

PROYECTO

**LINEAMIENTOS PARA LA
ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS
TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN EL MARCO DEL
SISTEMA NACIONAL DE EVALUACIÓN
DEL IMPACTO AMBIENTAL**

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	5
II. OBJETO.....	6
III. ALCANCE	6
IV. BASE LEGAL.....	6
V. ESTRUCTURA DE UN DTM Y SU INTEGRACIÓN EN LOS IGA	7
VI. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE UN DTM.....	8
6.1 Introducción.....	8
6.2 Objetivos	8
6.3 Antecedentes	8
6.4 Información desarrollada en la Línea Base o en la Descripción del proyecto	9
6.4.1 Ubicación política y geoespacial del área de estudio.....	9
6.4.2 Descripción de la actividad que genera o generará emisiones en el área de estudio	10
6.4.3 Geomorfología y usos del suelo	10
6.4.4 Clima y meteorología	10
6.4.4.1 Información de los datos meteorológicos.....	10
6.4.4.2 Clasificación climática.....	12
6.4.4.3 Tiempo y clima	12
6.4.4.4 Temperatura del aire (°C).....	13
6.4.4.5 Precipitación (mm).....	14
6.4.4.6 Humedad Relativa (%)......	14
6.4.4.7 Vientos	14
6.4.4.8 Radiación Global (W/m ² o KW/m ² xDÍA)-(opcional).....	15
6.4.4.9 Altura de la Capa Límite Atmosférica (m)-(opcional).....	15
6.4.5 Calidad del aire	15
6.4.5.1 Monitoreo de calidad del aire	15
6.4.5.2 Nivel de fondo.....	16
6.5 Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos.....	17
6.5.1 Justificación del modelo utilizado	17
6.5.2 Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	17
6.6 Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos.....	18
6.6.1 Dominio de modelamiento.....	18
6.6.2 Periodo de modelamiento	18
6.6.3 Inventario de emisiones	18
6.6.3.1 Cálculo de emisiones y tasas de emisión	18

6.6.4	Receptores discretos.....	19
6.6.5	Normas y criterios ambientales	20
6.6.6	Escenarios del modelamiento	20
6.6.7	Resultados	21
6.6.7.1	Concentraciones en los receptores discretos.....	22
6.6.7.2	Mapas de isoconcentraciones	23
6.6.8	Validación	23
6.7	Conclusiones.....	24
6.8	Recomendaciones.....	24
6.9	Referencias Bibliográficas	24
6.10	Anexos.....	24
6.10.1	Anexo 1	24
6.10.2	Anexo 2 (opcional, en el caso que se hayan utilizado datos meteorológicos modelados).....	24
6.10.3	Anexo 3 Inventario de emisiones	24
6.10.4	Anexo 4 (según el/los escenarios/s de modelamiento realizado/s en el DTM) 24	
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
VIII.	APÉNDICES	28
IX.	GLOSARIO	70

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico que viene afrontando el país por actividades relacionadas al comercio, industria u otros fines productivos o no, demandan un mayor uso de recursos y energía, lo cual se manifiesta entre otros, en una mayor afectación y liberación de contaminantes particulados y gaseosos hacia la atmósfera.

Una parte de los efectos dañinos crónicos en la salud de las personas son causados por las concentraciones elevadas de contaminantes particulados en el aire, dentro de estas se encuentra el material particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM_{2,5}), que por su tamaño penetra en los espacios más profundos de los pulmones; por lo que, resulta de vital importancia efectuar mediciones en campo que permitan cuantificar las cantidades de esta. Asimismo, diferentes estudios han reportado efectos dañinos en las personas a causa de los contaminantes del aire como el dióxido de azufre (SO₂), material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀), ozono (O₃), entre otros^{1,2,3}. Es preciso indicar que, en el Perú el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) en su plataforma virtual del Servicio de Información Nacional y Denuncias Ambientales (SINADA) reportó que, durante el 2019 y mediados del 2022 el 49.3% de denuncias ambientales a nivel nacional eran relacionadas a afectaciones sobre la calidad del al aire⁴.

Por lo expuesto anteriormente, se evidencia que la contaminación del aire en el Perú es la consecuencia de diversos problemas, originados, principalmente por actividades antropogénicas. Si bien es cierto, en el país existen lineamientos para realizar monitoreos de calidad del aire, aún es necesario normar y estandarizar la elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos (en adelante DTM), el cual contiene información técnica relacionada a la meteorología y a los procesos de modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, cuya finalidad es representar el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes del aire para una zona y periodo determinado.

En este contexto, la Segunda Disposición Complementaria Final de las “Disposiciones complementarias para la aplicación de lo dispuesto en el artículo 21 de la Ley N° 30230, Ley que establece medidas tributarias, simplificación de procedimientos y permisos para la promoción y dinamización de la inversión en el país, y establece otras disposiciones”, aprobadas por el Decreto Supremo N° 013-2023-MINAM, establece que el MINAM, a propuesta del SENAMHI, aprueba los

¹ Calidad del aire y salud: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

² WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

³ Contaminación atmosférica y salud infantil <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275548/WHO-CED-PHE-18.01-spa.pdf?ua=1>

⁴ Denuncias SINADA - <https://datosabiertos.oefa.gob.pe/dataviews/250325/denuncias-sinada/>

Lineamientos para la elaboración de documentos técnicos sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA), con el fin de contar con un marco de referencia común para realizar estas evaluaciones.

II. OBJETO

Brindar lineamientos para el modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, que se desarrolla como parte de los instrumentos de gestión ambiental en el marco del SEIA y complementarios, a los diferentes actores que intervienen en el proceso de evaluación de impacto ambiental.

III. ALCANCE

Los presentes lineamientos son aplicables a los titulares de los proyectos de inversión, consultoras ambientales, autoridades competentes, entre otros, que intervienen en el proceso de evaluación de impacto ambiental en el marco del SEIA.

IV. BASE LEGAL

Los presentes lineamientos se encuentran enmarcados en los siguientes dispositivos legales:

- 4.1 Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.
- 4.2 Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.
- 4.3 Decreto Supremo N° 013-2023-MINAM, Decreto Supremo que aprueba disposiciones complementarias para la aplicación de lo dispuesto en el artículo 21 de la Ley N° 30230, Ley que establece medidas tributarias, simplificación de procedimientos y permisos para la promoción y dinamización de la inversión en el país, y establece otras disposiciones.
- 4.4 Decreto Supremo N° 005-85-AE, que aprueba el Reglamento de la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- 4.5 Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM, que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI.
- 4.6 Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.
- 4.7 Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, Decreto Supremo que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.
- 4.8 Decreto Supremo N° 023-2021-MINAM, Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional del Ambiente al 2030.
- 4.9 Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental.
- 4.10 Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, que aprueba el Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.
- 4.11 Decreto Supremo N° 011-2023-MINAM, Decreto Supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire de los parámetros cadmio, arsénico y cromo en material particulado menor a diez micras (PM₁₀).

V. ESTRUCTURA DE UN DTM Y SU INTEGRACIÓN EN LOS IGA

El DTM debe considerar la estructura señalada en el Apéndice 1 del presente documento, así como el desarrollo de los contenidos que se indican en los siguientes capítulos.

Asimismo, el DTM debe ser incluido como Anexo del capítulo de Línea Base o caracterización ambiental, identificación y caracterización de impactos, determinación de área de influencia, u otros capítulos del instrumento de gestión ambiental en los que se requiera el desarrollo de modelamientos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

En el caso de la información contenida en el DTM respecto a los factores ambientales que conforman la Línea Base, en tanto estos se encuentren en dicho capítulo del instrumento de gestión ambiental, no es necesario repetir lo desarrollado, sino referenciar el capítulo que contiene la información.

