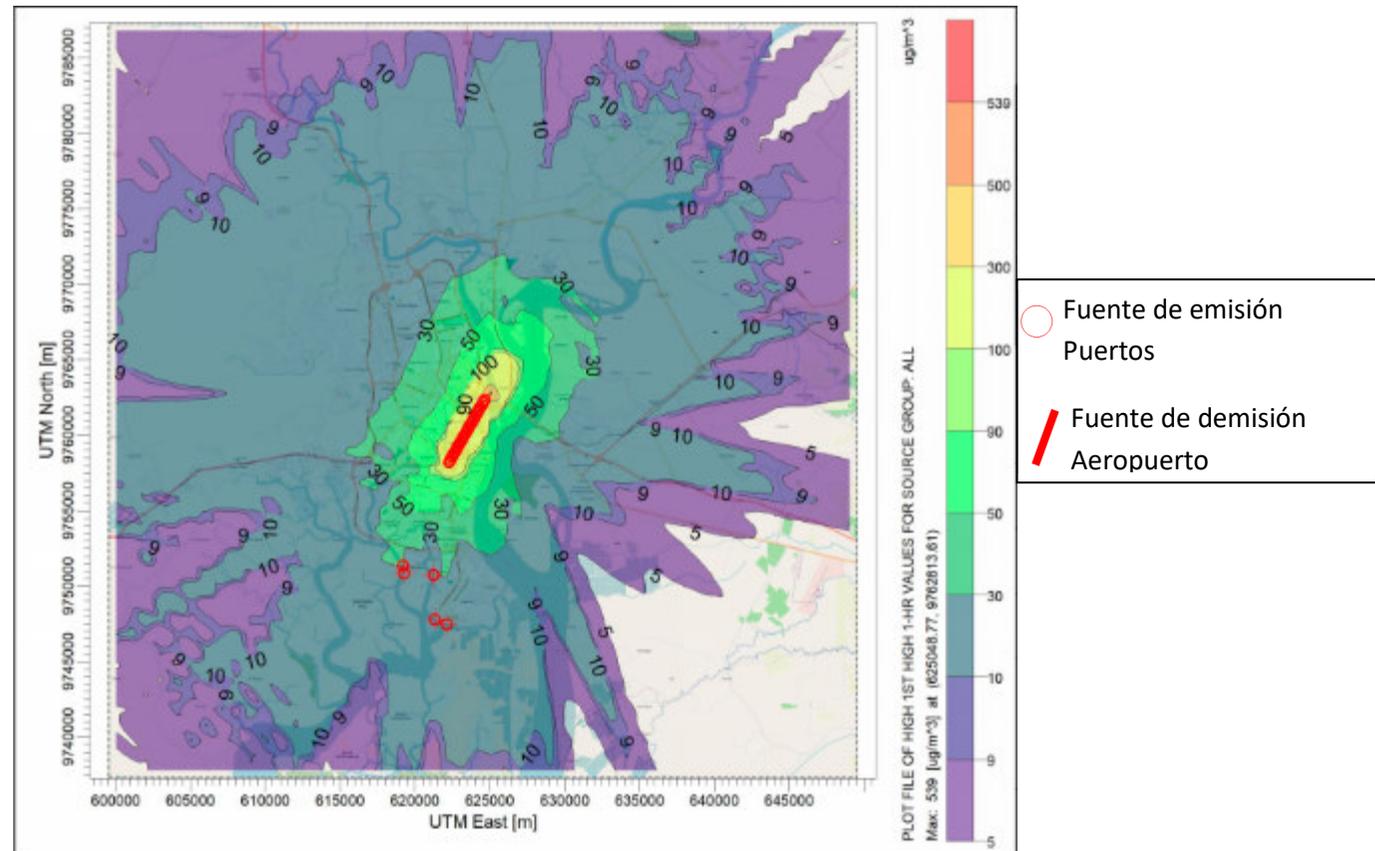


Figura 4.6 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto. Concentración máxima > 200 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

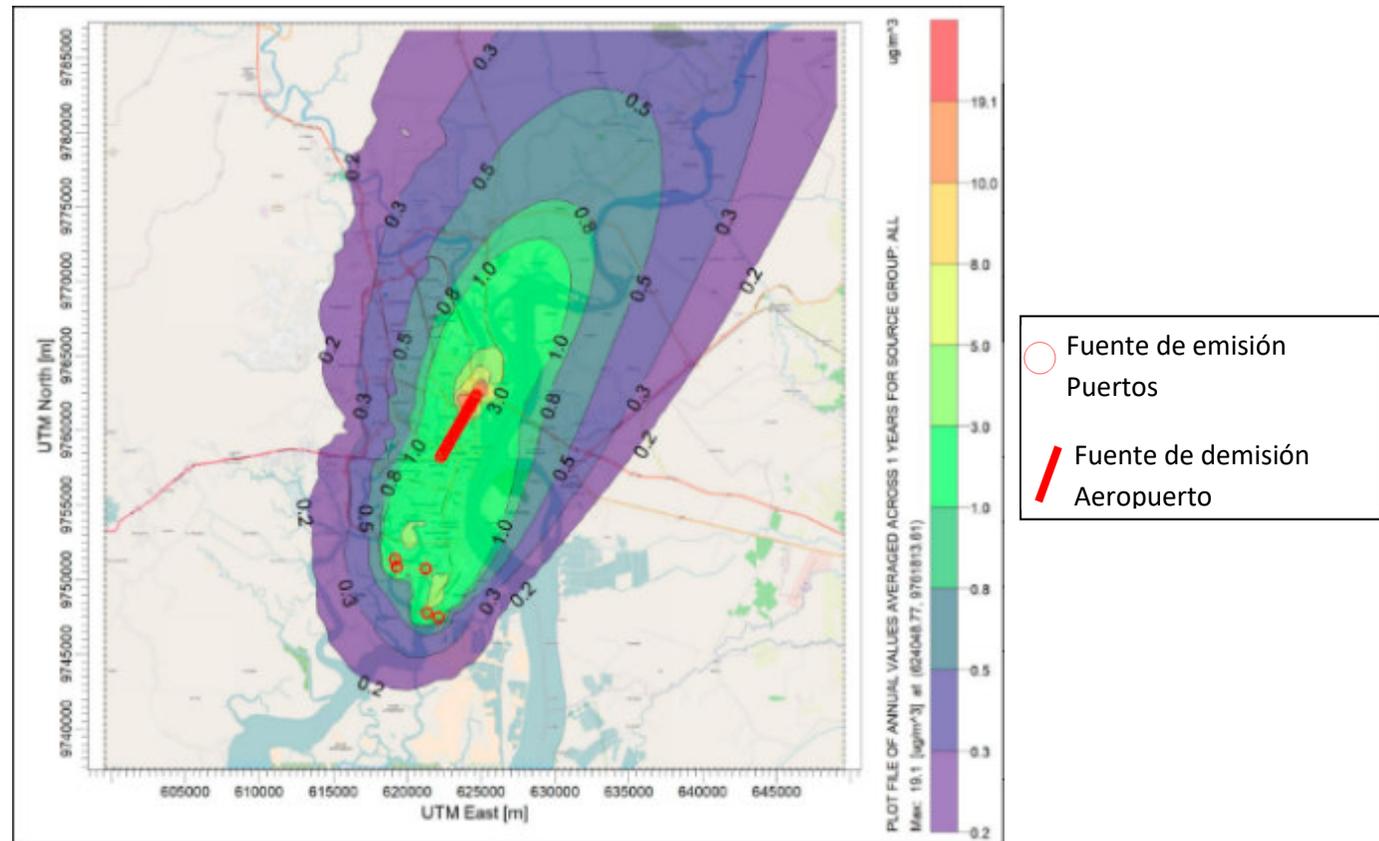


Figura 4.7 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 Año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.
Concentración máxima < 40 [µg/m³]

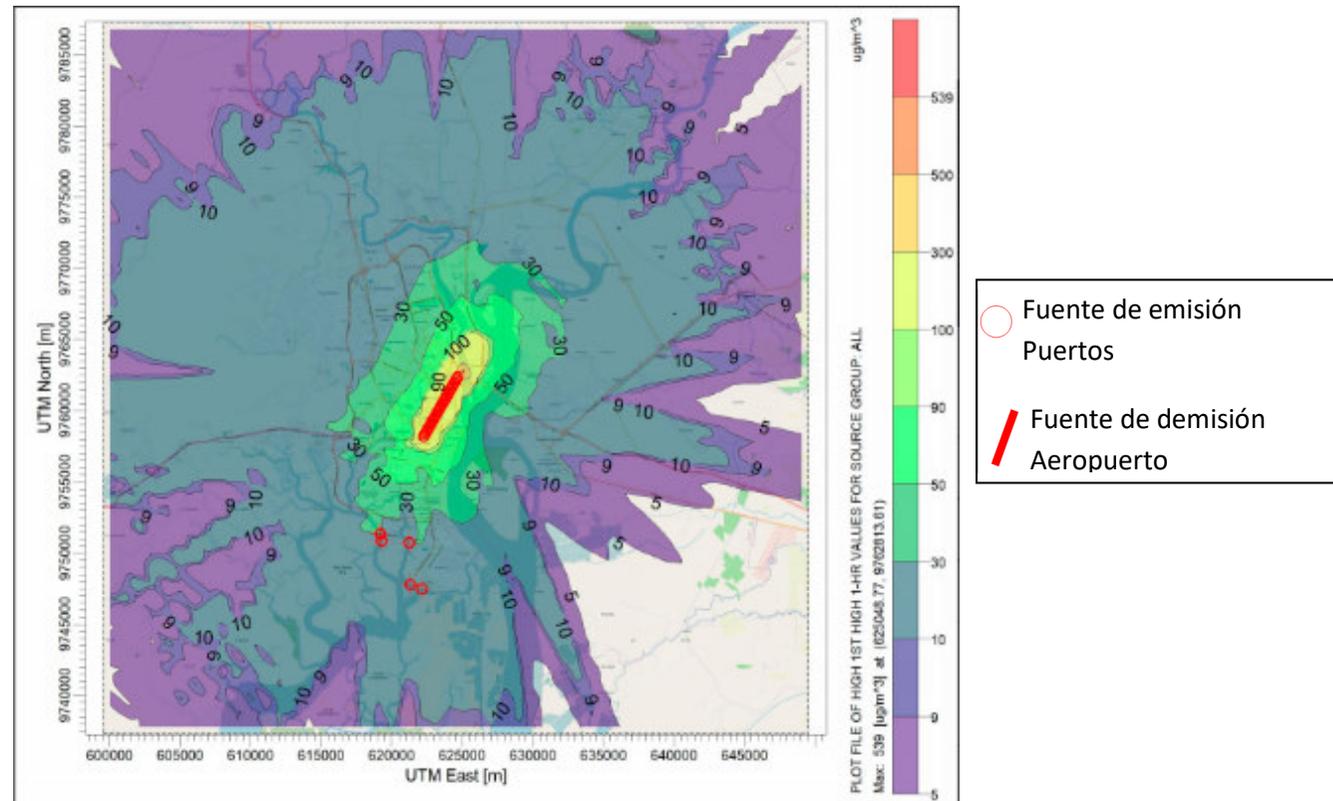


Figura 4.8 Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.
Concentración máxima < 30000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

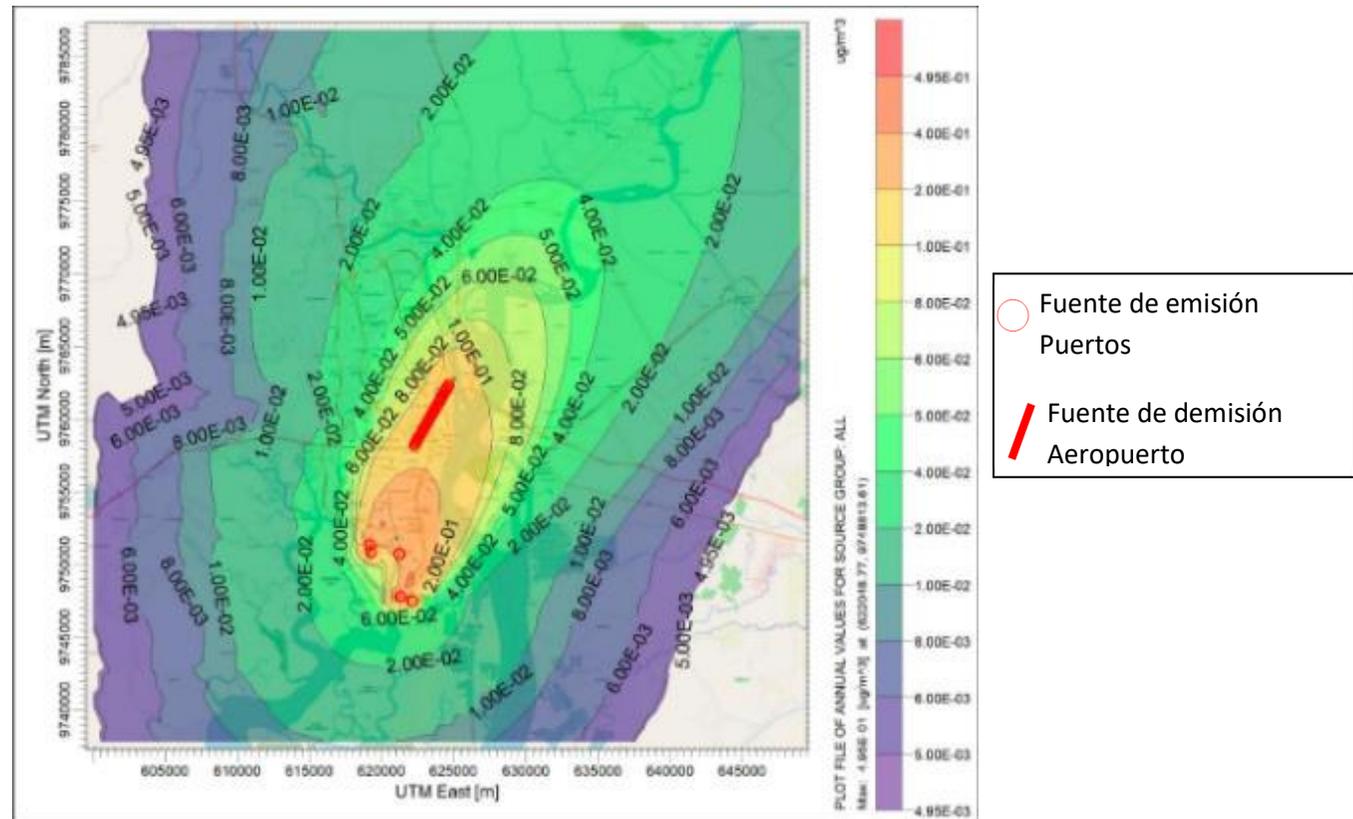


Figura 4.9 Mapa de Iso-Concentración promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x , efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto. Concentración máxima $< 125 \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$

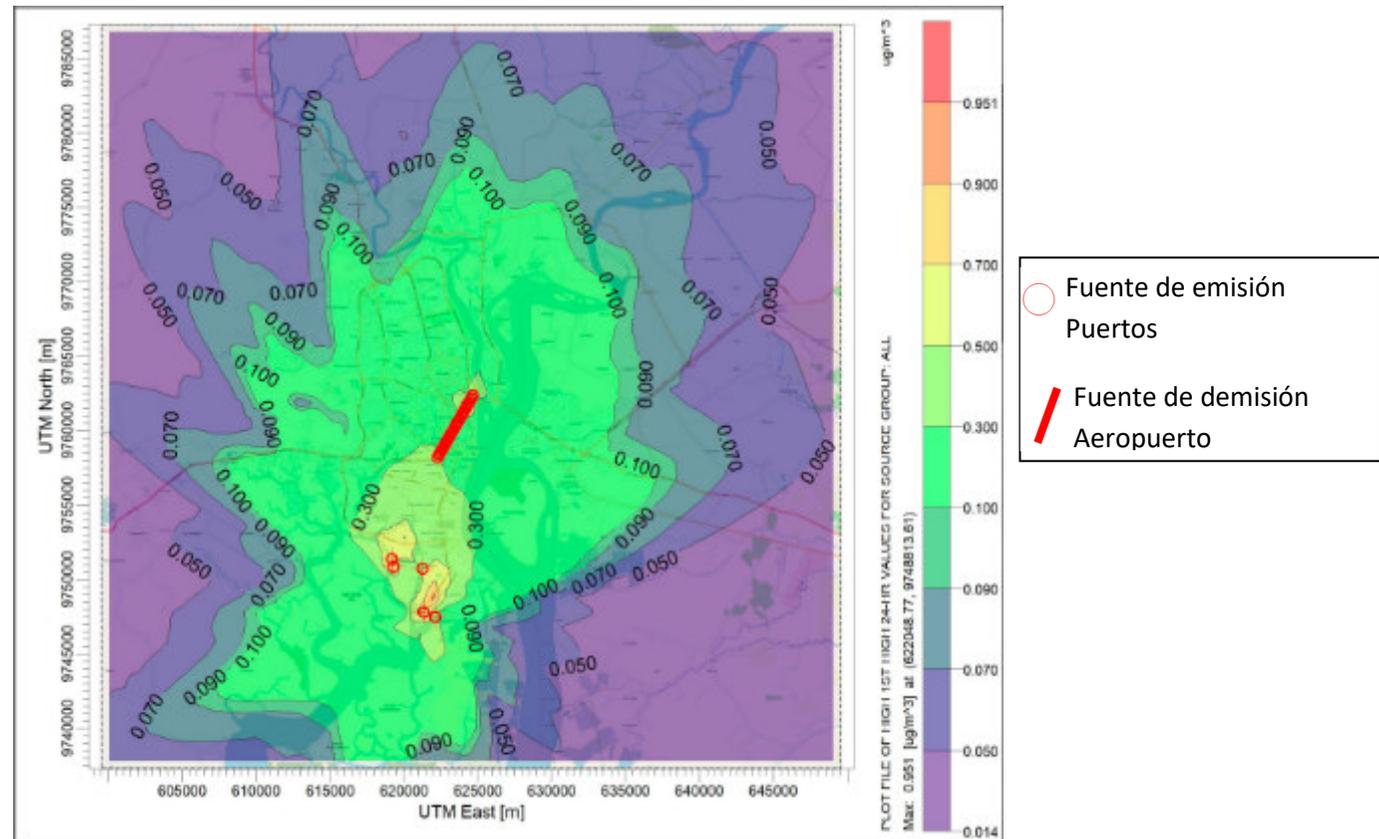


Figura 4.11 Mapa de Iso-Concentración promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.
Concentración máxima < 100 [µg/m³]

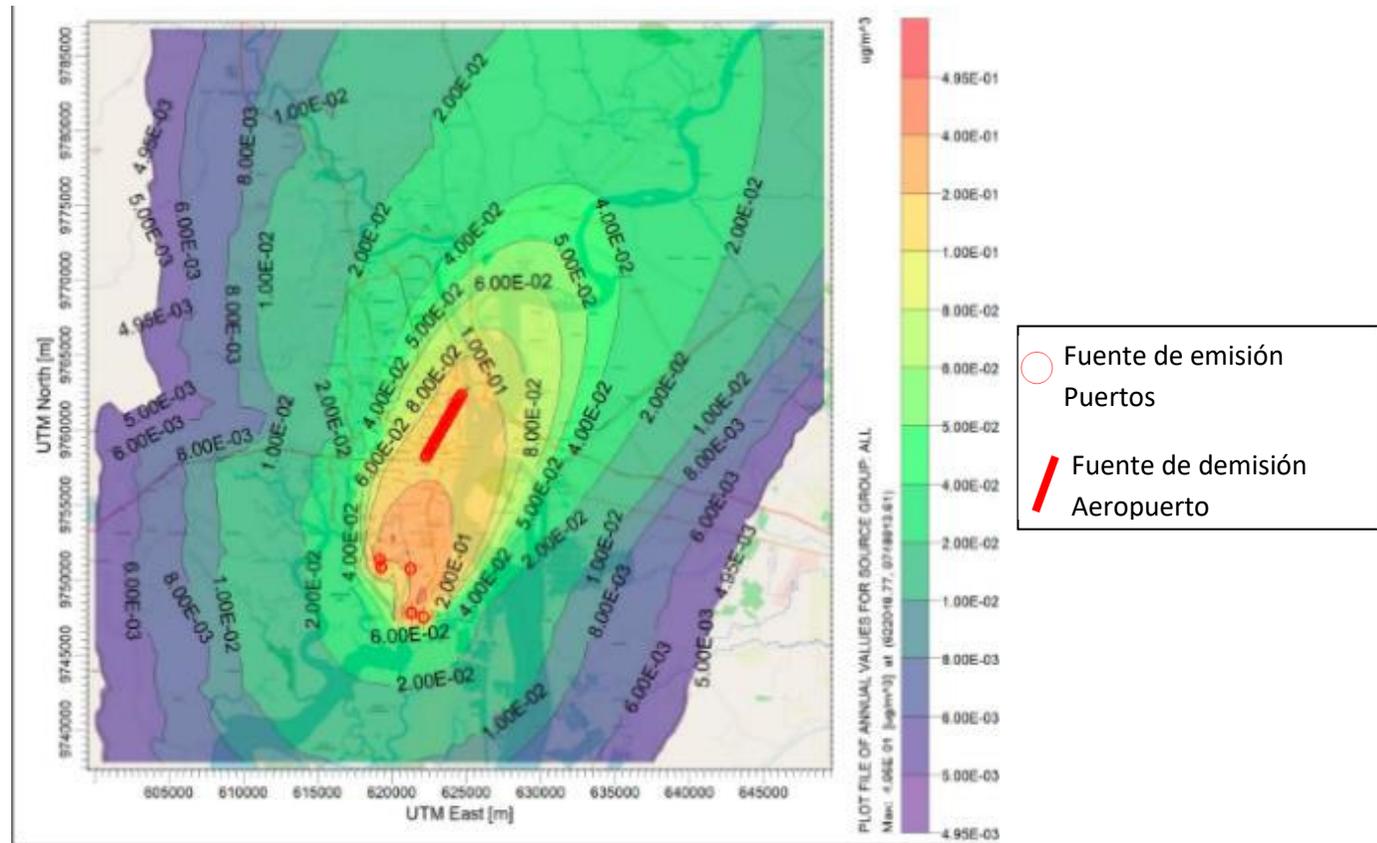


Figura 4.12 Mapa de Iso-Concentración promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.
Concentración máxima < 100 [μg/m³]

Como resultado de la compilación del programa AERMOD View, se obtuvieron las coordenadas geográficas de los sitios con mayor concentración de contaminantes a nivel de piso (inmisión) (ver en anexos), con lo cual se puede sugerir que estos sectores de máxima concentración se encuentran muy cercano a sus fuentes, dentro del predio y alejados de zonas habitadas. Así también, se analizaron los tres escenarios de modelización, considerando así el efecto aislado de las fuentes de emisión referidas al aeropuerto, luego el efecto aislado de las fuentes de emisión referidas a los puertos y finalmente su efecto combinado. Los resultados obtenidos se encuentran tabulados en las Tablas 24.

Tabla 24. Análisis cualitativo de concentración máxima promedio de contaminantes versus Legislación Vigente (TULSMA).

Sustancia Contaminante	Periodo Regulado	[µg/m ³]			
		Límite Máximo	Aeropuerto	Puertos	Aeropuerto + Puertos (Combinados)
CO	1 h	30000	538.53	5.46	538.65
	8 h	10000	-	-	-
NO ₂	1 h	200	337.31	34.53	338.06
	1 año	40	18.11	4.68	19.11
SO ₂	24 h	125	3.96	1.41	4.17
	1 año	60	1.36	0.73	1.51
PM ₁₀	24 h	100	0.41	0.95	0.95
	1 año	50	0.14	0.50	0.50

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

Respecto a la figura 4.6, a través de un análisis cualitativo, se identifican zonas donde pudiera existir un impacto en la calidad del aire, siendo las zonas cercanas al aeropuerto las que pudieran presentar impactos. Por lo que se analizan los sectores de la ciudadela FAE y de la Universidad Estatal de Guayaquil logrando obtener los resultados mostrados en la tabla 25.

Tabla 25. Análisis cualitativo de concentración máxima promedio de contaminantes versus Legislación Vigente (TULSMA) para los sectores de la ciudadela FAE y Universidad Estatal de Guayaquil.

Sustancia Contaminante	Periodo Regulado	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		Límite Máximo	FAE	UG
CO	1 h	30000	254.41	185.7
	8 h	10000	-	-
NO ₂	1 h	200	159.35	116.31
	1 año	40	1.13	0.40
SO ₂	24 h	125	1.35	1.13
	1 año	60	0.08	0.03
PM ₁₀	24 h	100	0.14	0.12
	1 año	50	0.008	0.003

Fuente: Autores, 2021

Elaborado por: Autores, 2021

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

De acuerdo con la metodología aplicada en este proyecto de titulación, se concluye que la mayor afectación a la calidad del aire de la ciudad de Guayaquil se da por las operaciones del Aeropuerto José Joaquín de Olmedo, siendo el Monóxido de Carbono (CO) el contaminante con mayor tasa de emisión anual. Sin embargo, el análisis efectuado con la herramienta AERMOD View sugiere que las concentraciones máximas que se obtienen dentro del dominio de este proyecto no superan a los límites establecidos según la legislación vigente.

También se logra concluir que el segundo contaminante asociado a las operaciones del Aeropuerto JJO con mayor tasa de emisión anual, es el NO_x. Luego de efectuar el análisis con la herramienta AERMOD View se concluye que, bajo los supuestos y limitaciones consideradas para el desarrollo de este trabajo de titulación, en los intervalos de una hora y un año existe la posibilidad de que superen los valores establecidos como límites según la legislación vigente.

En la modelización se observa que los resultados del efecto combinado y resultados del aeropuerto son muy similares, por tal, se pudiera concluir que los efectos del aeropuerto predominan debido a que se ha asumido para la modelización de las fuentes de emisión referidas al aeropuerto, como fuentes de áreas extensas.

El análisis establecido sugiere que el valor indicado como límite en el TULSMA para para el contaminante NO_x, emitido por las aeronaves, en el periodo de 1 h pudiera estar siendo superado cerca del área de la pista de aterrizaje y despegue del aeropuerto. Cabe recalcar que los valores indicados en el TULSMA son los límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes a nivel de suelo en el aire ambiente fuera de los límites del predio de las fuentes de emisión estudiadas.

Basado en el resultado de que las concentraciones máximas se presentan en zonas cercanas al aeropuerto, se escogió un sector poblado al azar ubicado dentro de la ciudadela la FAE, cercana al aeropuerto, con la finalidad de analizar la concentración de NO_x obtenida, producto de este análisis se encontró que la concentración de NO_x que pudiera estar presentándose en la ciudadela la FAE, pudiera superar levemente el nivel de concentración establecidas en el TULSMA como máximo, 200 µg/m³.

Como resultado de la evaluación de emisiones obtenidas producto de la actividad portuaria en la ciudad de Guayaquil y su posterior modelización utilizando la herramienta AERMOD View para evaluar la calidad del aire se concluye que es poco probable que llegase a superar los límites de concentración establecidos en la legislación vigente, para todos los contaminantes criterio analizados. A manera indicativa se presenta el posible valor de concentración de NO_x en el sector la

Fragata, obtenido con ayuda de AERMOD View, dicho valor se sitúa en aproximadamente 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual se sitúa muy por debajo del nivel de concentración establecidas en el TULSMA como máximo, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el resto de los contaminantes criterio, como los son SO_x, CO y PM₁₀, se puede concluir dentro de las limitaciones existentes para la elaboración de este trabajo de titulación, que es muy poco probable que se llegaran a alcanzar los límites publicados en el TULSA Libro VI, anexo 4.

Este trabajo al ser elaborado considerando el escenario más crítico, es decir, en donde todas las fuentes se encuentran emitiendo contaminantes de forma continua, debe ser considerado como una aproximación de carácter cualitativo, el cual es utilizado para identificar zonas en donde pudiera verse afectada la calidad del aire.

5.2. Recomendaciones

En el entendido que los resultados y conclusiones obtenidas como producto del desarrollo de este trabajo de titulación, son de carácter estimativo, aceptables con propósitos académicos. Se recomienda realizar futuras modelizaciones de la calidad del aire bajo la influencia de puertos y el aeropuerto, dentro de dominio seleccionado, en los cuales se considere inventarios emisiones elaborados con menos limitaciones, que las descritas en el presente documento.

Se recomienda para futuros ejercicios de elaboración de inventarios de emisiones referidos a la operación portuaria en Ecuador, establecer una metodología que permita obtener reportes estadísticos mensuales sobre el consumo de combustible para la operación de buques, segregada de acuerdo con las categorías indicadas en los boletines estadísticos anuales.

Es recomendable también contabilizar los movimientos de buques por su código IMO en forma mensualizada, ya que de esta manera se simplifica la tarea de clasificación por categoría y la determinación de la capacidad de la embarcación, puesto que esta información está directamente asociada con el código IMO.

También se recomienda para casos futuros de elaboración de inventarios de emisiones referidos a las operaciones aeroportuarias en Ecuador, obtener información estadística mensual o diaria de los movimientos de aeronaves dividida o clasificada por su modelo.

Se recomienda también el uso del código ICAO de cada aeronave (el cual es único) para enlazar la información real de itinerarios realizados, con el modelo de aeronave involucrado en dicho itinerario.

A pesar de que las metodologías de Nivel 3 utilizadas para la elaboración de este trabajo de titulación, no exigen de manera obligatoria el ingreso de información de consumo de combustible, se recomienda obtener información estadística referente a la cantidad de combustible utilizada tanto en las operaciones aeroportuarias como de

cada puerto marítimo, con la finalidad de realizar ajustes y detectar inconsistencias en las estimaciones de emisiones utilizadas para la elaboración de los inventarios de emisiones.

Con respecto del Modelizado en AERMOD View, se recomienda utilizar información meteorológica de pronóstico, obtenidos con el modelo WRF, ya que su precisión supera al modelo MM5(Kusaka et al., 2005).

BIBLIOGRAFÍA

- Alver, F., Saraç, B. A., & Alver Şahin, Ü. (2018). Estimating of shipping emissions in the Samsun Port from 2010 to 2015. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 822–828. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.003>
- Asotep. (2020). Memoria de Puertos Privados. *Competencia y Competitividad Para El Comercio Exterior Del Ecuador*, 78. http://www.asotep.org/pdf/descarga/descarga_32.pdf
- Cooper, C. D. (2011). *Air Pollution Control A Design Approach* (p. 662).
- Efficacitas Consultora Cía. Ltda. (2008). *Estudio de Impacto Ambiental ExPost Aeropuerto José Joaquín de Olmedo (AIJO)*.
- El Universo. (2019). *La zona portuaria de Guayaquil es la séptima de América Latina | Ecuador | Noticias | El Universo*. <https://www.eluniverso.com/noticias/2019/07/15/nota/7425780/zona-portuaria-guayaquil-es-septima-america-latina>
- EMEP/EEA. (n.d.). *EMEP/EEA Emission Factor Data Base*. Retrieved March 18, 2021, from http://efdb.apps.eea.europa.eu/?source=%7B%22query%22%3A%7B%22match_all%22%3A%7D%7D%2C%22display_type%22%3A%22tabular%22%2C%22from%22%3A340%7D
- EMEP/EEA. (2013). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories. *EEA Technical Report, 12/2013*, 23. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- EMEP/EEA. (2019a). *1.A.3.a Aviation 2 LTO emissions calculator 2019 — European Environment Agency*. 1.A.3.a Aviation 2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1-annex5-LTO/view>
- EMEP/EEA. (2019b). *1.A.3.a Aviation 2019*. 1–51.
- EMEP/EEA. (2019c). *1.A.3.d Navigation - Shipping 2019*. 40.
- EMEP/EEA. (2019d). *1.A.3.d Navigation (shipping) 2019*.
- EMEP/EEA. (2019e). *Air pollutant emission inventory guidebook 2019 — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- EMEP. (2019). *EEA Emission Guidebook-2019*.
- Federal Aviation Administration. (2020). *Aviation Environmental Design Tool (AEDT)*. <https://aedt.faa.gov/>
- Guevara Vilardell, M. (2010). *Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008* (Vol. 2010, Issue Plan 94). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- ICAO. (2016). *Doc 9889, Airport Air Quality Manual*.

- ICAO, & Aviaci, D. E. (2020). *Doc 9889 Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos*.
- IMO. (2018). *Global Integrated Shipping Information System (GISIS) – IMO Ship Fuel Oil Consumption Database Module* (Issue Circular Letter No.3827, pp. 7–9). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Documents/CL.3827.pdf>
- INAMHI. (2017). *RENDICIÓN DE CUENTAS 2016 PROCESO DESCONCENTRADO CUENCA DEL RÍO GUAYAS*.
- INAMHI, & Universidad Politécnica Salesiana. (2017). *Inaugurada Estación Meteorológica en el Campus Sur - UPS*. <https://www.ups.edu.ec/noticias?articleId=10463830>
- Ine, US EPA, & JICA. (2016). Manual 1 Principios de Medición de la Calidad del Aire. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*, 43. [https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1- Principios de Medición de la Calidad del Aire.pdf](https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-Principios%20de%20Medici3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf)
- IPCC. (1999). *Aviation and the Global Atmosphere*. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/014.htm>
- Kusaka, H., Crook, A., Dudhia, J., & Wada, K. (2005). Comparison of the WRF and MM5 Models for Simulation of Heavy Rainfall along the Baiu Front. *Sola*, 1(May 2014), 197–200. <https://doi.org/10.2151/sola.2005-051>
- Lakes Environmental. (2021). *Met Data FAQs*. https://www.weblakes.com/services/met_faqs.html
- Makridis, M., & Lazaridis, M. (2019). Dispersion modeling of gaseous and particulate matter emissions from aircraft activity at Chania Airport, Greece. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 12(4–8), 933–943. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00710-y>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015a). Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. *TULSMA, Libro VI*, 387, 1–10.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015b). Registro Oficial - Edición Especial N° 387 TULSMA. *TULSMA*, 1–184.
- MTOP. (2018). *Estadísticas Portuarias y de Transporte Marítimo 2018*. 1–216. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/07/Boletin-Estadistico-2018_MTOP.pdf
- NASA. (2021). *Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data PAGES 583,585*. <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>.
- Neira Ruiz, F. A. (2013). *Inventario de emisiones contaminantes del aire producidas por el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo de la ciudad de Guayaquil, mediante la aplicación del modelo EDMS*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- NSF, NCAR, & UCAR. (2020). *Weather Research and Forecasting Model | MMM: Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory*. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2020). *Manual sobre la calidad del*

aire en los aeropuertos.