VI. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE UN DTM

A continuación, se detalla el contenido mínimo de cada capítulo que el usuario debe tomar en cuenta para elaborar su DTM:

6.1 Introducción

Debe contener:

- Una descripción breve de las actividades antrópicas, de la caracterización del entorno urbano/rural involucrado o el fenómeno natural acontecido que generen, estén expuestos y/o interactúen con las emisiones en el área de estudio;
- Ubicación política de la/s fuente/s de emisión;
- Una breve descripción de estudios y/o monitoreos previos relacionados a la calidad del aire (resultados, periodo monitoreo y entidad de que realiza el monitoreo) del área de estudio ordenada de manera cronológica (del más antiguo al más reciente, de existir información disponible), elaborados tanto por terceros y/o por el usuario. Cabe precisar que, la información presentada en este capítulo debe ser diferente a la que se mostrará en el capítulo de validación;
- Las características de los datos meteorológicos (nombre del modelo meteorológico, versión, resolución espacial y temporal, periodo de modelamiento) y de la información sobre las características del terreno (procedencia de la información, la resolución espacial del modelo de elevación digital y del uso de suelos), que fueron usados como entrada al Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos (MDCA);
- Una descripción del MDCA (indicando el nombre, versión, resolución espacial y temporal);

6.2 Objetivos

Debe indicar los objetivos del DTM según su finalidad, teniendo en cuenta el o los capítulos del instrumento de gestión ambiental que requieran su desarrollo.

6.3 Antecedentes

Debe describir:

- Información detallada que incluya resultados (cuantitativos) que aporten conocimiento sobre las condiciones de contaminación en el área de estudio (de existir información). Por ejemplo:
 - Estudios previos relacionados a la calidad del aire del área de estudio, diagnósticos, línea base y/o monitoreos de calidad del aire u otras fuentes de información sobre el área de estudio elaborados por el usuario o por terceros ordenada de manera cronológica (del más antiguo al más reciente). Cabe precisar que la información

presentada en este capítulo debe ser diferente a la que se mostrará en el capítulo de validación.

- Todas las fuentes de información relacionadas al DTM deben ser debidamente referenciada/citada.
- Se debe analizar e incluir, en cuadros y/o gráficos, la mencionada información, tal como se indica a continuación:

Cuadro N°1. Contaminante y concentración

ID	Contaminante	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Un ejemplo de antecedentes de un DTM se muestra en el Apéndice 2.

6.4 Información desarrollada en la Línea Base o en la Descripción del proyecto

6.4.1 Ubicación política y geoespacial del área de estudio

Se debe:

- Indicar la ubicación política del área de estudio detallando el distrito, provincia y departamento al que pertenece;
- Indicar la ubicación geográfica del área de estudio, para lo cual el usuario debe incluir en su DTM un cuadro (tal como se muestra a continuación), consignando como mínimo una coordenada geográfica⁵ (DATUM WGS84) referencial del área de estudio (centroide⁶) y/o coordenadas del inicio y final del área de estudio u otros;

Cuadro N°2. Ubicación geográfica del área de estudio

ID	Coordenada Geográfica ⁷		Altitud (m.s.n.m)	Zona (...)
	Latitud	Longitud		

- Presentar un mapa base del área de estudio, en el cual se incluye como mínimo (de existir la información) límites políticos (distrital, provincial y departamental) vías (carreteras), cuerpos de agua (rio, lagos, quebradas, lagunas u otros), dominio de modelamiento del MDCA, centros poblados, Áreas Naturales Protegidas, Zonas de Amortiguamiento, Zonas Arqueológicas, fuentes de emisión, receptores discretos (por ejemplo centros de salud, centros educativos, entre otros), componentes principales del

⁵ Las coordenadas geográficas deben ser grados y con una precisión mínima de 4 decimales.

⁶ Se refiere a la ubicación del centro geométrico de un cuerpo.

⁷ Las coordenadas geográficas deben ser grados y con una precisión mínima de 4 decimales.

Proyecto así como los componentes auxiliares del Proyecto. Asimismo, es importante aclarar que toda información complementaria que se utilice en los DTM, debe provenir de fuentes confiables y acreditadas, cabe precisar que el mapa base debe presentarse en el Anexo 1 del respectivo DTM.

En el Apéndice 3 se describe las características mínimas para la elaboración de mapas. Un ejemplo de mapa base para un DTM se muestra en el Apéndice 4.

6.4.2 Descripción de la actividad que genera o generará emisiones en el área de estudio

Realizar una descripción detallada de la actividad o fenómeno natural que genera o generará (si aún no está en funcionamiento la fuente de emisión) emisiones de contaminantes del aire, para lo cual indica, por ejemplo: extensión de áreas de cultivos, flujo de procesos para la producción de cemento, cantidad total de material procesado, cantidad de vehículos, tipos de fuentes de contaminación, tiempo de producción, horas de quema, cantidad de parcelas, entre otros.

6.4.3 Geomorfología y usos del suelo

- Describir detalladamente la información de los archivos sobre las características del terreno (topografía y uso de suelos) del área de estudio usados como entrada al MDCA. Para ello, se debe consignar la información en un cuadro del DTM, tal como se muestra a continuación:

Cuadro N°3. Detalles de los archivos sobre las características del terreno

Características del terreno	Resolución espacial	Fuente de información
Topografía		
Uso de suelos		

- Presentar un mapa topográfico y un mapa de uso de suelos en el Anexo 1 del respectivo DTM, para lo cual se deberá seguir los requerimientos mínimos indicados en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa topográfico se muestra en el Apéndice 5 y un ejemplo de mapa de uso de suelos en el Apéndice 6.

6.4.4 Clima y meteorología

6.4.4.1 Información de los datos meteorológicos

- Indicar si los datos meteorológicos utilizados como entrada en el MDCA fueron obtenidos de estaciones meteorológicas automáticas (datos meteorológicos observados) o generados por modelos meteorológicos (datos meteorológicos modelados). El SENAMHI, considerando que para nuestro país las condiciones climáticas son muy complejas, establece emplear para el periodo de modelamiento como mínimo los últimos tres (3) años de datos cuando se utilice datos meteorológicos observados y los últimos seis (6) años de datos cuando se utilice datos meteorológicos modelados. Cabe precisar que

cuando se tenga datos meteorológicos observados y modelados, la cantidad de datos a utilizar en el modelamiento será de 3 años. El sustento y precisiones técnicas del periodo mínimo de los datos meteorológicos es descrito en el Apéndice 07 del presente documento.

En el caso de usar datos meteorológicos observados, es necesario indicar el nombre de la/s estación/es, su/s ubicación/es geográfica/s (DATUM WGS84), entidad o persona que la administra, periodo de registro, marca y modelo de la estación meteorológica automática, dicha información debe ser consignada en un cuadro (como se indica a continuación) e incluirlo en su DTM. Así también, la estación meteorológica automática debe contar con su certificado de calibración vigente y verificaciones periódicas. Cabe precisar que la información meteorológica observada, debe provenir de una estación meteorológica automática (representativa del lugar) cuya veleta debe estar posicionada a 10 metros de nivel del suelo.