T21, & Zanela, L. (2020). *Contecon recibe primer buque del servicio ACSA 1 de CMA CGM*. <http://t21.com.mx/maritimo/2020/04/08/contecon-recibe-primer-buque-servicio-acsa-1-cma-cgm>

Tagasa. (2021). *Aeropuerto José Joaquín de Olmedo de Guayaquil*. <http://www.tagasa.aero/>

Trozzi, C. (2010). *Emission estimate methodology for maritime navigation*. 6. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf>

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (1999). *Handbook for Criteria Pollutant Inventory Development : A Beginner ' s Guide for Point and Area*. 285. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000MVP.PDF?Dockey=P1000MVP.PDF>

US EPA. (n.d.). *Inventory Guidance : Ports Emissions*.

US EPA. (2015). Revision 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. *Federal Register*, 80(145), 45339–45387.

US EPA. (2016a). *Basic Information about Carbon Monoxide (CO) Outdoor Air Pollution*. <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution>

US EPA. (2016b). *Basic Information about NO2*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>

US EPA. (2019). *Sulfur Dioxide Basics*. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>

US EPA. (2020). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

US EPA, BAC, & WGA. (1997). *MANUALES DEL PROGRAMA DE INVENTARIOS DE EMISIONES DE MEXICO VOLUMEN II-FUNDAMENTOS DE INVENTARIOS DE EMISIONES FINAL Elaborado para*.

US EPA, & Ciolek, M. M. (2013). *Recommended Procedures for Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database*.

US EPA, WGA, & BAC. (1996). *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México Volumen 3 - Técnica básica de estimación de emisiones*. https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=fuentes+moviles+mexico&inmeta=specialcollection_s~EPA%2BArchive&typeofsearch=area&result_template=archive

US EPA, WGA, & BAC. (1997). *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México Volumen 2 - Fundamento de Inventario de emisiones*. 2.

Wayson, R. L., Kim, B. Y., Fleming, G. G., Hall, C., Thrasher, T., Colligan, B., & Draper, J. (2003). *Integration of AERMOD into EDMS*. 355, 1–7.

Zambrano Mera, J. U. (2014). *Identificación de la contaminación atmosférica generada por buques de carga en el puerto de Guayaquil*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

ANEXOS

Anexo 1: Ingreso de datos en hoja de cálculo de emisiones para ciclos LTO de EMEP

Enter the aircraft and airport details here
(Click under the red arrows (▼) to see the drop-down menus.)

1) Type of aircraft ▼

Note: Where only one model of engine is associated with a particular type of aircraft in this menu, it is the most common model (as seen on aircraft flying in Europe), or the best equivalent model, for that type of aircraft that is displayed. Where several models of engine are associated with a particular type of aircraft in this menu, the most-common model is marked with *** (if appropriate).

2) Airport

a) Country ▼

b) Airport ▼

c) Year ▼

General engine details

Engine model code:

Engine model name:

Type of engine:

Number of engines:

Airport annual average taxi times

Taxi out time (s): ▼

Taxi in time (s): ▼

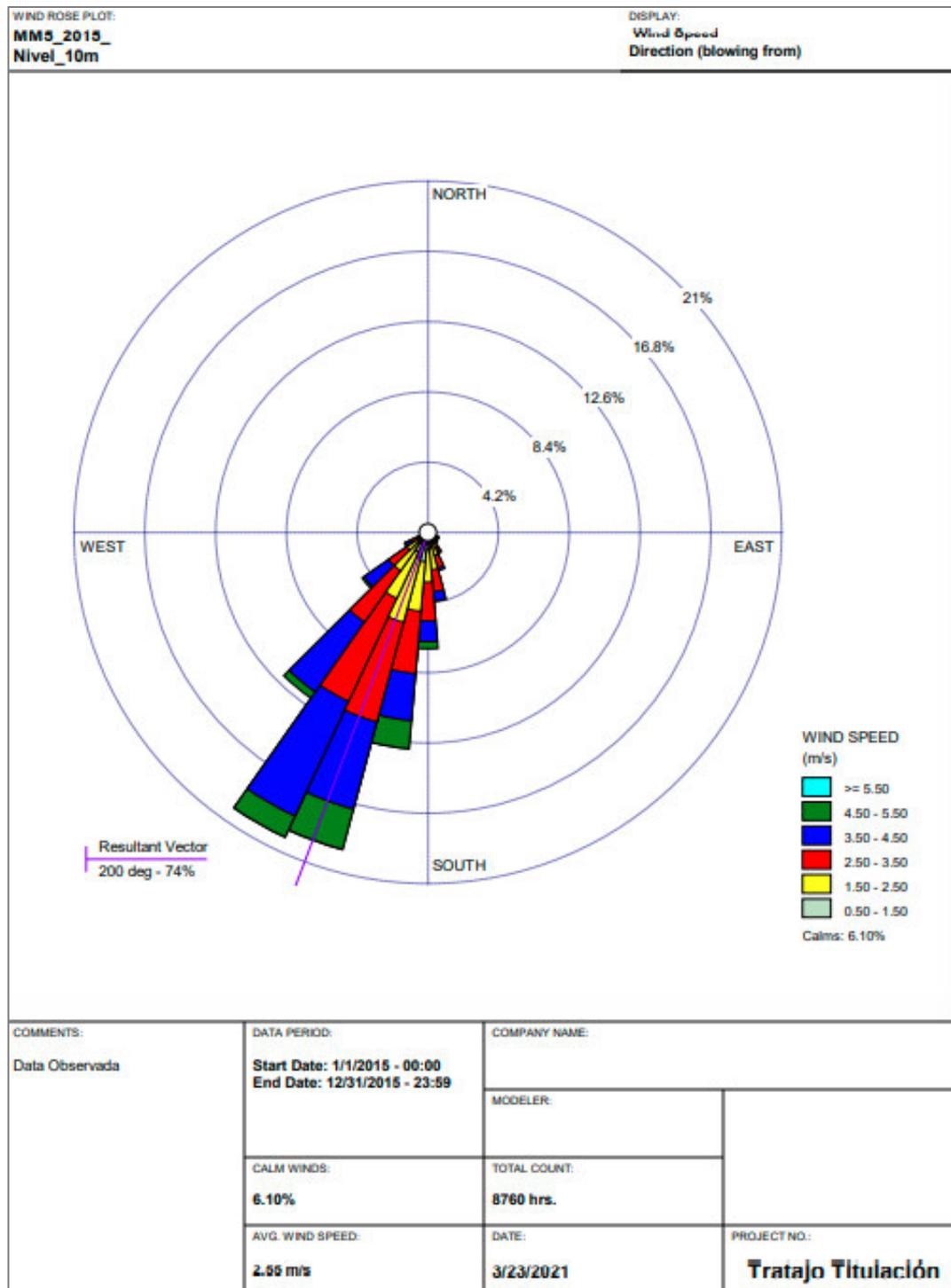
Estos datos se llenan automáticamente de acuerdo a la base de datos de EMEP

Datos ingresados manualmente por usuario.

Anexo 2: Ejemplo de resultados obtenidos por hoja de cálculo de emisiones para ciclos LTO de EMEP

Total masses of fuel burnt and CO, HC, NOx, CO ₂ , PM _{vol-org} , PM _{vol-sulh} , PM _{non-volh} and PM _{total} emitted								
	Taxi out (A) Average taxi-out time for the selected airport and year (= 300 s)	Take off (B)	Climb out (C)	Departure phase total (A + B + C)	Approach+landing (D)	Taxi in (E) Average taxi-in time for the selected airport and year (= 300 s)	Arrival phase total (D + E)	LTO cycle total (A + B + C + D+ E) [kg/LTO]
	(7% thrust)	(100% thrust)	(85% thrust)		(30% thrust)	(7% thrust)		
Mass of fuel burnt (kg)	6.6000 x 10 ⁻¹	8.1480 x 10 ⁻¹	2.1384 x 10 ⁻²	3.6132 x 10 ⁻²	1.4880 x 10 ⁻²	6.6000 x 10 ⁻¹	2.1480 x 10 ⁻²	5.7612 x 10 ⁻²
Mass of CO emitted (kg)	2.9568	2.5259 x 10 ⁻¹	1.5824	4.7918	3.1992	2.9568	6.1560	1.0948 x 10 ⁻¹
Mass of HC emitted (kg)	3.0360 x 10 ⁻¹	1.6296 x 10 ⁻²	4.2768 x 10 ⁻²	3.6266 x 10 ⁻¹	5.9520 x 10 ⁻²	3.0360 x 10 ⁻¹	3.6312 x 10 ⁻¹	7.2578 x 10 ⁻¹
Mass of NO _x emitted (kg)	2.3760 x 10 ⁻¹	1.1570	2.3522	3.7469	1.2946	2.3760 x 10 ⁻¹	1.5322	5.2790
Mass of CO ₂ emitted (kg)	2.0790 x 10 ⁻²	2.5666 x 10 ⁻²	6.7360 x 10 ⁻²	1.1382 x 10 ⁻³	4.6872 x 10 ⁻²	2.0790 x 10 ⁻²	6.7662 x 10 ⁻²	1.8148 x 10 ⁻³
Mass of PM _{vol-org} emitted (kg)	1.8732 x 10 ⁻³	1.8740 x 10 ⁻³	3.2504 x 10 ⁻³	6.9976 x 10 ⁻³	3.3480 x 10 ⁻³	1.8732 x 10 ⁻³	5.2212 x 10 ⁻³	1.2219 x 10 ⁻²
Mass of PM _{vol-sulh} emitted (kg)	3.2314 x 10 ⁻³	3.9893 x 10 ⁻³	1.0470 x 10 ⁻²	1.7690 x 10 ⁻²	7.2852 x 10 ⁻³	3.2314 x 10 ⁻³	1.0517 x 10 ⁻²	2.8207 x 10 ⁻²
Mass of PM _{non-volh} emitted (kg)	7.8749 x 10 ⁻⁴	4.5876 x 10 ⁻⁵	1.3606 x 10 ⁻⁴	9.6943 x 10 ⁻⁴	7.0585 x 10 ⁻³	7.8749 x 10 ⁻⁴	7.8460 x 10 ⁻³	8.8155 x 10 ⁻³
Mass of PM _{total} emitted (kg)	5.8921 x 10 ⁻³	5.9092 x 10 ⁻³	1.3856 x 10 ⁻²	2.5657 x 10 ⁻²	1.7692 x 10 ⁻²	5.8921 x 10 ⁻³	2.3584 x 10 ⁻²	4.9241 x 10 ⁻²

Anexo 3: Rosa de los vientos para el área de dominio en el periodo 2018



Anexo 4: Resumen de resultados para Aeropuerto

Results Summary									
F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop									
CO - Concentration - Source Group: ALL									
Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	538.52740	ug/m^3	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	84.41302	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		28.91509	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	
NOX - Concentration - Source Group: ALL									
Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	337.30648	ug/m^3	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	52.87209	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		18.11093	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	
PM10 - Concentration - Source Group: ALL									
Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	2.59211	ug/m^3	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	0.40631	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		0.13918	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	

SO2 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	25.25645	ug/m^3	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	3.95889	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		1.35609	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	

Anexo 5: Receptores Sensibles evaluados para Aeropuerto (Ciudadela La FAE y Universidad Estatal de Guayaquil)

Sensitive Receptor Summary

F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop

CO - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	254.40511	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	4/22/2015, 7
1-HR	1ST	185.70107	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 5
24-HR	1ST	28.78345	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	3/28/2015, 24
24-HR	1ST	24.14434	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 24
ANNUAL		1.80773	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	
ANNUAL		0.63233	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	

NOX - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	159.34661	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	4/22/2015, 7
1-HR	1ST	116.31383	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 5
24-HR	1ST	18.02851	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	3/28/2015, 24
24-HR	1ST	15.12281	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 24
ANNUAL		1.13229	ug/m ³	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	
ANNUAL		0.39606	ug/m ³	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	

Sensitive Receptor Summary

F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop

PM10 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	1.22454	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	4/22/2015, 7
1-HR	1ST	0.89384	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 5
24-HR	1ST	0.13854	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	3/28/2015, 24
24-HR	1ST	0.11621	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 24
ANNUAL		0.00870	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	
ANNUAL		0.00304	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	

SO2 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	11.93137	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	4/22/2015, 7
1-HR	1ST	8.70921	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 5
24-HR	1ST	1.34992	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	3/28/2015, 24
24-HR	1ST	1.13235	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	6/20/2015, 24
ANNUAL		0.08478	ug/m^3	FAE	623850.00	9760300.00	8.67	0.00	8.67	
ANNUAL		0.02966	ug/m^3	UG	622715.00	9758745.00	6.83	0.00	6.83	

Anexo 6: Resumen de resultados para Puertos

Results Summary

F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop

CO - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	5.46533	ug/m ³	621048.77	9747813.61	0.00	0.00	15.00	9/19/2015, 17
24-HR	1ST	1.42038	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	10/16/2015, 24
ANNUAL		0.74206	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	

NOX - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	34.52722	ug/m ³	621048.77	9747813.61	0.00	0.00	15.00	9/19/2015, 17
24-HR	1ST	8.97240	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	10/16/2015, 24
ANNUAL		4.68361	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	

PM10 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	3.65874	ug/m ³	621048.77	9747813.61	0.00	0.00	15.00	9/19/2015, 17
24-HR	1ST	0.95053	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	10/16/2015, 24
ANNUAL		0.49505	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	

SO2 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	5.42998	ug/m^3	621048.77	9747813.61	0.00	0.00	15.00	9/19/2015, 17
24-HR	1ST	1.40997	ug/m^3	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	10/16/2015, 24
ANNUAL		0.73098	ug/m^3	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	

Anexo 7: Receptores Sensibles evaluados para Puertos (Ciudadela La Fragata)

Sensitive Receptor Summary

F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop

CO - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	1.64876	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	4/29/2015, 19
24-HR	1ST	0.79631	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	2/2/2015, 24
ANNUAL		0.37035	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	

NOX - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	10.37015	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	4/29/2015, 19
24-HR	1ST	5.01225	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	2/2/2015, 24
ANNUAL		2.32778	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	

PM10 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	1.08530	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	4/29/2015, 19
24-HR	1ST	0.52568	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	2/2/2015, 24
ANNUAL		0.24313	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	

SO2 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	Receptor ID	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	1.57040	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	4/29/2015, 19
24-HR	1ST	0.76398	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	2/2/2015, 24
ANNUAL		0.35033	ug/m^3	Fragata	621368.00	9752245.00	4.83	0.00	4.83	

Anexo 8: Resumen de resultados para Combinación (Aeropuertos + Puertos)

Results Summary

F:\Simulaciones_Tesis_Carlos_Evelyn\Puertos_Aeropuerto\Puertos_Aerop

CO - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	538.64691	ug/m ³	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	84.62950	ug/m ³	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		29.07426	ug/m ³	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	

NOX - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	338.05681	ug/m ³	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	54.23397	ug/m ³	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		19.11156	ug/m ³	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	

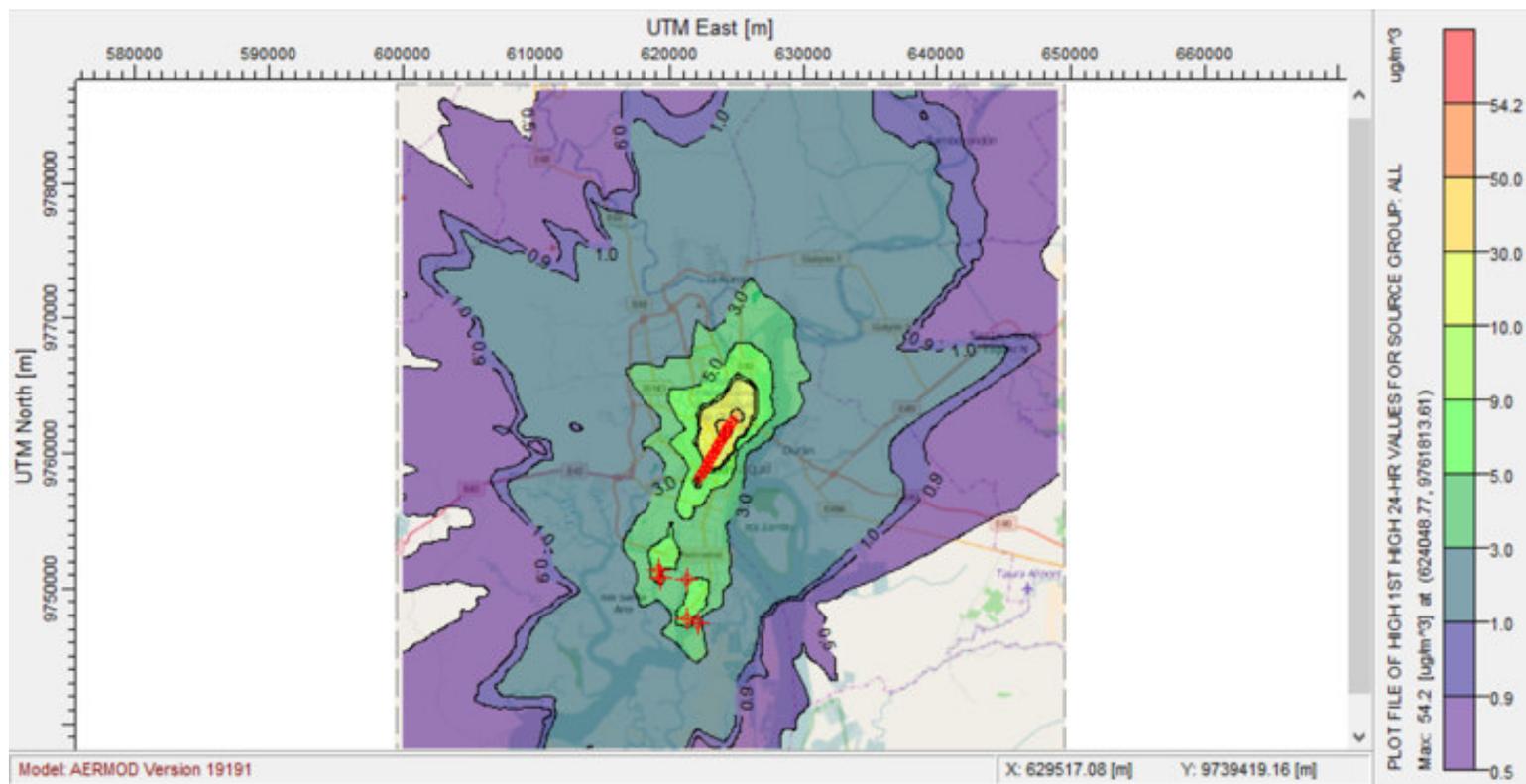
PM10 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	3.65874	ug/m ³	621048.77	9747813.61	0.00	0.00	15.00	9/19/2015, 17
24-HR	1ST	0.95053	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	10/16/2015, 24
ANNUAL		0.49518	ug/m ³	622048.77	9748813.61	-0.10	0.00	-0.10	