Cuadro N° 4. Información de la/s estación/es meteorológicas automáticas

N	Nombre de la estación	Coordenadas Geográficas ⁸		Altitud (m.s.n.m)	Entidad o persona que la administra	Periodo de registro	Marca y modelo estación
		Latitud	Longitud				

- Asimismo, en el caso de haber utilizado datos meteorológicos observados se debe presentar un mapa de ubicación de la/s estación/es meteorológica/s automática/s, el cual debe incluir una tabla con las coordenadas geográficas de la/s estación/es meteorológica/s automática/s. El mapa debe presentarse en el Anexo 1 del respectivo DTM según las características mínimas solicitadas en el Apéndice 3 del presente documento.

En el caso de usar datos meteorológicos modelados, se debe indicar el nombre, la versión, la resolución espacial y temporal del modelo meteorológico utilizado, dicha información debe ser consignada en un cuadro e incluirlo en el DTM. Asimismo, para el caso de DTM que serán incluidos en un IGA, la resolución espacial y temporal deberá ser de 1 hora y 1 km.

⁸Las coordenadas geográficas deben ser grados y con una precisión mínima de 4 decimales.

Cuadro N° 5 Información del modelo meteorológico

Nombre del modelo meteorológico	Versión	Resolución espacial	Resolución temporal

- Adjuntar la información sobre las parametrizaciones físicas del modelo meteorológico en el Anexo 2 del respectivo DTM.

Un ejemplo de cómo presentar las parametrizaciones físicas de un modelo meteorológico se muestra en el Apéndice 08.

6.4.4.2 Clasificación climática

Se debe indicar y describir la clasificación climática del dominio de modelamiento MDCA, según el Mapa Climático del Perú⁹ vigente elaborado por el SENAMHI.

6.4.4.3 Tiempo y clima

En el DTM es imprescindible comprender las condiciones meteorológicas que caracterizan el área de estudio (De Visscher, 2014; US-EPA, 2023). Para lo cual, se usan los datos meteorológicos descritos en el ítem 6.5.1. Asimismo, se han considerado las variables de Temperatura del Aire, Precipitación, Humedad Relativa y Vientos (dirección y velocidad) como las mínimas para ser analizadas en los DTM, sin embargo, el usuario puede incluir un análisis de Nubosidad, de Radiación Global, de la Altura de la Capa Límite Planetaria, entre otras, si fuera necesario para el cumplimiento del propósito del mismo.

Por ello, se debe:

- Describir las condiciones meteorológicas características del área de estudio;
- Elaborar gráficas y analizar el comportamiento de las principales variables meteorológicas (respetando las unidades).
- En el caso de tener más de una estación meteorológica automática, se deben utilizar los datos meteorológicos de la estación más cercana a la/s fuente/s de emisión (o a la mayor cantidad de fuentes de emisión).
- Por otro lado, respecto a la representatividad de una estación meteorológica automática, la cual depende de muchos factores como la topografía del terreno, homogeneidad del entorno, distancia al mar o a un cuerpo de agua, entre otros. La determinación de esta puede

⁹ <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

llegar a generar solo un resultado cualitativo y no determinístico, sin embargo, para fines de evaluar la representatividad de los datos de una estación meteorológica automática para su uso como entrada en un MDCA, se debe utilizar las siguientes premisas:

- Una estación meteorológica con una distancia menor a 1 km del mar o de un cuerpo de agua, tendrá una representatividad máxima de 5 km.
- Una estación meteorológica será representativa hasta una distancia en donde el comportamiento lineal de sus campos de viento sufra perturbaciones debido a factores existentes (una montaña, un edificio, etc.) (SEA, 2012).
- o En el caso que se utilicen datos meteorológicos modelados, se deben extraer los datos meteorológicos del punto más cercano a las fuentes de emisión o del centroide del polígono que abarque todas las fuentes de emisión. Al punto de extracción (antes mencionado) se le debe asignar un nombre y consignar en un cuadro e incluirlo en el DTM, tal como se indica a continuación:

Cuadro N° 6. Coordenada de extracción de datos meteorológicos

N	Nombre de la estación	Coordenadas Geográfica ¹⁰		Altitud (m.s.n.m)
		Latitud	Longitud	

- o Presentar un mapa de ubicación del punto de extracción, el cual debe incluir una tabla con las coordenadas geográficas del punto de extracción. El mapa debe presentarse en el Anexo 1 del respectivo DTM según las características mínimas solicitadas en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa de punto de extracción se muestra en el Apéndice 09.

6.4.4.4 Temperatura del aire (°C)

Se debe elaborar:

- Un gráfico de series temporales de la variabilidad de la temperatura máxima horaria diaria, mínima horaria diaria y el promedio diario de todo el periodo de datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM. La temperatura máxima y mínima, se determina entre las 0-23 horas;

¹⁰ Las coordenadas geográficas deben ser en grados y con una precisión de 4 decimales.

- Un gráfico el cual represente el ciclo horario promedio de la temperatura de cada año del periodo de datos meteorológicos, la cual se indicará como una figura en el DTM;
- Un gráfico de variabilidad mensual de la temperatura máxima y mínima de todo el periodo de datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.

Un ejemplo de gráficas del comportamiento de la Temperatura del aire se muestra en el Apéndice 10.

6.4.4.5 Precipitación (mm)

Se debe elaborar:

- Un gráfico de series temporales de la variabilidad horaria de la precipitación de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM;
- Un gráfico de barras de la variabilidad del promedio mensual de la precipitación acumulada de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.

Un ejemplo de gráficas del comportamiento de la Precipitación se muestra en el Apéndice 11.

6.4.4.6 Humedad Relativa (%)

Se debe elaborar:

- Un gráfico de series temporales de la variabilidad diaria de la humedad relativa de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.
- Un gráfico de barras de la variabilidad del promedio mensual de la humedad relativa de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.

Un ejemplo de gráficas del comportamiento de la Humedad Relativa se muestra en el Apéndice 12.

6.4.4.7 Vientos

Se debe elaborar:

- Un gráfico que debe contener el ciclo horario promedio de la velocidad del viento (m/s) de cada año del periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM;
- Un gráfico de rosa de vientos para el ciclo diurno (6:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 5:59 horas) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM;

- Un gráfico de rosa de vientos para cada estación del año (verano, otoño, invierno, primavera) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como una figura en el DTM;
- Un gráfico de rosa de vientos para todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como una figura en el DTM.

Un ejemplo de gráficas del comportamiento del viento se muestra en el Apéndice 13.

6.4.4.8 Radiación Global (W/m² o KW/m²xDIA)-(opcional)

Se debe elaborar:

- Un gráfico que debe contener el ciclo horario promedio de la Radiación Global (W/m²) de cada año del periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.
- Un gráfico de series temporales de la variabilidad diaria de la Radiación Global (KW/m²xDIA) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.

6.4.4.9 Altura de la Capa Límite Atmosférica (m)-(opcional)

Se debe elaborar:

- Un gráfico que debe contener el ciclo horario promedio de la Altura de la Capa Límite Atmosférica (m) de cada año del periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.
- Un gráfico de series temporales de la variabilidad mensual de la Altura de la Capa Límite Atmosférica (m) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indica como una figura en el DTM.

6.4.5 Calidad del aire

6.4.5.1 Monitoreo de calidad del aire

En este ítem, se debe incluir la información recolectada de aquellas actividades antropogénicas o fenómenos naturales que estén activos (donde las fuentes de emisión estén generando contaminantes). Cabe precisar que la elección de los parámetros de monitoreo de calidad del aire debe estar debidamente justificado, para lo cual se puede utilizar el literal C.3 de determinación de parámetros calidad del aire a monitorear del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire aprobado mediante Decreto Supremo N°010-2019-MINAM.