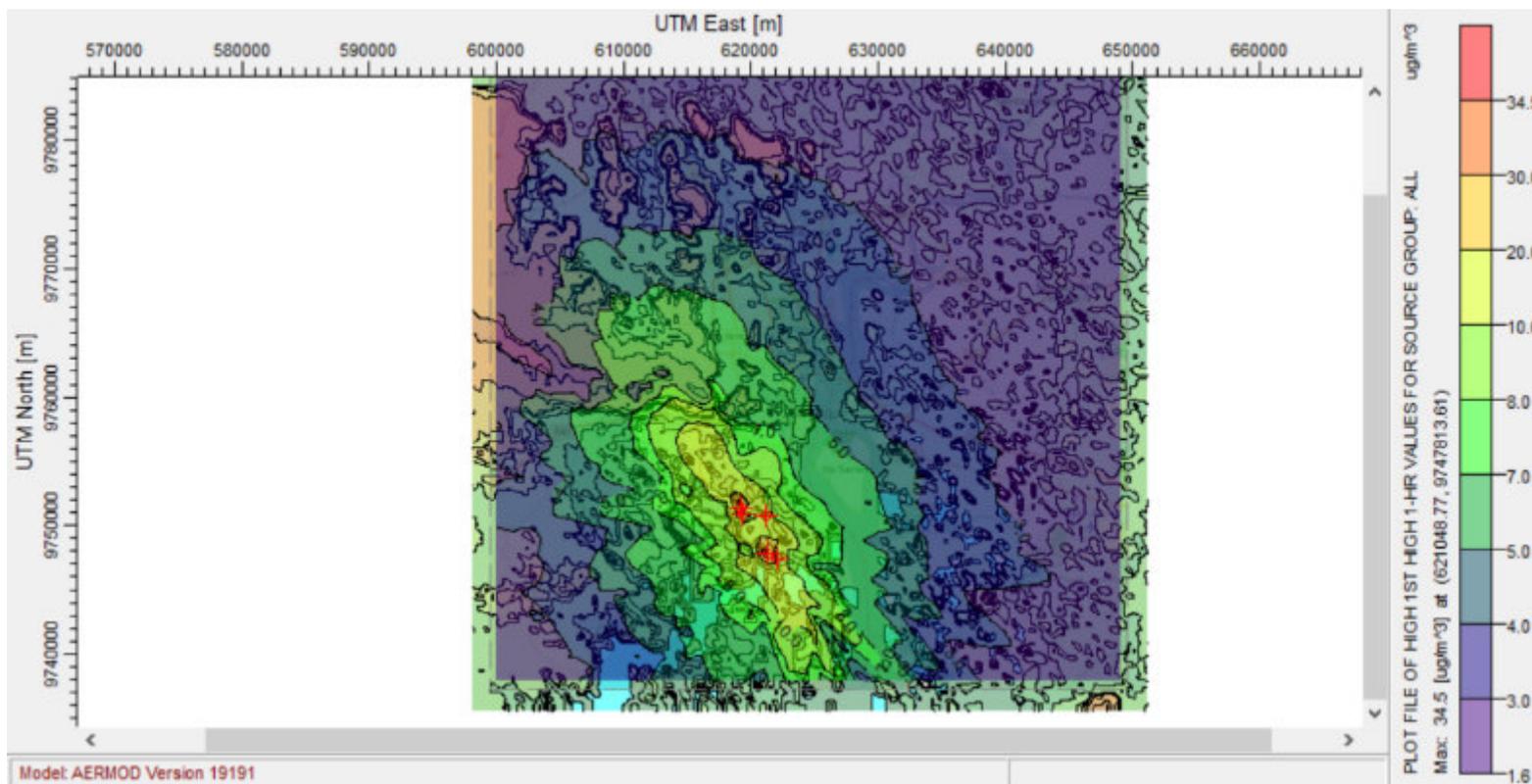
SO2 - Concentration - Source Group: ALL

Averaging Period	Rank	Peak	Units	X (m)	Y (m)	ZELEV (m)	ZFLAG (m)	ZHILL (m)	Peak Date, Start Hour
1-HR	1ST	25.36843	ug/m^3	625048.77	9762813.61	2.00	0.00	2.00	11/24/2015, 3
24-HR	1ST	4.16556	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	12/23/2015, 24
ANNUAL		1.50601	ug/m^3	624048.77	9761813.61	0.90	0.00	26.00	

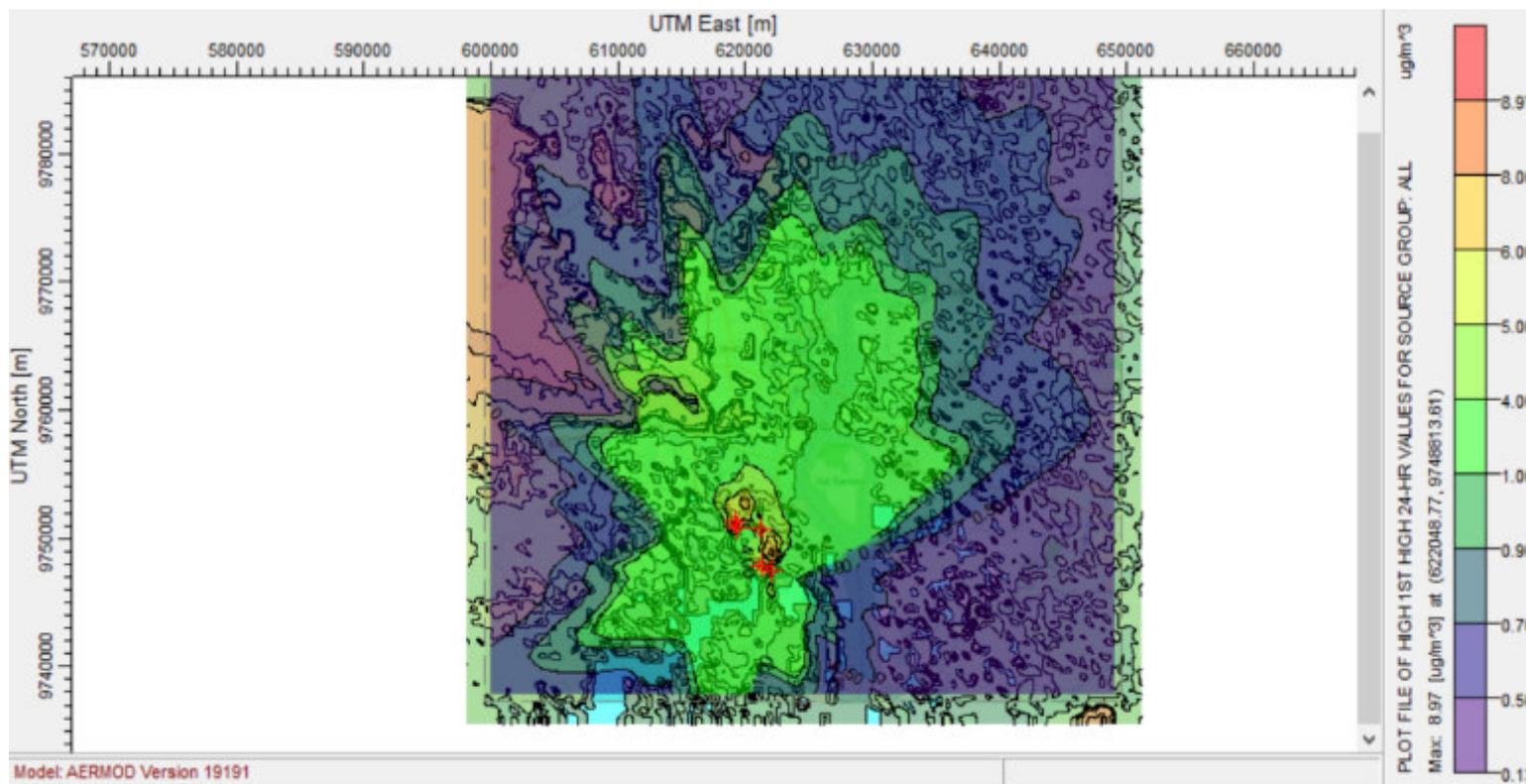
Anexo 9: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto combinado de fuentes de puertos y aeropuerto.



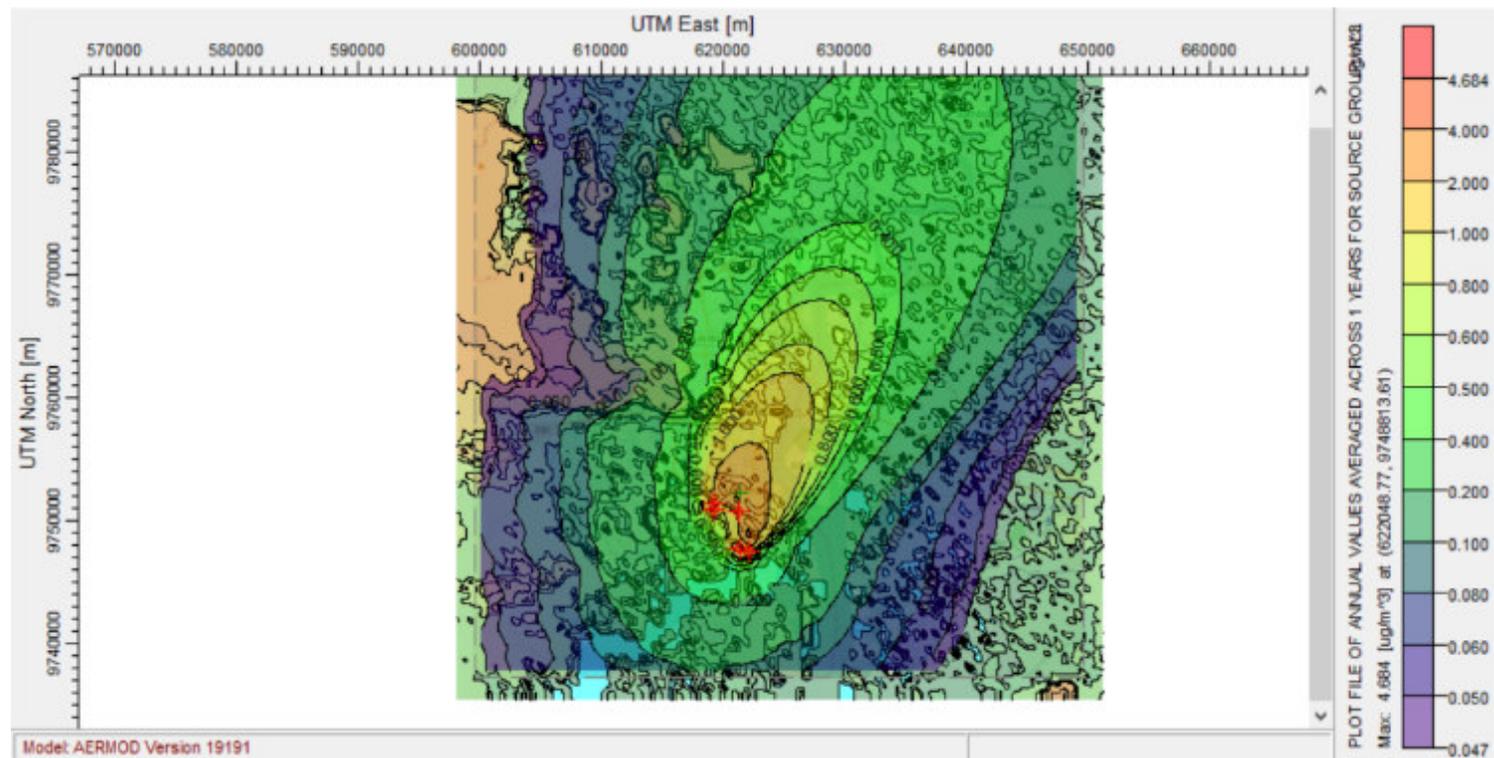
Anexo 10: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo puertos.



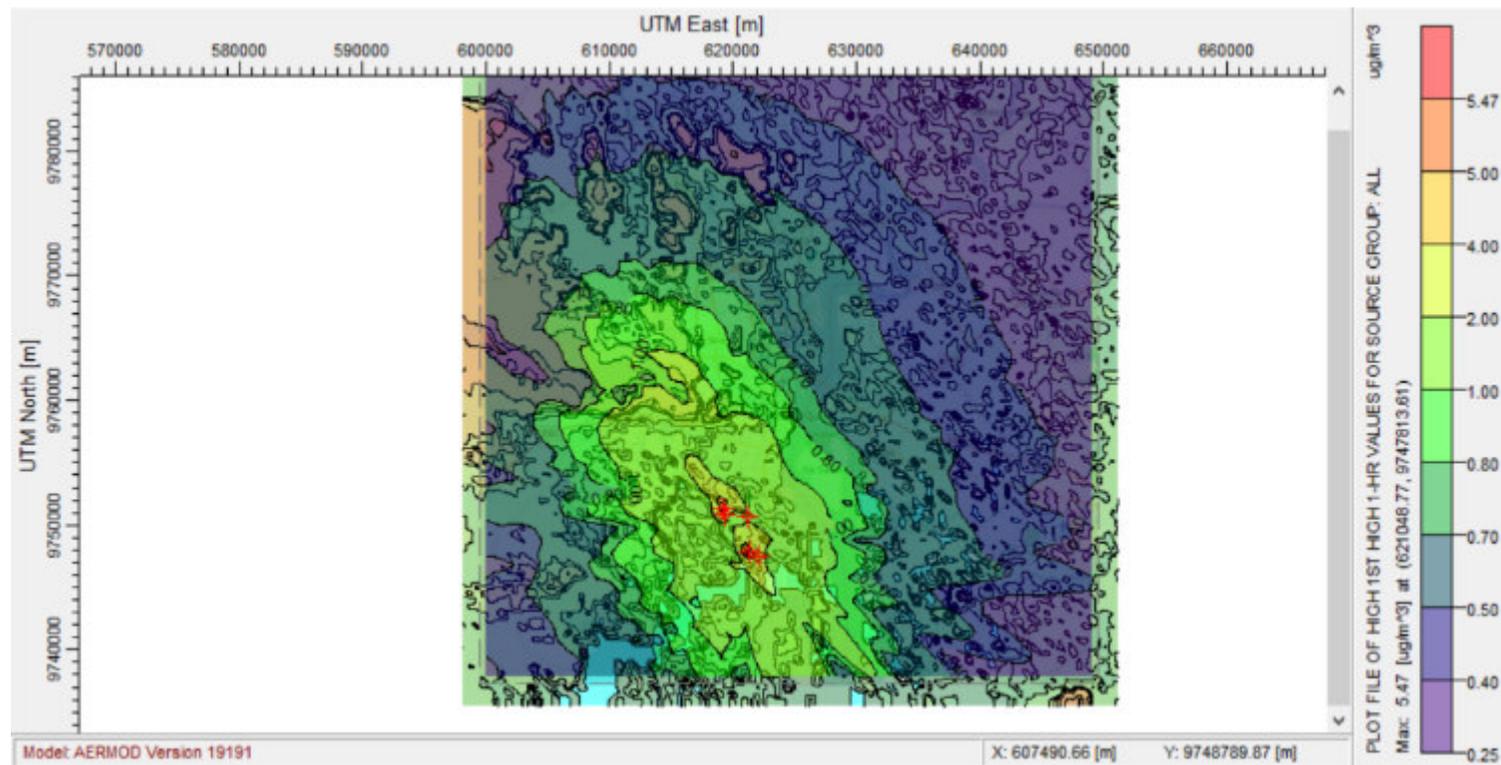
Anexo 11: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo puertos.



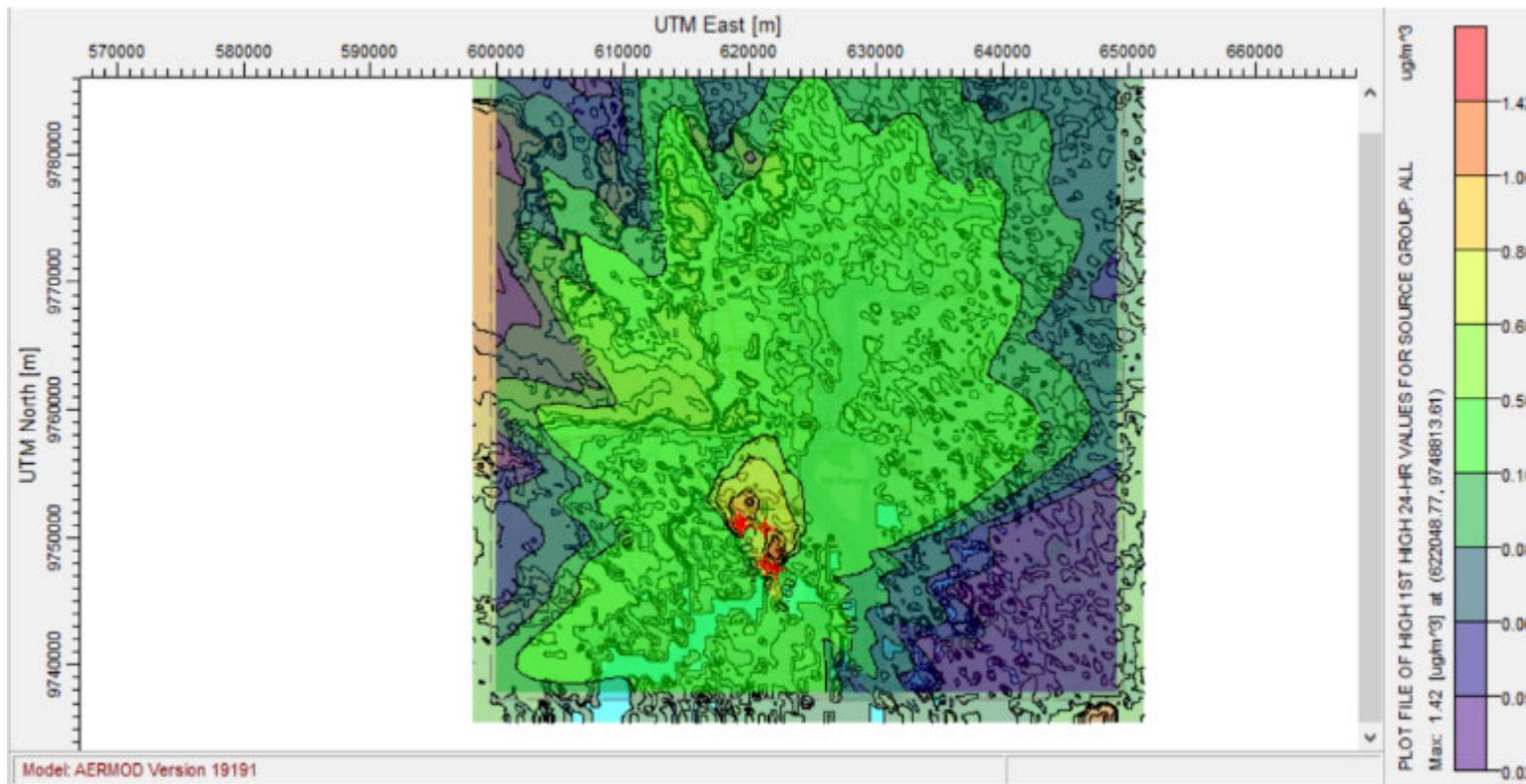
Anexo 12: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo puertos.



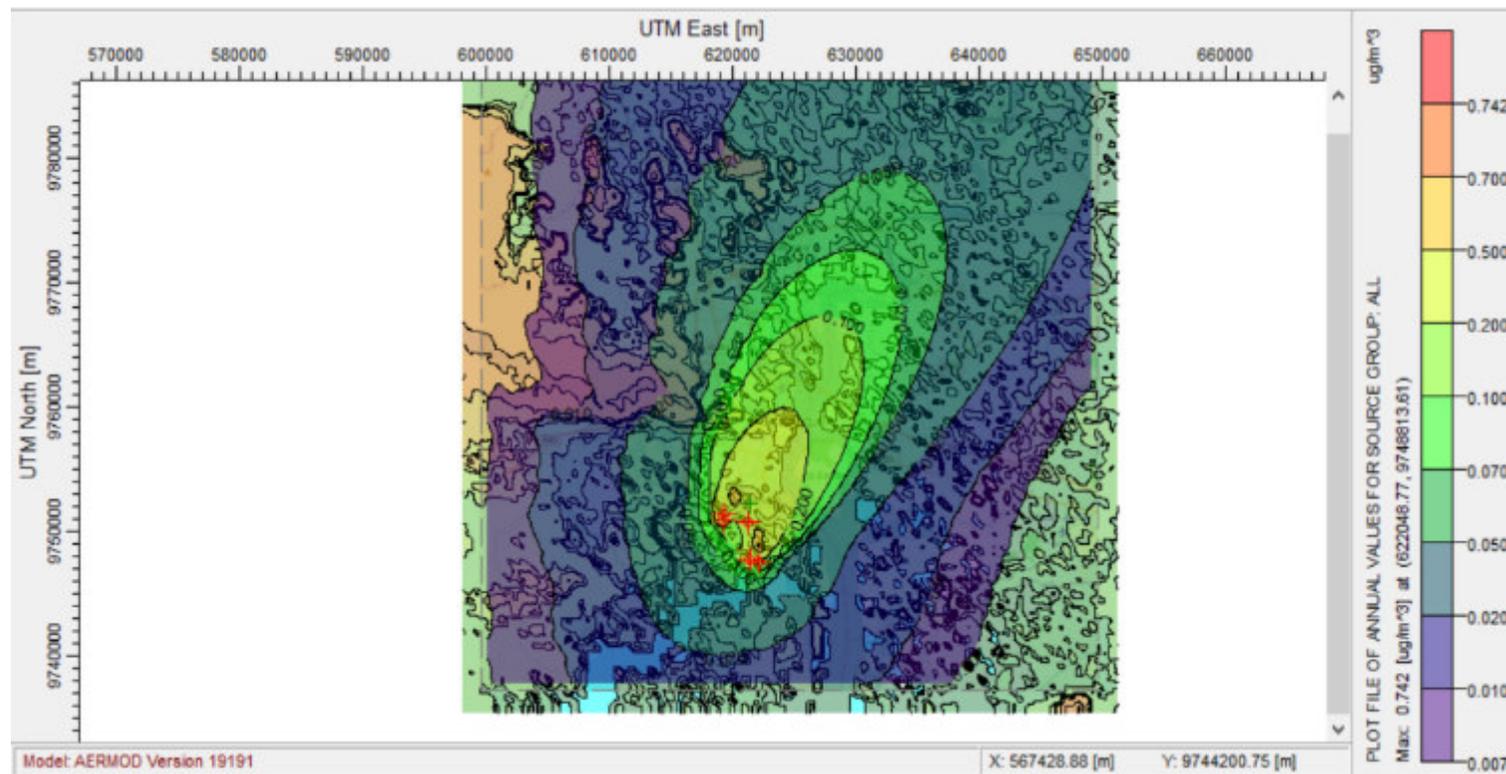
Anexo 13: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo puertos.



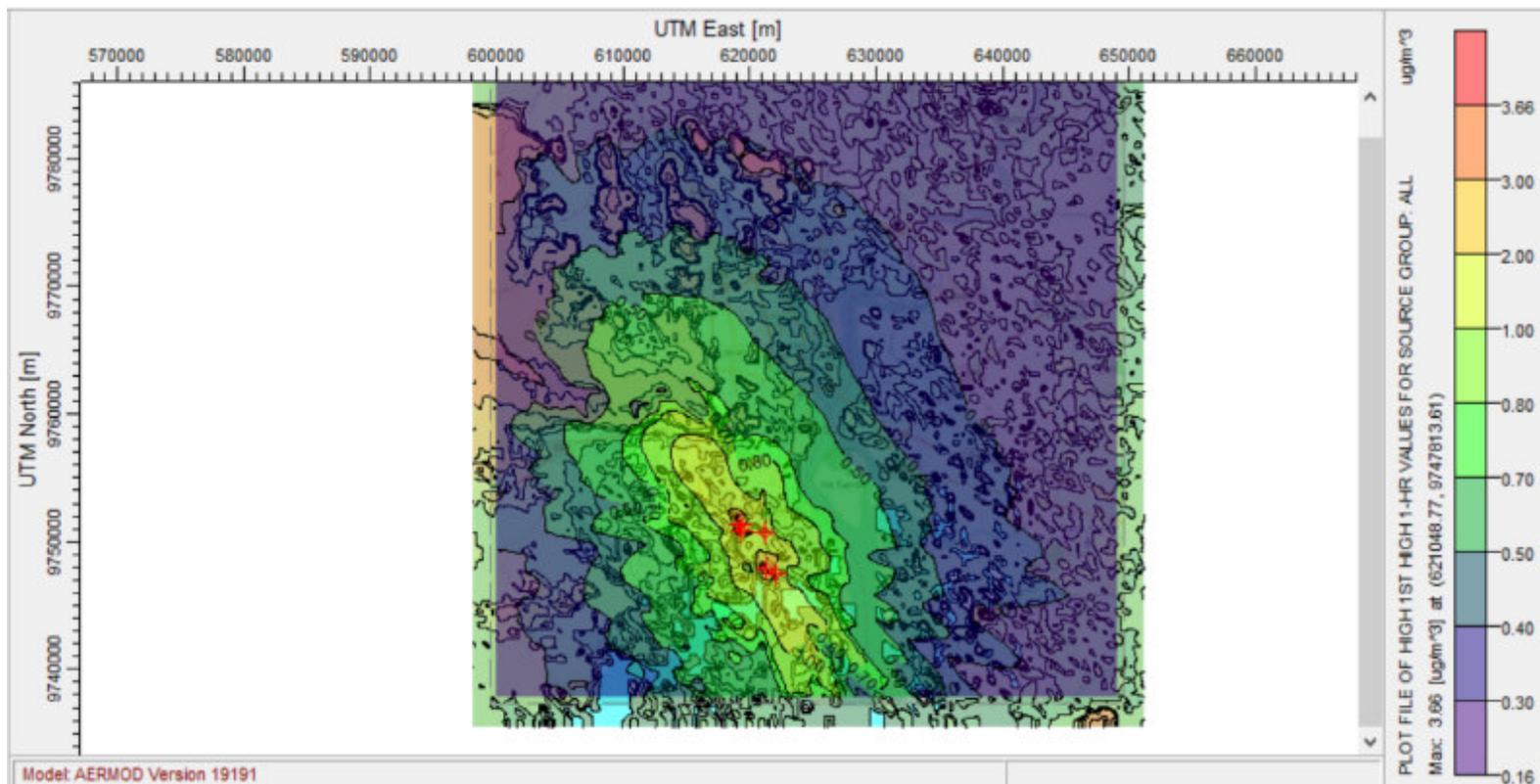
Anexo 14: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo puertos.



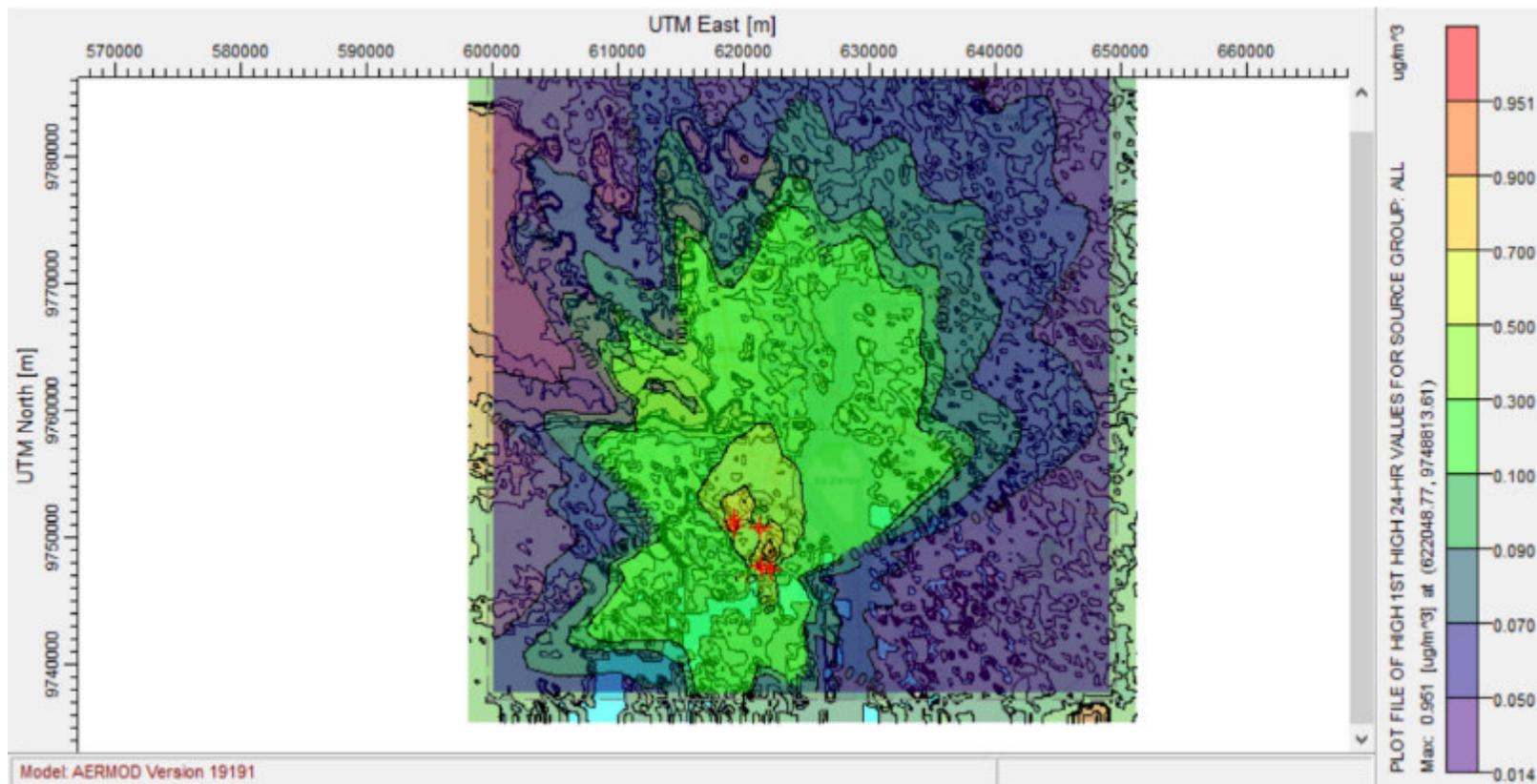
Anexo 15: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo puertos.



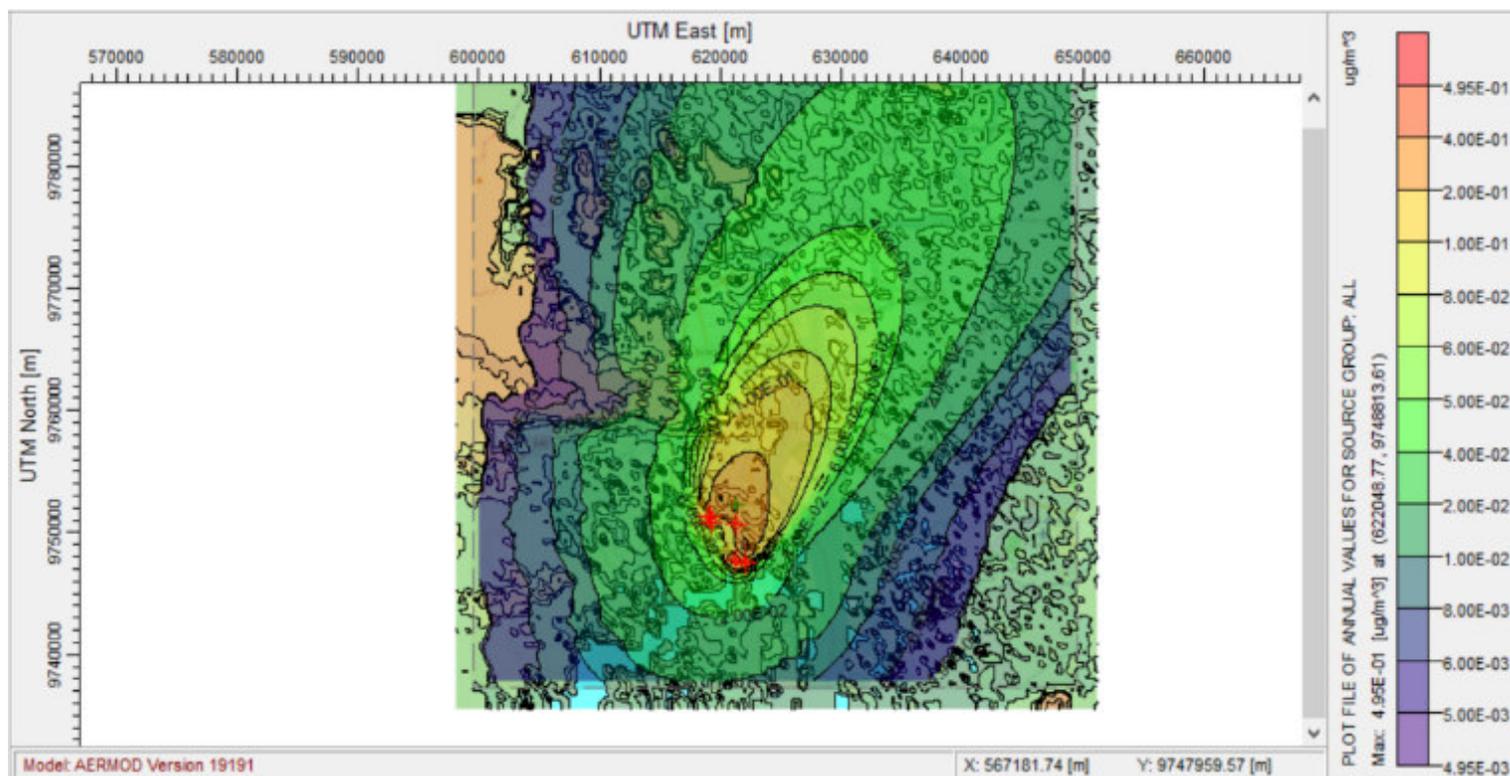
Anexo 16: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo puertos.