Estos contaminantes se deben seleccionar analizando el ciclo de vida del proyecto de inversión (Planificación, construcción, operación y mantenimiento, abandono o cierre) y sus áreas de operaciones donde generen emisiones atmosféricas como tipo de material a remover o

transportar, tipo de combustible, tipo de material a incinerar, características químicas de los materiales, entre otros.

Asimismo, los periodos y frecuencias de monitoreo deben ser definidos de acuerdo a los criterios técnicos estipulados en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. Cabe precisar que los mencionados monitoreos deben ser representativos de un año para incluirlos en el DTM.

Se debe:

- Describir la calidad del aire del área de estudio con datos observados resultantes de monitoreos de calidad del aire.
- Elaborar y analizar figuras por contaminante del aire que muestre el comportamiento temporal de este durante la campaña de monitoreo de calidad del aire. Para lo cual se debe incluir su respectiva comparación con su ECA-aire.
- Elaborar un mapa de ubicación de la/s estación/es de monitoreo de calidad del aire. Este mapa debe presentarse en el Anexo 1 del respectivo DTM, cumpliendo con las características mínimas descritas en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa ubicación de la/s estación/es de monitoreo de calidad del aire se muestra en el Apéndice 14.

Respecto al uso de sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire, es importante indicar que para el caso de los DTM con propósito de incluirlos en Instrumentos de Gestión Ambiental, no es posible utilizarlos, dado que el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental del Aire menciona que cuando se pretenda utilizar la información de calidad del aire para reportes de monitoreo ambiental vinculados a Instrumentos de Gestión Ambiental (Estudios de Impacto Ambiental, Programa de Adecuación y Manejo Ambiental, Declaración de Impacto Ambiental, entre otros) no es posible el uso de procedimientos de medición alternativos (sensores de bajo costo), por lo cual se deben aplicar necesariamente los métodos de referencia o equivalentes.

6.4.5.2 Nivel de fondo

En función de los parámetros de calidad del aire que se van a monitorear y modelar (indicado en el ítem 6.4.5.1), se debe determinar y/o estimar las concentraciones de estos contaminantes en condiciones donde la actividad antropogénica o fenómeno natural no este activo (donde las fuentes de emisión de interés no estén generando contaminantes).

Se debe:

- Determinar las concentraciones de fondo de cada contaminante del aire que es modelado en el área de estudio, caso contrario se debe sustentar técnicamente su estimación. Por ejemplo, se puede utilizar

el criterio estipulado en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, el cual menciona que, para estaciones de monitoreo de calidad del aire de concentraciones de fondo, se debe ubicar la estación de calidad del aire en un área geográfica localizada a barlovento de las actividades antropogénicas o del fenómeno natural que se pretende evaluar. Las concentraciones de fondo son consignadas en un Cuadro dentro del DTM.

Cuadro N°7. Concentraciones de fondo en el área de estudio

Contaminante	Periodo de monitoreo	Latitud	Longitud	Altitud (m s.n.m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Para el caso de la estimación de las concentraciones de fondo se puede sustentar el uso de los monitoreos realizados durante la elaboración de la línea base de la actividad. Asimismo, se puede considerar utilizar información secundaria representativa, la cual complemente los resultados de los monitoreos realizados a fin de tener información con mayor representatividad de las concentraciones de fondo del área de estudio. Cabe precisar que la información de la línea base del proyecto, solo se puede utilizar en el caso de que el mencionado monitoreo no haya sido afectado por alguna actividad del proyecto. Por ejemplo, en el caso de las Modificaciones de un Estudio de Impacto Ambiental (MEIA), la línea base del estudio no se utiliza, dado que en el ambiente existe el aporte de las emisiones del mismo proyecto.

6.5 Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

6.5.1 Justificación del modelo utilizado

- Indicar claramente el MDCA utilizado y su versión. Se debe utilizar una resolución espacial de mínimo un 1km y una resolución temporal de 1 hora.
- Justificar la elección del MDCA, considerando los criterios y recomendaciones indicados en los Apéndices 07, 18, 19, 20, 21, 22 y 23 del presente documento.

6.5.2 Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

- Describir la metodología utilizada en el modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, para lo cual se debe usar como referencia los manuales y las guías técnicas del país de origen de cada MDCA. Asimismo, se debe describir el flujograma completo del proceso de modelamiento (indicar las etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento).

6.6 Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

6.6.1 Dominio de modelamiento

- Incluir las dimensiones del dominio de modelamiento en la redacción de los capítulos del DTM.
- Delimitar mediante un polígono el dominio de modelamiento del MDCA e incluirlo en los mapas de isoconcentraciones que se generará posteriormente.

6.6.2 Periodo de modelamiento

- Indicar que el periodo de modelamiento en el que se elabora el DTM es igual al periodo de datos meteorológicos utilizados como entrada al MDCA.

6.6.3 Inventario de emisiones

Se debe clasificar la/s fuente/s de emisiones y consignarlas en un cuadro en el DTM, considerando lo dispuesto en el Apéndice 07 del presente documento. En el caso de las fuentes de emisión del tipo área, volumen o lineales, se debe consignar un punto referencial. El formato del cuadro debe ser como se muestra a continuación:

Cuadro N°8. Inventario de emisiones

ID	Nombre de la fuente	Tipo de fuente	Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n.m)
			Latitud	Longitud	

Asimismo, se debe presentar un mapa de ubicación de la/s fuente/s de emisión. Este mapa debe presentarse en el Anexo 1 del DTM, cumpliendo con las características mínimas descritas en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa de ubicación de la/s estación/es de monitoreo de calidad del aire se muestra en el Apéndice 15.

6.6.3.1 Cálculo de emisiones y tasas de emisión

- Identificar la/s fuente/s de emisión según su tipo (puntuales, área, móviles, volumen) y estimar la(s) emisión(es) por cada contaminante y actividad. Para ello puede utilizarse factores de emisión o metodologías debidamente sustentadas (como, por ejemplo: las recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US- EPA, por sus siglas en inglés)¹¹;
- Indicar la tasa de emisión por contaminante y fuente de emisión, estas deben presentarse en un cuadro en el DTM, como se indica a continuación:

¹¹ <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

Cuadro N°9. Tasas de emisión

ID	Nombre de la fuente	Tipo de fuente	Contaminante	Tasa de emisión ¹² (g/s, g/s.m, g/s.m ² u otros)

- Considerar para el cálculo de los factores y las tasas de emisión, las eficiencias de reducción de emisiones de las actividades antropogénicas a realizar, que incluyan la aplicación de una eficiencia de reducción propia de un diseño de ingeniería o una eficiencia de reducción como parte de la aplicación de una medida de manejo ambiental.
- Asimismo, en el Anexo 3 del DTM, se debe describir detalladamente todos los procedimientos, parámetros y ecuaciones para el cálculo de las emisiones y tasas de emisión.