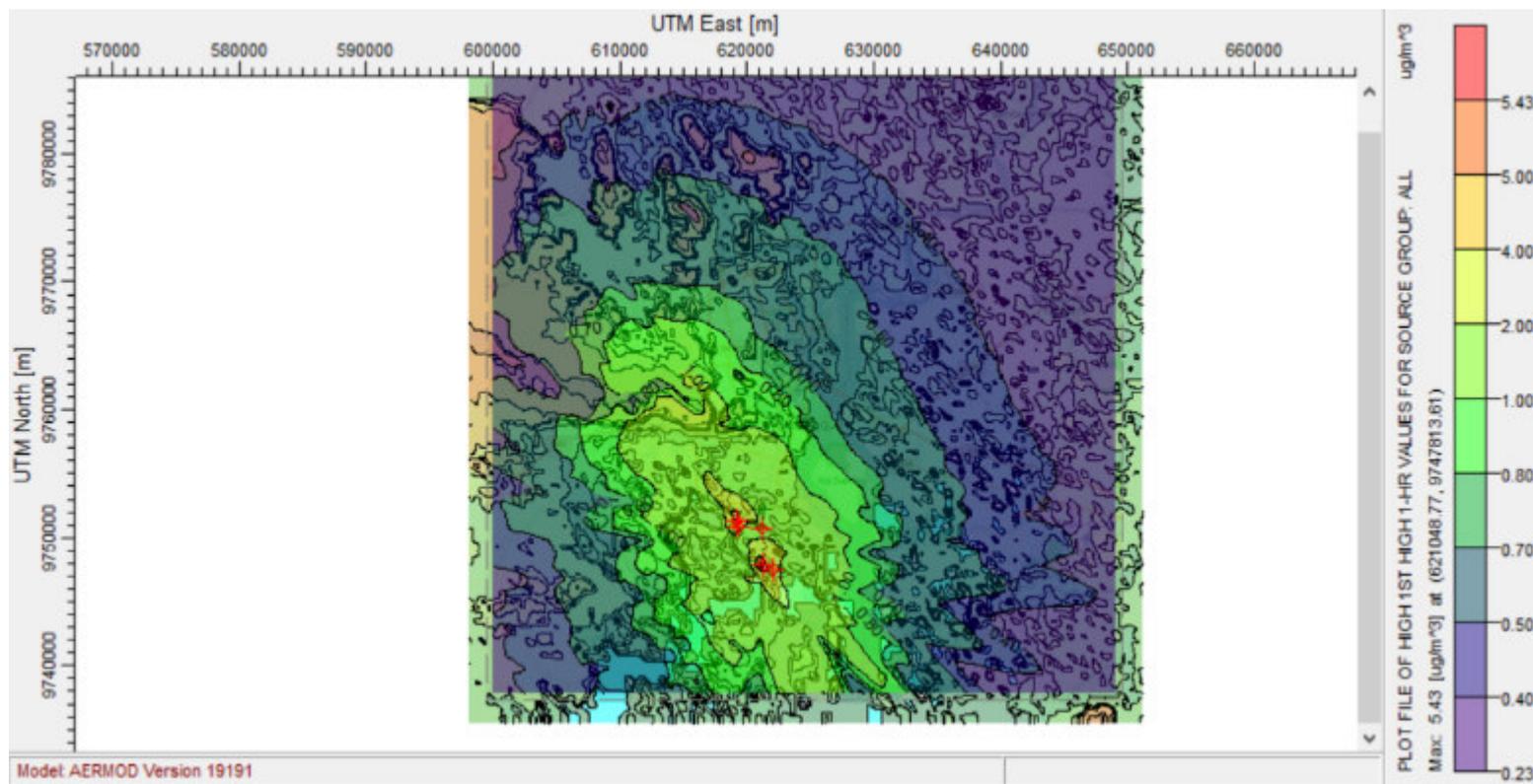
Anexo 17: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo puertos.



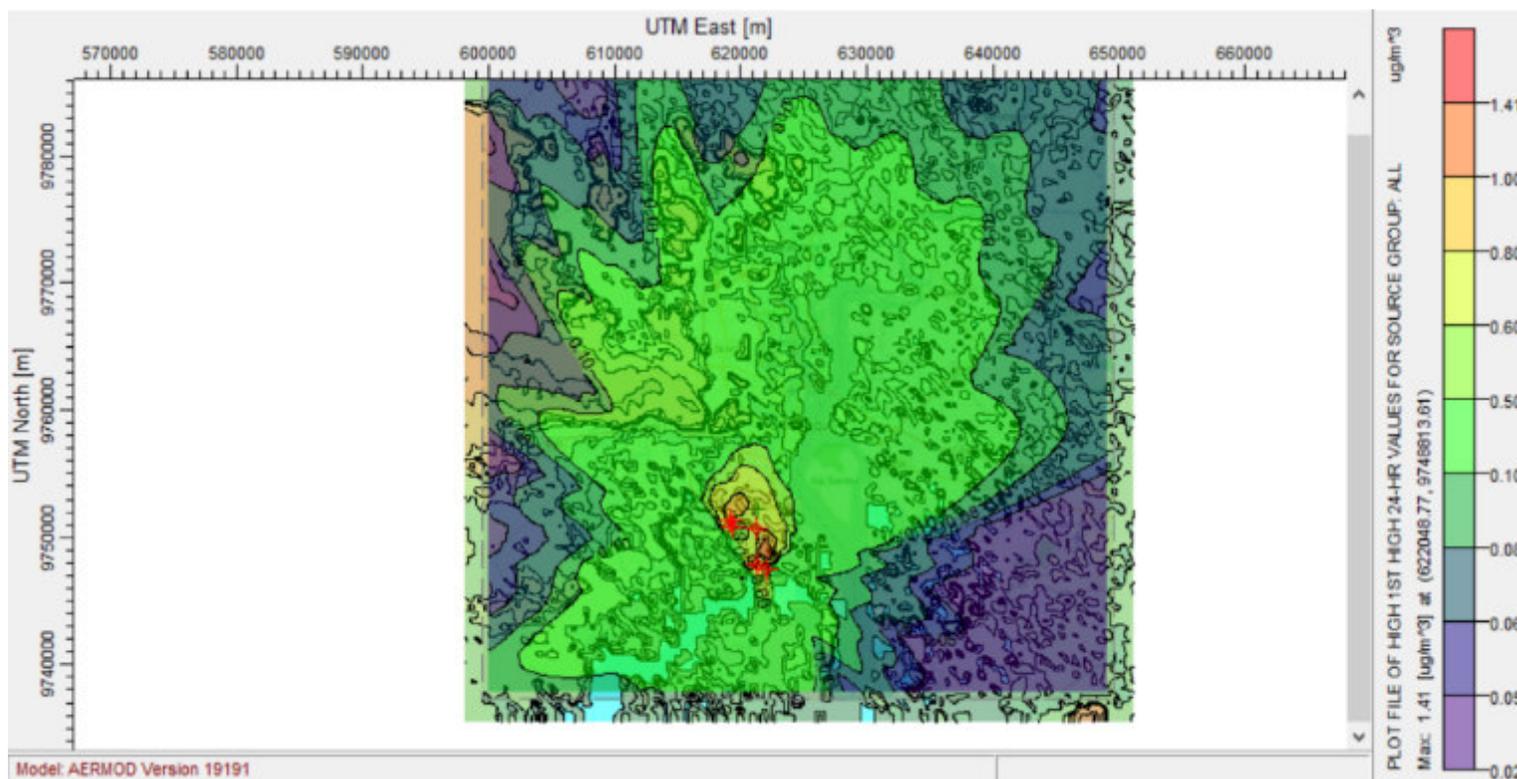
Anexo 18: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo puertos.



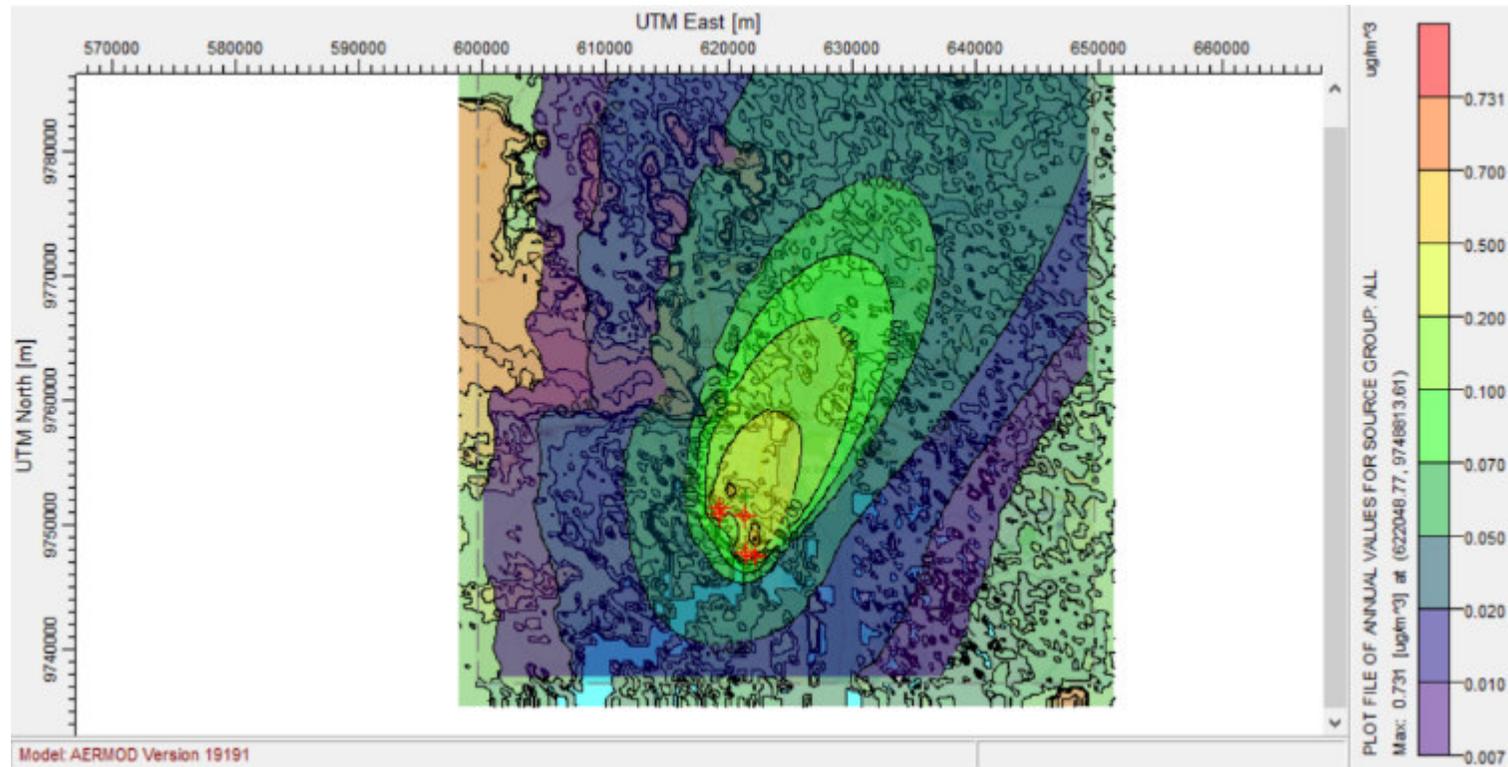
Anexo 19: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo puertos.



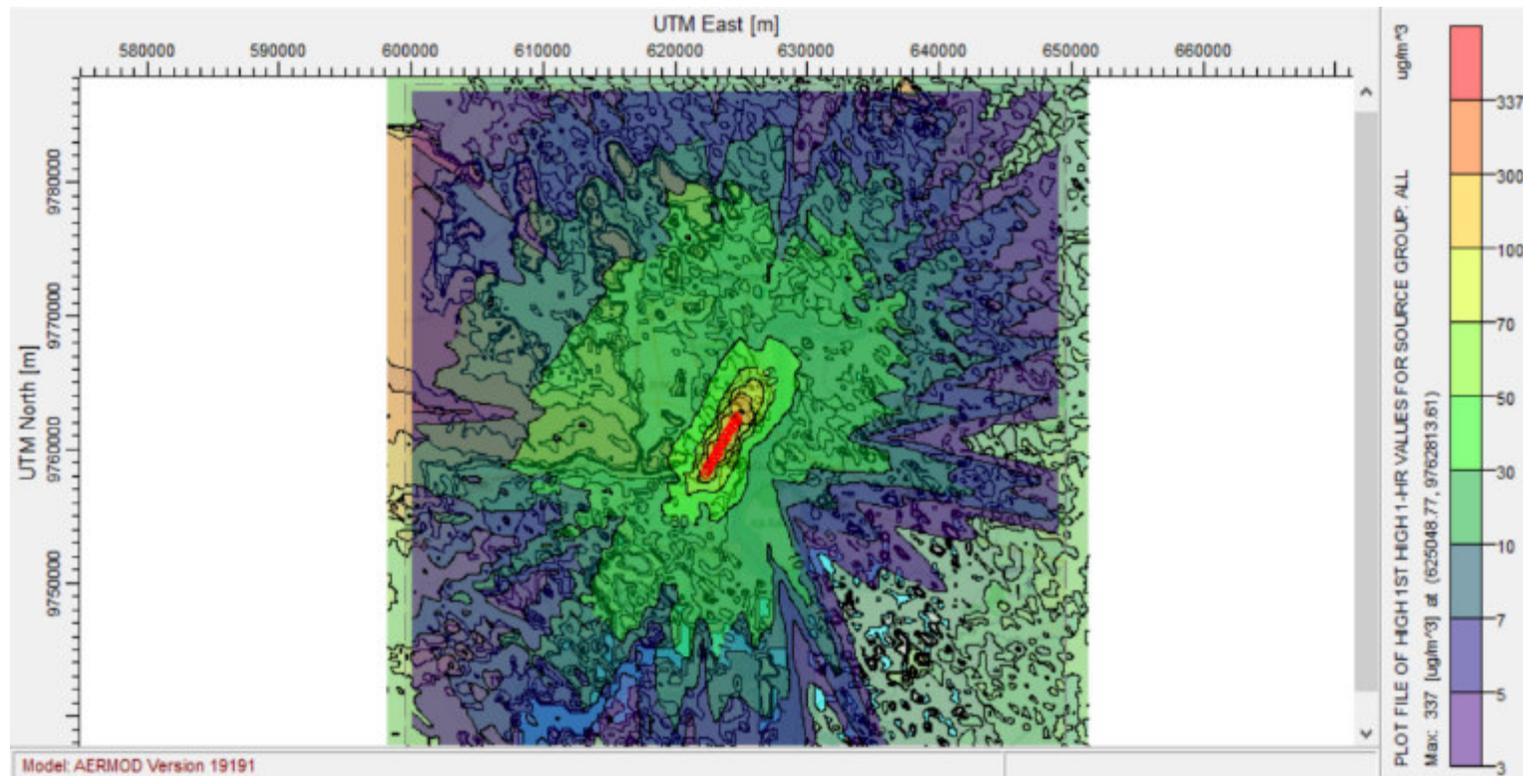
Anexo 20: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo puertos.