6.6.4 Receptores discretos

A fin de estimar los aportes de los contaminantes originados por las emisiones de la actividad que se está evaluando, se debe:

- Identificar a los receptores discretos, los cuales se definen como aquellos lugares donde es de interés evaluar el comportamiento de la concentración de contaminantes. Dependiendo del propósito del DTM, un receptor discreto, también puede ser, por ejemplo: una estación de monitoreo, una zona de conservación, un cuerpo de agua, entre otros, los cuales deben ser presentados en un cuadro en el DTM, con la siguiente información:

Cuadro N°10. Receptores discretos

ID	Nombre del receptor*	Coordenadas Geográficas**		Altitud (ms.n.m)	Distancia mínima a la/s fuentes de emisión (km)
		Latitud	Longitud		

*Hospital, centro poblado, parques
 ** Coordenada referencial

- Elaborar un mapa de ubicación de los receptores discretos, donde se muestre la/s fuente/s de emisión. El mapa debe presentarse en el Anexo 1 del DTM, y cumplir con las características mínimas solicitadas en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa de ubicación de receptores discretos se muestra en el Apéndice 16.

¹² Según lo requiera el MDCA por el tipo de fuente de emisión.

6.6.5 Normas y criterios ambientales

Se debe especificar y sustentar las normas y criterios ambientales nacionales y/o internacionales que se van a utilizar para comparar los resultados de las concentraciones de los contaminantes generados en el modelamiento. Cabe precisar que el uso normas y criterios internacionales, no debe contravenir con normas y/o criterios nacionales.

6.6.6 Escenarios del modelamiento

Se deben establecer los escenarios de modelamiento considerando el/los contaminantes/s que se desee/n modelar en el área de estudio, considerando los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA - aire) vigentes, establecidos en el Decreto Supremo N°003-2017-MINAM o normas y criterios ambientales equivalentes (debidamente sustentados en el ítem 6.6.5).

Para el caso de que se utilice el Decreto Supremo N°003-2017-MINAM, se debe considerar lo siguiente:

- Para el Benceno (C_6H_6), medido como promedio anual, el valor de cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Azufre (SO_2), medido como promedio de 24 horas, los valores de la 1ª(primer) a la 8ª(octava) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Nitrógeno (NO_2), medido como promedio de 1 hora, los valores de la 1ª(primer) a la 25ª(vigesimoquinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Nitrógeno (NO_2), medido como promedio anual, el valor de cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10}), medido como promedio de 24 horas, los valores de la 1ª(primer) a la 8ª(octava) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10}), medido como promedio anual, el valor de cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), medido como promedio de 24 horas, los valores de la 1ª(primer) a la 8ª(octava) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), medido como promedio anual, el valor de cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Mercurio Gaseoso Total (Hg^2), medido como promedio de 24 horas, el valor máximo en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Monóxido de Carbono (CO), medido como promedio de 1 hora, los valores de la 1ª(primer) a la 2ª(segunda) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.

- Para el Monóxido de Carbono (CO), medido como promedio móvil de 8 horas, el valor máximo en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Ozono (O₃), medido como promedio móvil de 8 horas, los valores de la 1^a(primera) a la 25^a (vigésimoquinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Plomo (Pb) en PM₁₀, medido como promedio mensual, los valores de la 1^a(primera) a la 5^a(quinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Plomo (Pb) en PM₁₀, medido como promedio anual, el valor de cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), medido como promedio 24 horas, los valores de la 1^a(primera) a la 2^a(segunda) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.

En cada uno de los escenarios anteriores se debe considerar las diferentes etapas del proyecto (construcción, operación y cierre) con controles en la Estrategia de Manejo Ambiental y sin controles en la Estrategia de Manejo Ambiental. Además, los escenarios de modelamiento se deben configurar buscando modelar de manera simultánea las actividades que mayor aporte o emisiones atmosféricas podrían generar, representando condiciones críticas (escenario conservador) durante las actividades de los componentes del proyecto.

6.6.7 Resultados

Los resultados del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos deben considerar las concentraciones obtenidas por el modelamiento más las concentraciones de fondo, según los escenarios descritos en el numeral 6.6.6.

$$CFI = CM + CF$$

Donde:

CFI: Concentración final (µg/m³)

CM: Concentración modelada (µg/m³)

CF: Concentración de fondo (µg/m³)

Los resultados deben ser consistentes con las condiciones meteorológicas y las características del terreno del área de estudio, así como con las tasas de emisión calculadas para el modelamiento.

El objetivo del presente documento es determinar el aporte de las emisiones bajo estudio sobre las concentraciones de fondo determinadas o estimadas, razón por la cual independientemente del porcentaje que represente la concentración del fondo respecto a los ECA-aire, se debe sumar la concentración modelada a la concentración de fondo.

6.6.7.1 Concentraciones en los receptores discretos

Se debe analizar, describir y presentar las concentraciones finales en los receptores discretos según sus escenarios de modelamiento. Estos datos deben estar en un cuadro en el DTM, a modo de ejemplo del formato de cuadro y en función del contaminante modelado, se presenta un ejemplo para el caso del PM₁₀ y PM_{2.5}:

Cuadro N°11. Concentraciones de PM₁₀

ID	Fecha de Ocurrencia de la máxima concentración final	Nombre del Receptor	Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n. m)	Escenario	CFI (µg/m ³)
			Latitud	Longitud			
						1 ^{a*} máxima (24 horas)	
						...	
						8 ^{a**} máxima (24 horas)	
						8 ^a máxima (24 horas)	
						...	
						Promedio anual***	

* Valor máximo de la 1^a(primera) concentración máxima de cada año del periodo de modelamiento.

** Valor máximo de la 8^a(octava) máxima concentración de cada año del periodo de modelamiento.

*** Valor promedio de cada año del periodo de modelamiento.

Nota: Las concentraciones que superen su respectivo ECA-aire, deben colocarse en el cuadro en con color rojo.

Cuadro N°12. Concentraciones de PM_{2.5}

ID	Fecha de Ocurrencia de la máxima concentración final	Nombre del Receptor	Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n. m)	Escenario	CFI (µg/m ³)
			Latitud	Longitud			(µg/m ³)
						1 ^{a*} máxima (24 horas)	
						...	
						8 ^{a**}	

						máxima (24 horas)	
						...	
						Promedio anual***	

* Valor máximo de la 1ª (primera) concentración máxima de cada año del periodo de modelamiento.

** Valor máximo de la 8ª (octava) máxima concentración de cada año del periodo de modelamiento.

*** Valor promedio de cada año del periodo de modelamiento.

Nota: Las concentraciones que superen su respectivo ECA-aire, deben colocarse en el cuadro en con color rojo.

6.6.7.2 Mapas de isoconcentraciones

Las concentraciones finales de cada escenario de modelamiento realizado, deben presentarse mediante mapas de isoconcentraciones, elaborados en coordenadas geográficas (DATUM WGS84). Dichos mapas deben contener la/s fuente/s de emisión, los receptores discretos, las isoconcentraciones (deben estar en unidades comparables con los ECA-aire) y adjuntarse en el Anexo 4 del DTM y; asimismo, estos mapas deben cumplir con las características mínimas solicitadas en el Apéndice 3 del presente documento.

Un ejemplo de mapa de Isoconcentraciones se muestra en el Apéndice 17.

6.6.8 Validación

Se debe realizar un análisis de incertidumbre de los resultados del modelamiento comparándose con información de concentraciones de contaminantes atmosféricos registrados mediante monitoreos (ver el Apéndice 18 del presente documento). Asimismo, se debe presentar un cuadro (como se indica a continuación) que muestre los resultados de las concentraciones de modelamiento y las registradas mediante un monitoreo de calidad del aire. Así también, se debe presentar un diagrama de dispersión entre las concentraciones finales (CFI) y las concentraciones observadas (CO), mostrando su línea y ecuación de regresión. Cabe precisar que, si la actividad antropogénica o fenómeno natural no este activo (donde la/s fuente/s de emisión no estén generando contaminantes), no se debe considerar el desarrollo de este ítem en el DTM. Además, en el proceso de validación donde evaluaremos el desempeño de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, se puede utilizar como mínimo el monitoreo de una estación de calidad de aire, la cual debe encontrarse dentro del área de la pluma de dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Cuadro N°13. Concentraciones del contaminante para validación

Fecha	CM	CF	CFI	CO

Donde:

- CM : Concentración modelada en la estación de monitoreo de calidad del aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CF : Concentración de fondo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CFI : Concentración final ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CO : Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Un ejemplo de Validación se muestra en el Apéndice 18.

6.7 Conclusiones

Sintetizar brevemente los resultados de las concentraciones finales en el área de estudio y los receptores de discretos según los escenarios de modelamiento.

6.8 Recomendaciones

Las recomendaciones del DTM deben ser coherentes con los resultados obtenidos y deben estar orientadas a resolver algunas limitaciones que no se pudieron suplir en la elaboración del DTM presentado.

6.9 Referencias Bibliográficas

- Presentar todas las fuentes de información literaria utilizadas en la elaboración del DTM.
- Referenciar el presente documento.

6.10 Anexos

6.10.1 Anexo 1

- Mapa base del área de estudio
- Mapa topográfico
- Mapa de uso de suelos
- Mapa de ubicación de la/s estación/es automáticas meteorológicas
- Mapa del punto de extracción
- Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire
- Mapa de ubicación de la/s fuente/s de emisión
- Mapa de ubicación de los receptores discretos

6.10.2 Anexo 2 (opcional, en el caso que se hayan utilizado datos meteorológicos modelados)

6.10.3 Anexo 3 Inventario de emisiones

6.10.4 Anexo 4 (según el/los escenarios/s de modelamiento realizado/s en el DTM)

Por ejemplo:

- Mapa de isoconcentraciones de PM_{10}
- Mapa de isoconcentraciones de $\text{PM}_{2.5}$

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberta Environment and Parks (AEP). (2020). Air Quality Model Guideline. Alberta, Canada.
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11). <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Ashok, K., & Yamagata, T. (2009). The El Niño with a difference. *Nature*, 461(7263), 481-484. <https://doi.org/10.1038/461481a>
- British Columbia Ministry of Environment (2015). British Columbia Air Quality Dispersion Modelling Guideline. <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/air/reports-pub/bc-dispersion-modelling-guideline-2015.pdf>
- Casal Fàbrega, J., Montiel, H., Planas, E., & Vílchez, J. A. (1999). Análisis del riesgo en instalaciones industriales.
- Cortina, M. (2012). Aplicación de técnicas de inteligencia artificial a la estimación de contaminantes atmosféricos (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- De Vissher, A. (2014). Air dispersion modeling: Foundations and Applications. Canada Research Chair in Air Quality and Pollution Control Engineering, Department of Chemical and Petroleum Engineering, and Centre for Environmental Engineering Research and Education (CEERE), Schulich School of Engineering, University of Calgary.
- Environment Agency and Department for Environment, Food & Rural Affairs (2014). Environmental permitting: air dispersion modelling reports. <https://www.gov.uk/guidance/environmental-permitting-air-dispersion-modelling-reports#explain-the-modelled-domain-and-receptors>
- European Environment Agency (EEA). (2011). The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide.
- European Environment Agency (EEA). (2023). 40 CFR 70.2 "Fugitive emissions". <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2023-title40-vol17/CFR-2023-title40-vol17-sec70-2>
- Ferrari, G., Ozaki, V. (2014). Missing data imputation of climate datasets: implications to modeling extreme drought events. Universidade de Sao Paulo Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- Gallego, P., Gonzales, F., Sánchez B., Fernández P., Garcinuño M., Bravo C., Pradana A., Navarro R., Durand, J. (2012). Contaminación atmosférica. Editorial UNED. España.
- Hanna, S., & Chang, J. (2012). Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 116(3), 133-146. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0177-1> Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (15 de noviembre del 2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos. Recuperado el 15 de enero del 2021 de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>.

- Jorquera, H. (2015). Introducción a la contaminación atmosférica. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile., 254. 902-5828.
- Mendoza, A., Garcilla, M. (2009). Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona Metropolitana de Guadalajara, México. *Rev. Int. Ambient.* 25 (2) 73-85.
- Metcalfe, S., & Derwent, D. (2014). Atmospheric pollution and environmental change. *Atmospheric Pollution and Environmental Change*, 1–196. <https://doi.org/10.4324/9780203783818>.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2007). Guía para la Evaluación de Impactos En la Calidad del Aire por Actividades Minero Metalúrgicas
- Ministry for the Environment. (2004). Good practice guide for atmospheric dispersion modelling. Vol. Air Qualit. New Zeland.
- Kalhor, M. & Bajoghli, M. (2017) Comparison of AERMOD, ADMS and ISC3 for incomplete upper air meteorological data (case study: Steel plant). *Atmospheric Pollution and Environmental*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.001>
- Lateb, M., Meroney, R., Yataghene, M., Fellouah, H., Saleh, F., Boufadel, M. (2015). On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments - A review.
- Mandurino, C., & Vestrucci, P. (2009). Using meteorological data to model pollutant dispersion in the atmosphere. *Environmental Modelling & Software*, 24(2), 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.06.013>
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44. <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>
- Morales, R. (2006). Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria. Chile.
- Ministry for the Environment (2004). Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling. <http://tools.envirolink.govt.nz/assets/Uploads/Good-Practice-Guide-MFE-atmospheric-dispersion-modelling-jun04.pdf>
- Ontario Ministry of the Environment and Climate Change (2017). Air Dispersion Modelling Guideline for Ontario. https://files.ontario.ca/admgo-id50_aoda_v2b.pdf
- Rincon, M. (2012). Acoplamiento de un modelo de mesoescala WRF al modelo de calidad del aire Calpuff. Universidad Nacional de Colombia.
- Sattari, M., Joudi, A., Kusiak. (2016). Assessment of different methods for estimation of missing data in precipitation studies. *Research Article. Hydrology Research* (2017) 48 (4): 1032–1044. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.364>
- Schatzmann, M., Olesen, H., Franke, J. (2010). COST 732 model evaluation case studies: approach and results. https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/files/forschung/techmet/cost/cost_732/pdf/5th_Docu_May_10.pdf
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., & Noone, K. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. In *Physics Today* (Vol. 51, Issue 10). <https://doi.org/10.1063/1.882420>

- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). (2012). Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Chile.
- SENAMHI (2014). El Fenómeno El Niño en el Perú. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf
- Stull R.B. (1995) Meteorology Today for Scientists and Engineers. West Publishing Company, 385 pp.
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. Geophysical research letters, 38(10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>
- Trenberth, K. E. (1990). Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. Bulletin of the American Meteorological Society, 71(7), 988-993. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1990\)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2)
- Thé, Jesse L., Russell, L., Roger, B. (2001). Worldwide Data Quality Effects on PBL Short-Range Regulatory Air Dispersion Models. <https://www.weblakes.com/support/support-resources/>
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (2009). Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred_guidance_0309.pdf
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (2017). Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter. Recuperado de: https://www3.epa.gov/ttn/scram/guidance/guide/appw_17.pdf.
- Villar, G. (2017). Estudio de modelos de dispersión y su aplicación al control industrial. Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. España.
- Wark, K., Warner, C. (1990). Contaminantes del aire: Origen y control. Limusa. 9 Edición.650 pag.
- Yozgatligil, C., Aslan, S., Iyigun, C. (2013). Comparison of missing value imputation methods in time series: the case of Turkish meteorological data. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0723-x>
- Zannetti, P. (1990) Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software. Computational Mechanics Publications-Springer Verlag.
- Zuk., M, Garibay., V, Iniestra ., R, López., M, Rojas ., L, Laguna ., I. (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México: un estudio de caso en Tuxpan, Veracruz. Ed.INE-SEMARNAT. Mexico,61.