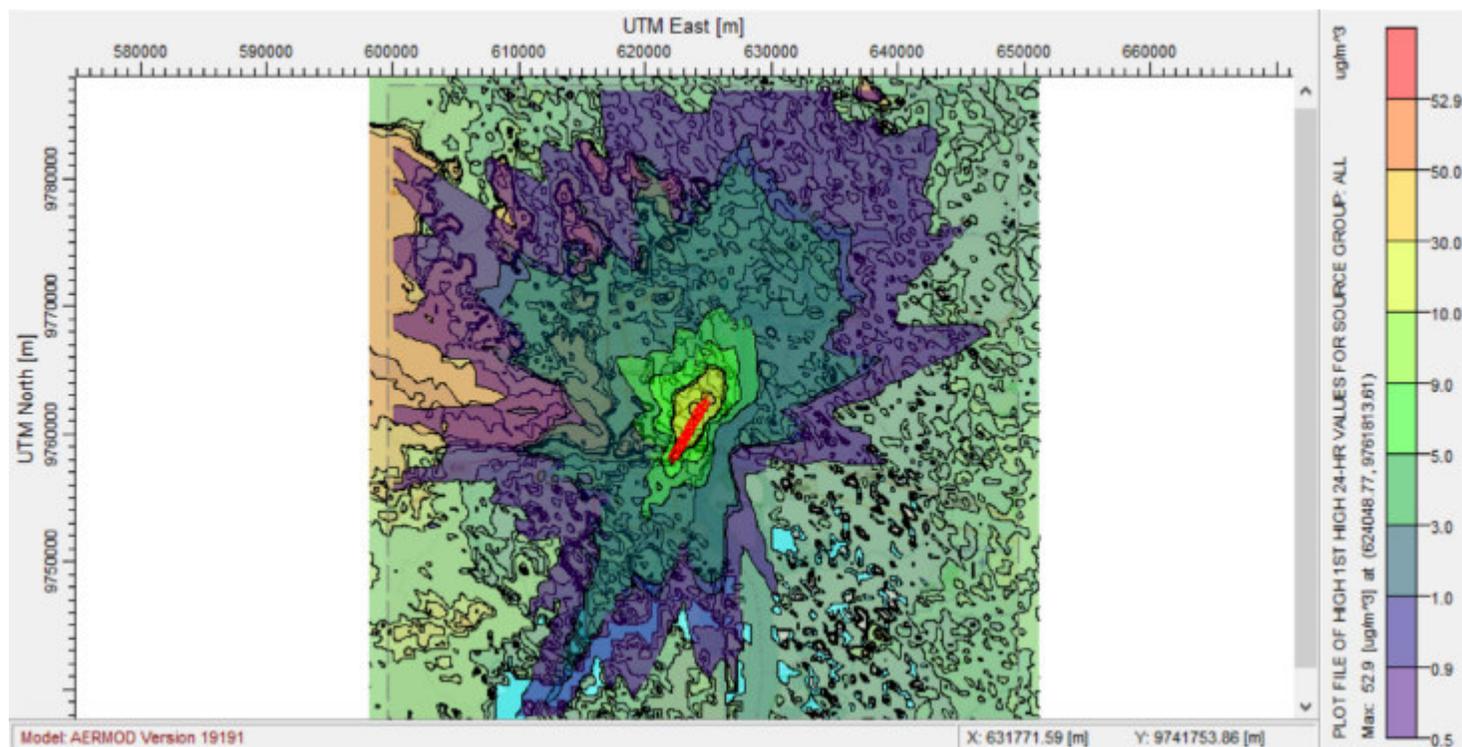
Anexo 21: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo puertos.



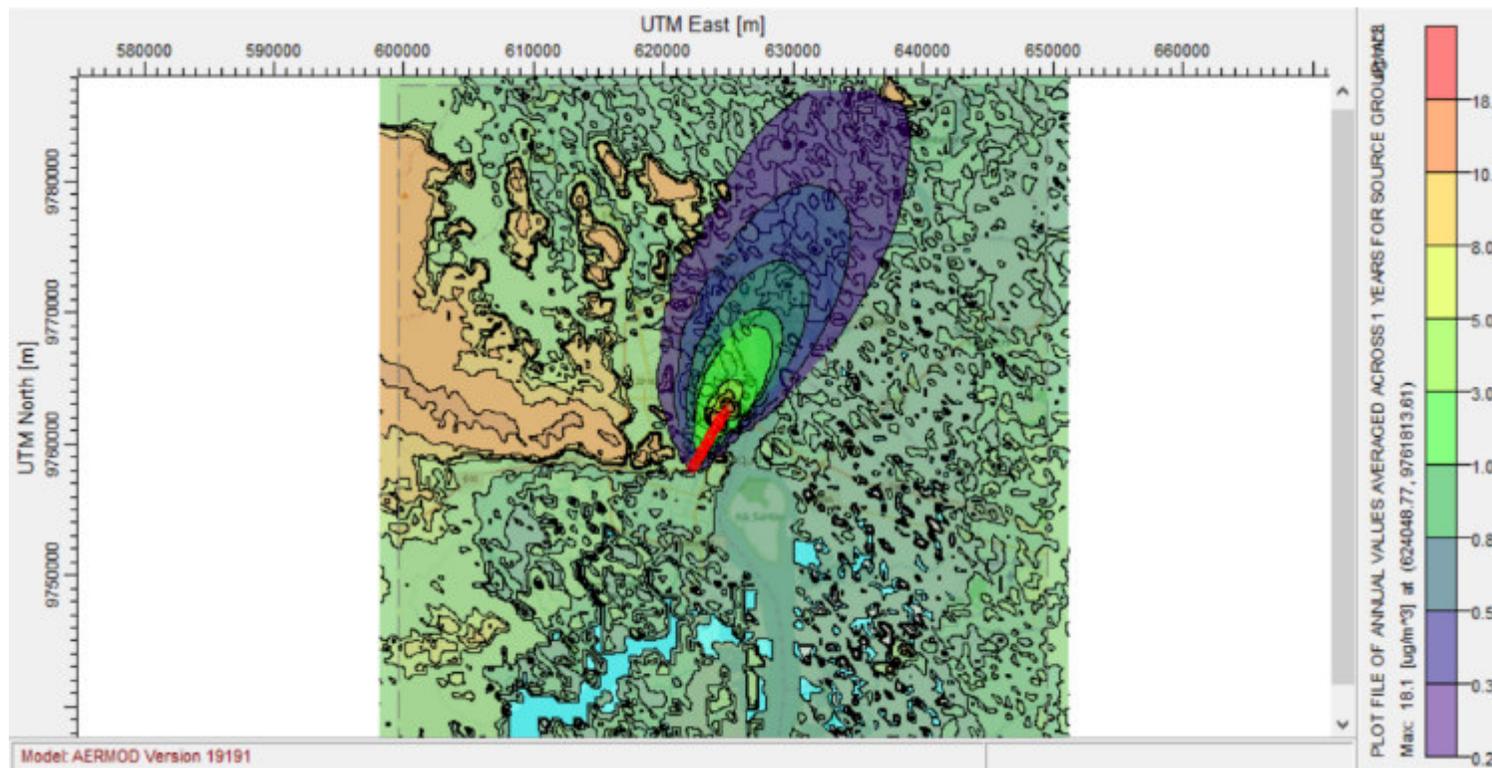
Anexo 22: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo aeropuerto.



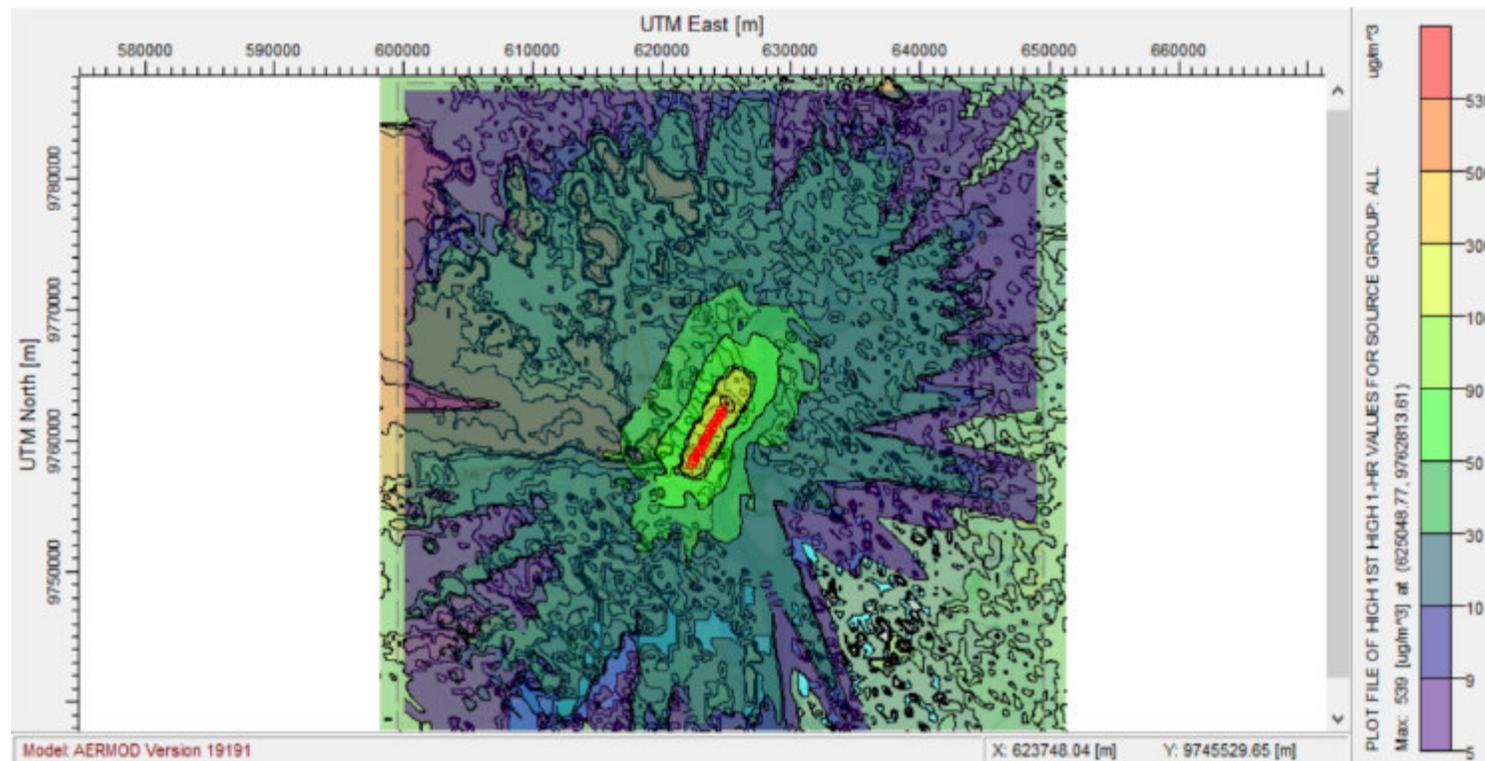
Anexo 23: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo aeropuerto.



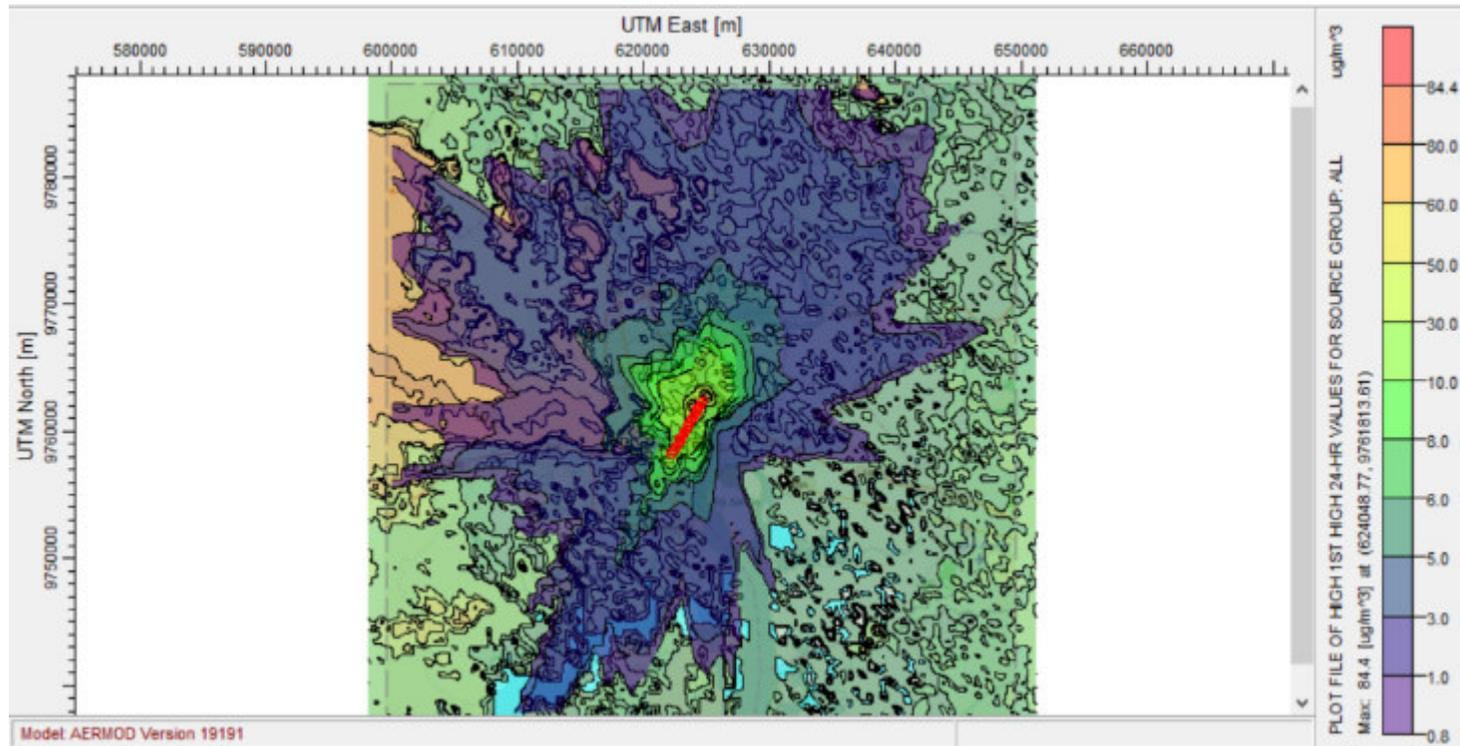
Anexo 24: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante NOx, efecto solo aeropuerto.



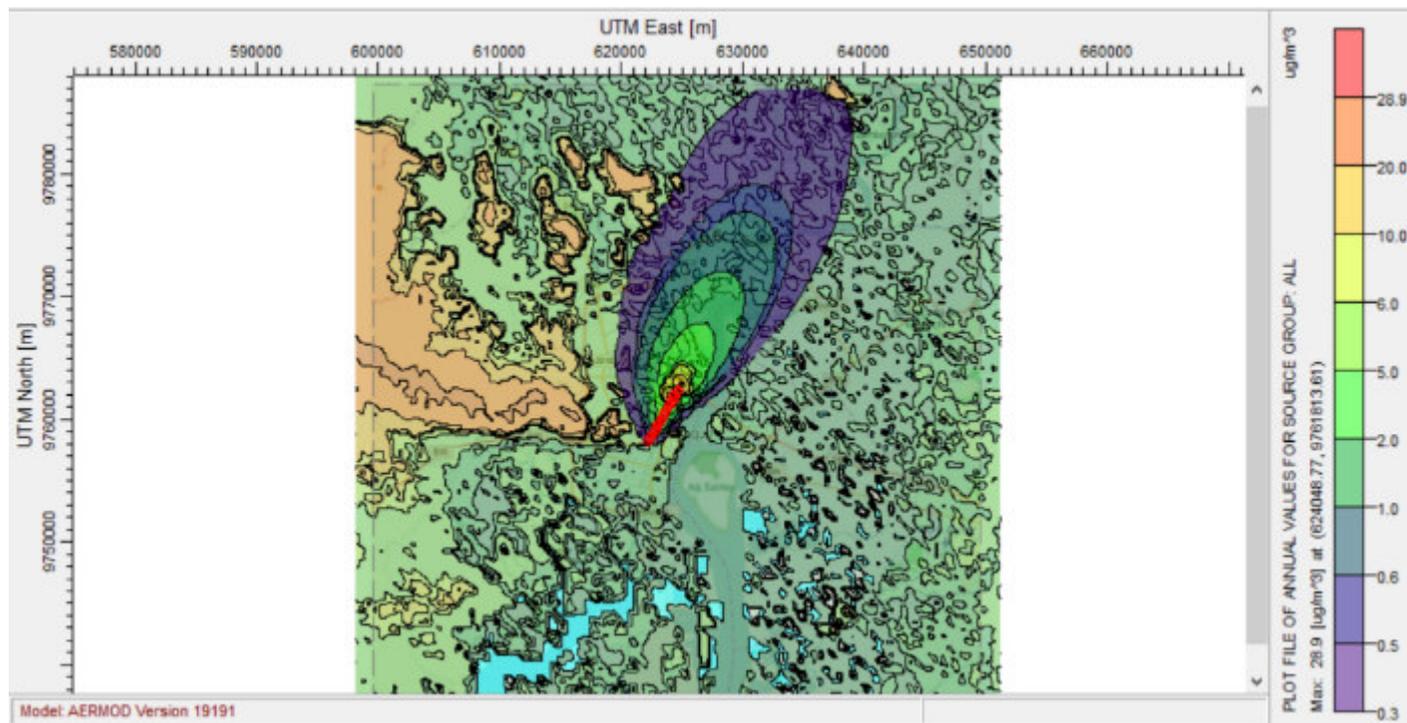
Anexo 25: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo aeropuerto.