VIII. APÉNDICES

APÉNDICE 1

Figura 1. Estructura de un Documento Técnico sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

Capítulo I	: Introducción
Capítulo II	: Objetivos
Capítulo III	: Antecedentes
Capítulo IV:	Descripción del área de estudio
4.1.	Ubicación geográfica y política del área de estudio
4.2.	Descripción de la actividad antropogénica o fenómeno natural que genera o generará emisiones en el área de estudio
Capítulo V:	Características del terreno
Capítulo VI:	Climatología del área de estudio
6.1.	Información de los datos meteorológicos
6.2.	Clasificación climática
6.3.	Tiempo y clima
Capítulo VII:	Calidad del aire
7.1.	Monitoreo de calidad del aire
7.2.	Nivel de fondo
Capítulo VIII:	Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos
8.1.	Justificación del modelo utilizado
8.2.	Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos
Capítulo IX:	Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos
9.1.	Dominio de modelamiento
9.2.	Periodo de modelamiento
9.3.	Inventario de emisiones
9.4.	Receptores discretos
9.5.	Normas y criterios ambientales
9.6.	Escenarios del modelamiento
9.7.	Resultados
9.8.	Validación
Capítulo X:	Conclusiones
Capítulo XI:	Recomendaciones
Capítulo XII:	Referencias Bibliográficas
Capítulo XIII:	Anexos
13.1.	Anexo 1
13.2.	Anexo 2
13.3.	Anexo 3
13.4.	Anexo 4

APÉNDICE 2: MODELO DE ANTECEDENTES

El presente DTM se elabora en el marco del Programa de Adecuación de Manejo Ambiental (PAMA) de la empresa XXXX a fin de conocer el impacto de las actividades que generan emisiones dentro de la empresa y evaluar la aplicación de tecnologías para la mitigación de emisiones.

En el año 2019 la Fiscalía Especializada en Materia Ambiental del distrito de Rupa Rupa solicitó información al SENAMHI mediante Oficio N° XXX a fin de poder elaborar el estudio “Efectos en la calidad del aire por las actividades de la industria XXX”.

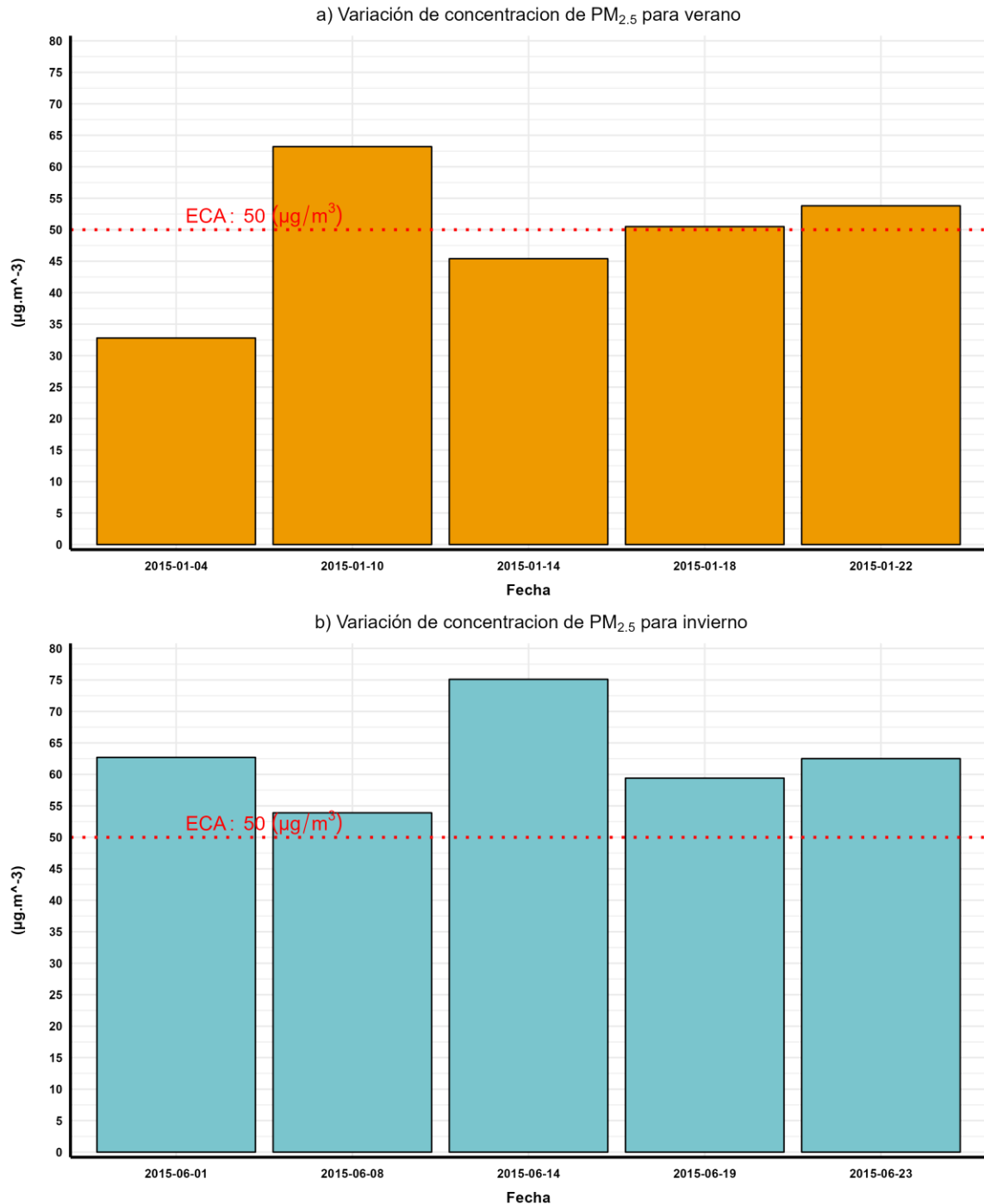
En el año 2015 se realizaron estudios de monitoreo de calidad del aire por parte de la Municipalidad Distrital Rupa Rupa (MDRR), el cual se desarrolló en las estaciones de verano e invierno del mismo año, en la que participaron personal de la Municipalidad Distrital y miembros de la fiscalía Especializada en Materia Ambiental, para lo cual se utilizó un equipo de bajo volumen Partisol 2000i instalado de acuerdo a los criterios estipulados en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire aprobado mediante Decreto Supremo N°010-2019-MINAM y ubicado en las inmediaciones de la comisaria principal del distrito (periodo de monitoreo del 01 al 30 de enero), en el colegio Ramón Castilla (periodo de monitoreo del 01 al 28 de febrero), en el Hospital de Contingencia (periodo de monitoreo del 01 al 31 de julio) y en la Institución Educativa N°03456 (periodo de monitoreo del 01 al 31 de agosto).