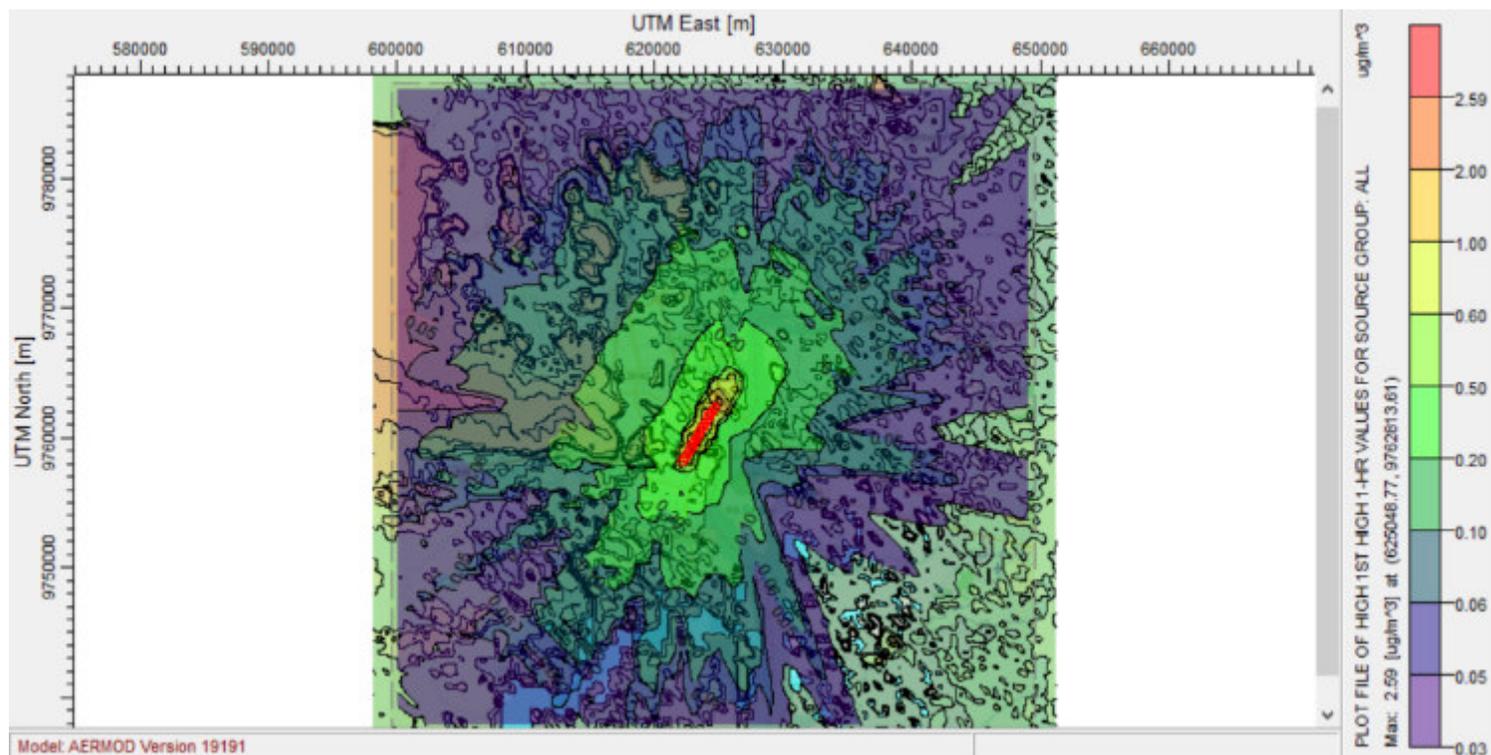
Anexo 26: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo aeropuerto.



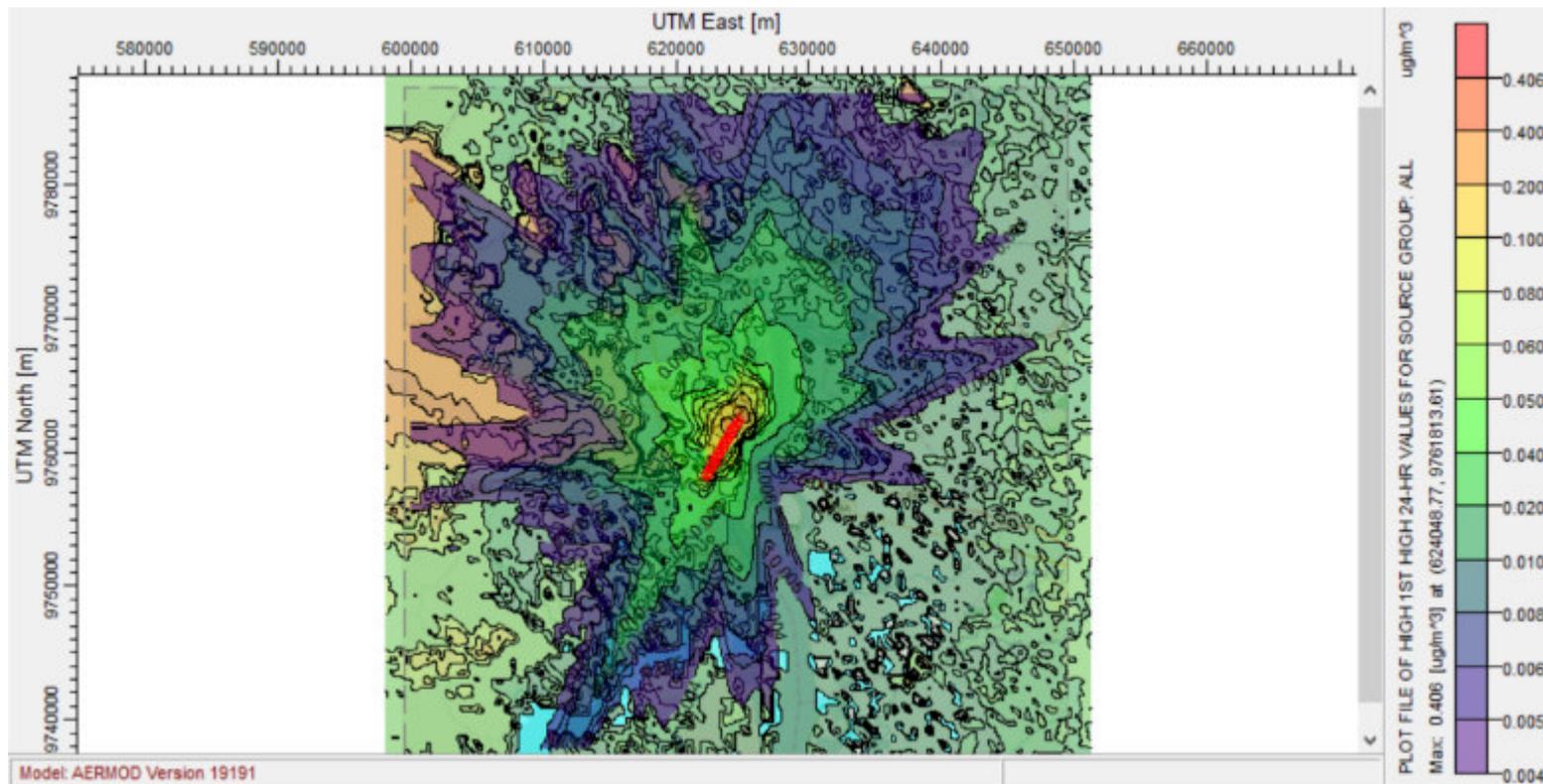
Anexo 27: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante CO, efecto solo aeropuerto.



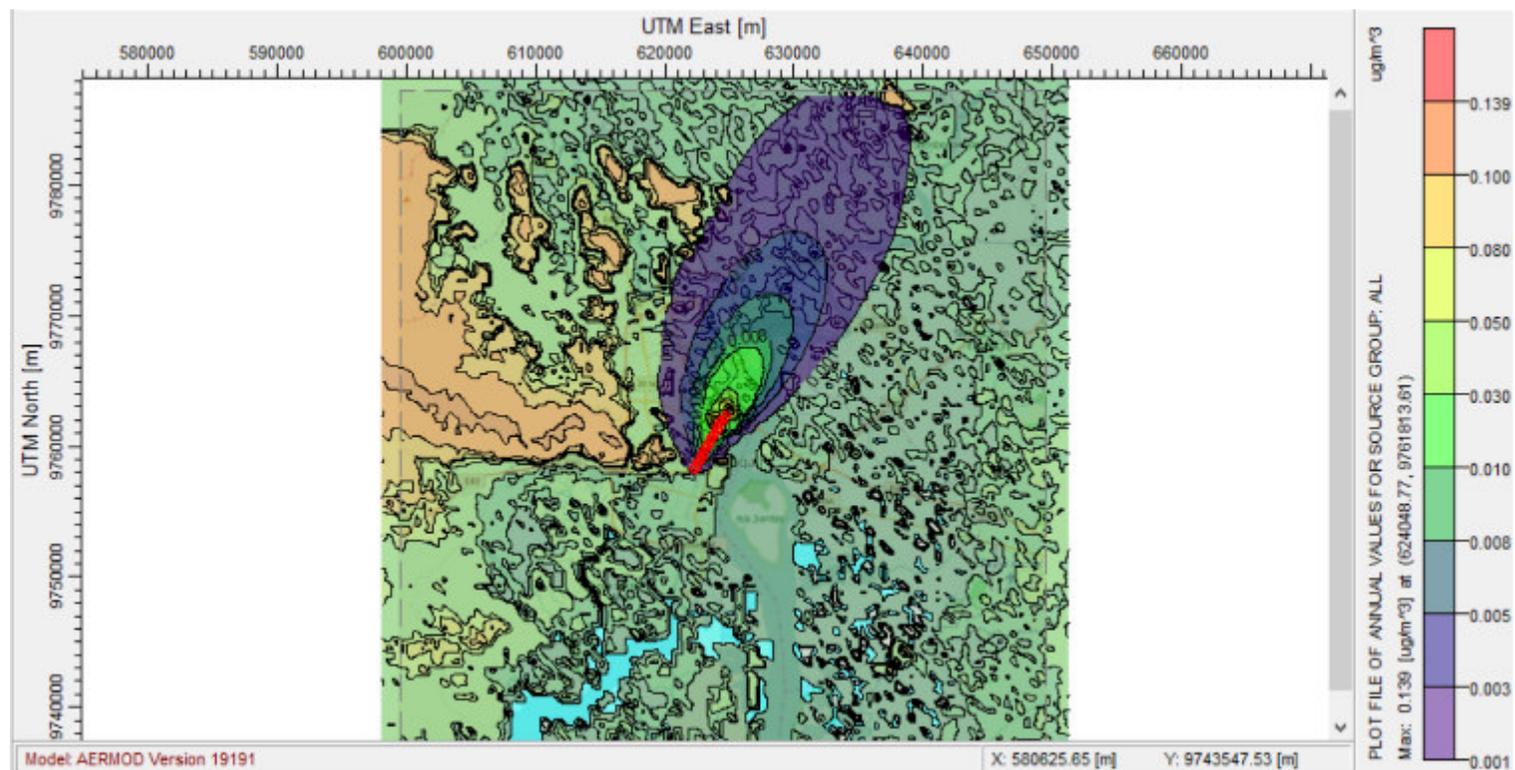
Anexo 28: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo aeropuerto.



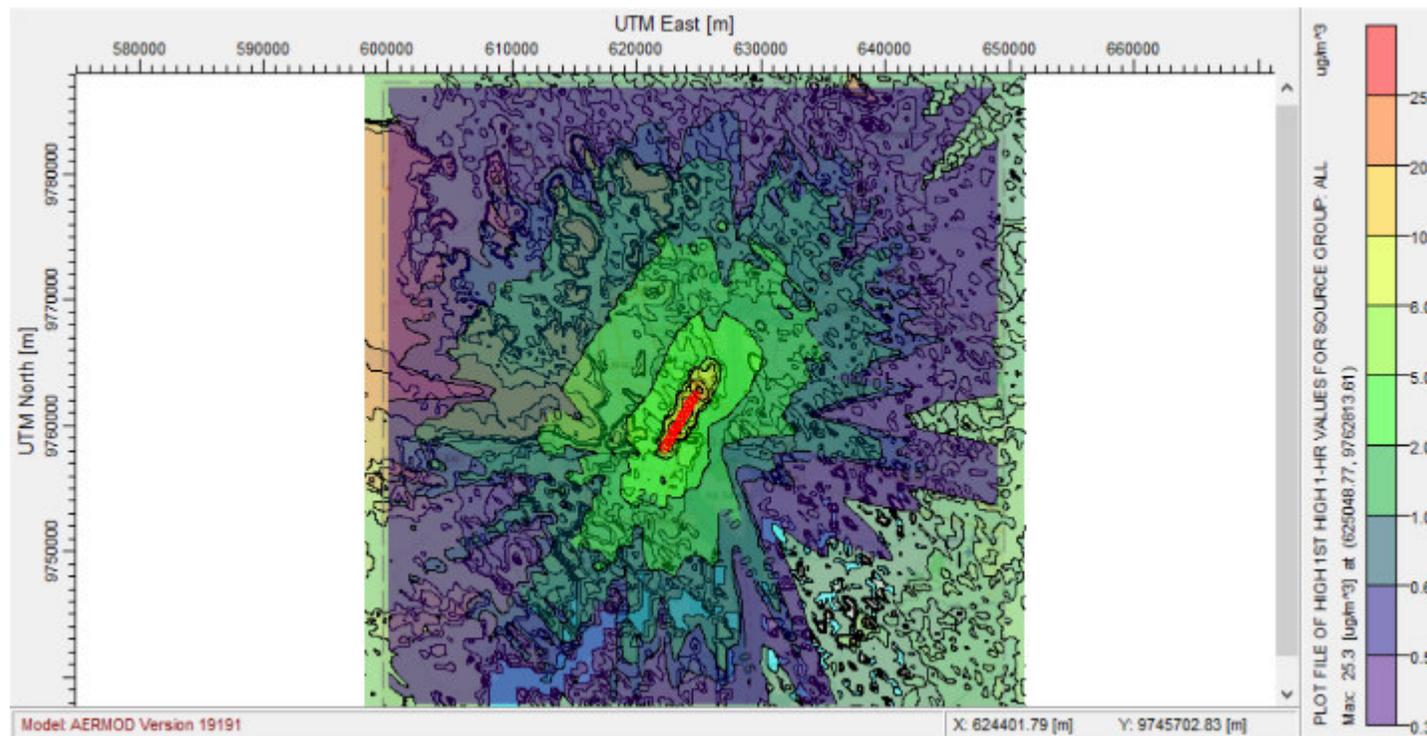
Anexo 29: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo aeropuerto.



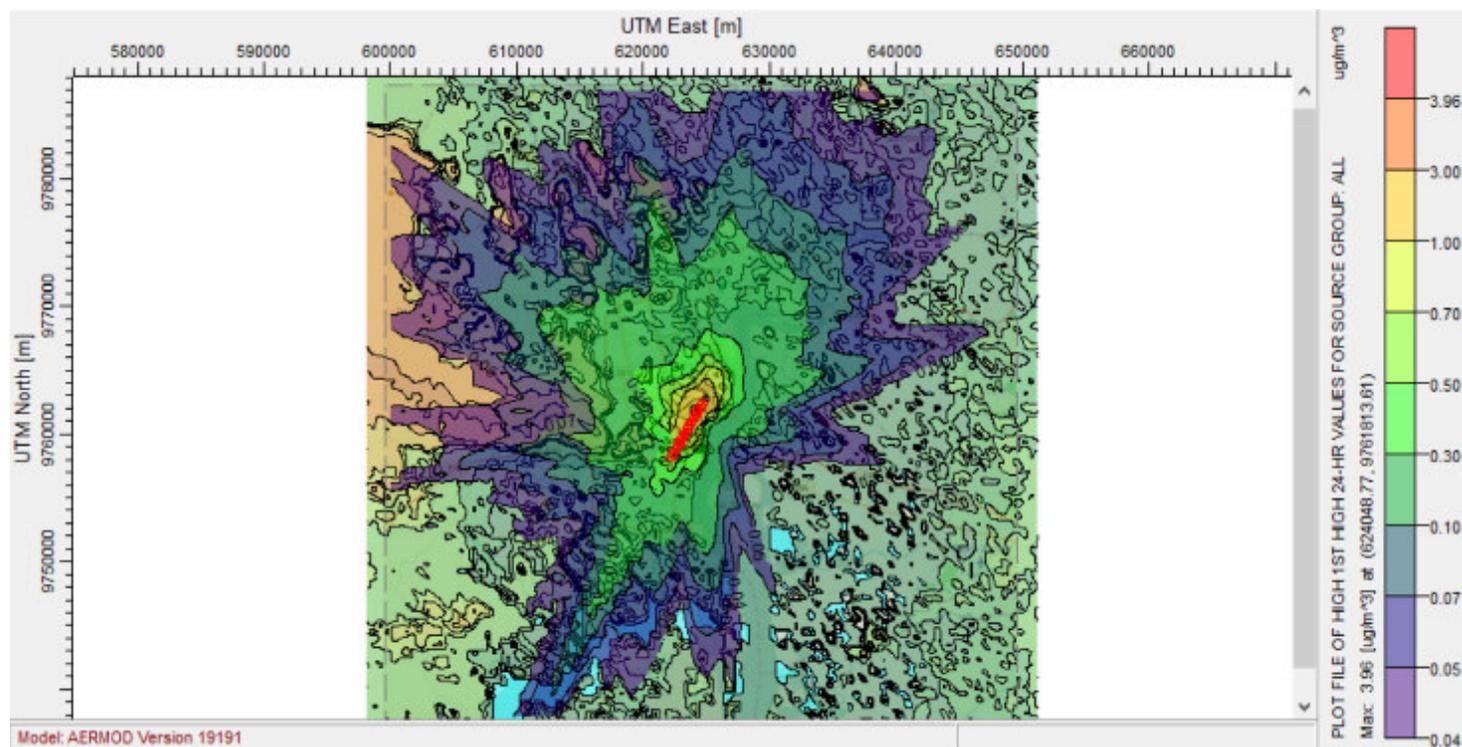
Anexo 30: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante PM₁₀, efecto solo aeropuerto.



Anexo 31: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo aeropuerto



Anexo 32: Mapa de iso-concentraciones promedio de 24 h, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo aeropuerto.



Anexo 33: Mapa de iso-concentraciones promedio de 1 año, periodo 2018, simulación de dispersión del contaminante SO_x, efecto solo aeropuerto.