En el Cuadro N°XXX se muestra los resultados de dichos monitoreos y en la Figura N°XX a y b se hace la comparación con su respectivo ECA-aire.

Cuadro N°XXX. Resultados del monitoreo

ID	Contaminante	Frecuencia (horas)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha
1	PM _{2.5}	24	32.8	4/01/2015
2	PM _{2.5}	24	63.2	10/01/2015
3	PM _{2.5}	24	45.4	14/01/2015
4	PM _{2.5}	24	50.5	18/01/2015
5	PM _{2.5}	24	53.8	22/01/2015
6	PM _{2.5}	24	62.7	01/06/2015
7	PM _{2.5}	24	53.9	08/06/2015
8	PM _{2.5}	24	75.1	14/06/2015
9	PM _{2.5}	24	59.4	19/06/2015
10	PM _{2.5}	24	62.5	23/06/2015

Figura 1: Concentraciones de PM_{2.5}



Según los resultados del monitoreo de calidad del aire, el PM_{2.5} superó su respectivo ECA-aire, principalmente en los meses correspondientes a la estación de invierno (MDRR, 2015).

APÉNDICE 3: CONSIDERACIONES PARA LOS MAPAS

Los mapas presentados en el Anexo N°1 del DTM deben ser elaborados mediante un software de sistema de información geográfica (por ejemplo, el QGIS) y deben contener las siguientes características como mínimo:

Escala

- Los mapas deben elaborarse con una escala mínima de 1:500 y 1:10 000 que permita la visualización, precisión y evaluación de su contenido, para DTM que por su propósito sean incluidos en un Instrumento de Gestión Ambiental. Por otro lado, para el caso de estudios e investigaciones, la escala mínima será de 1: 1 000 000.
- En los mapas se deben mostrar la escala gráfica y numérica.
- Se debe garantizar que se puedan observar las capas en los mapas, como las isoconcentraciones, los receptores de discretos, las vías de acceso, entre otros.

Leyenda

- Para el caso del mapa base del área de estudio, el mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, el mapa topográfico, el mapa de uso de suelos, mapa del punto de extracción (en el caso de que se utilice datos meteorológicos modelados) y el mapa de ubicación de los receptores de discretos. Las capas de vías de acceso, receptores de discretos, cuerpos de agua, entre otros, se pueden presentar en una sola leyenda.
- Para el caso de los mapas de isoconcentraciones, las capas de los receptores discretos y la/s fuente/s de emisión, deben presentarse en una sola leyenda y las isoconcentraciones en otra. En la leyenda de las isoconcentraciones, los valores numéricos deben tener una precisión de dos decimales como máximo e indicar el nombre del contaminante con sus unidades comparables de acuerdo a los Estándares de Calidad Ambiental para Aire (ECA - aire) o normativa equivalente.
- Respecto a los receptores discretos, si se desea realizar una clasificación entre ellos, se debe colocar un encabezado al que se debe denominar “receptores discretos”.

Membrete

- Los membretes de los mapas presentados en el DTM, deben tener una numeración correlativa y presentar como mínimo la información presentada en el ejemplo mostrado a continuación:

Título: Mapa base del Proyecto Minero Nueva Esperanza		Nro. de Mapa: 1
Autor:	DATUM: WGS84	

Fecha de elaboración:	Escala:	
	1: 100 000	

Flecha del Norte

- La flecha del norte debe mostrarse en el lado superior derecho del mapa.

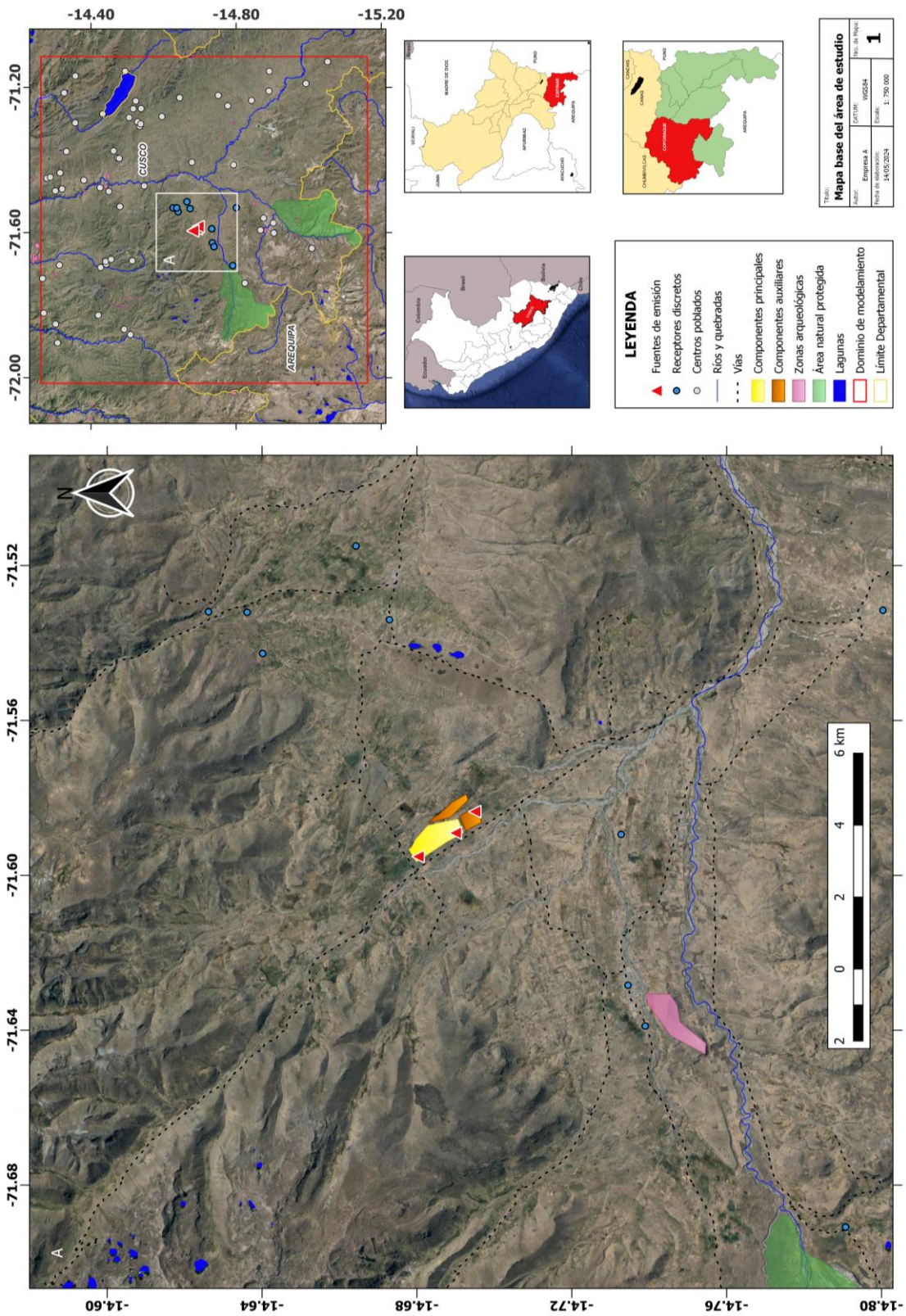
Grillas en coordenadas geográficas

- Las grillas de los mapas deben estar en coordenadas geográficas y en grados, además los valores numéricos deben tener una precisión de dos decimales como máximo. Asimismo, estas deben tener una separación que permita visualizar adecuadamente el mapa.

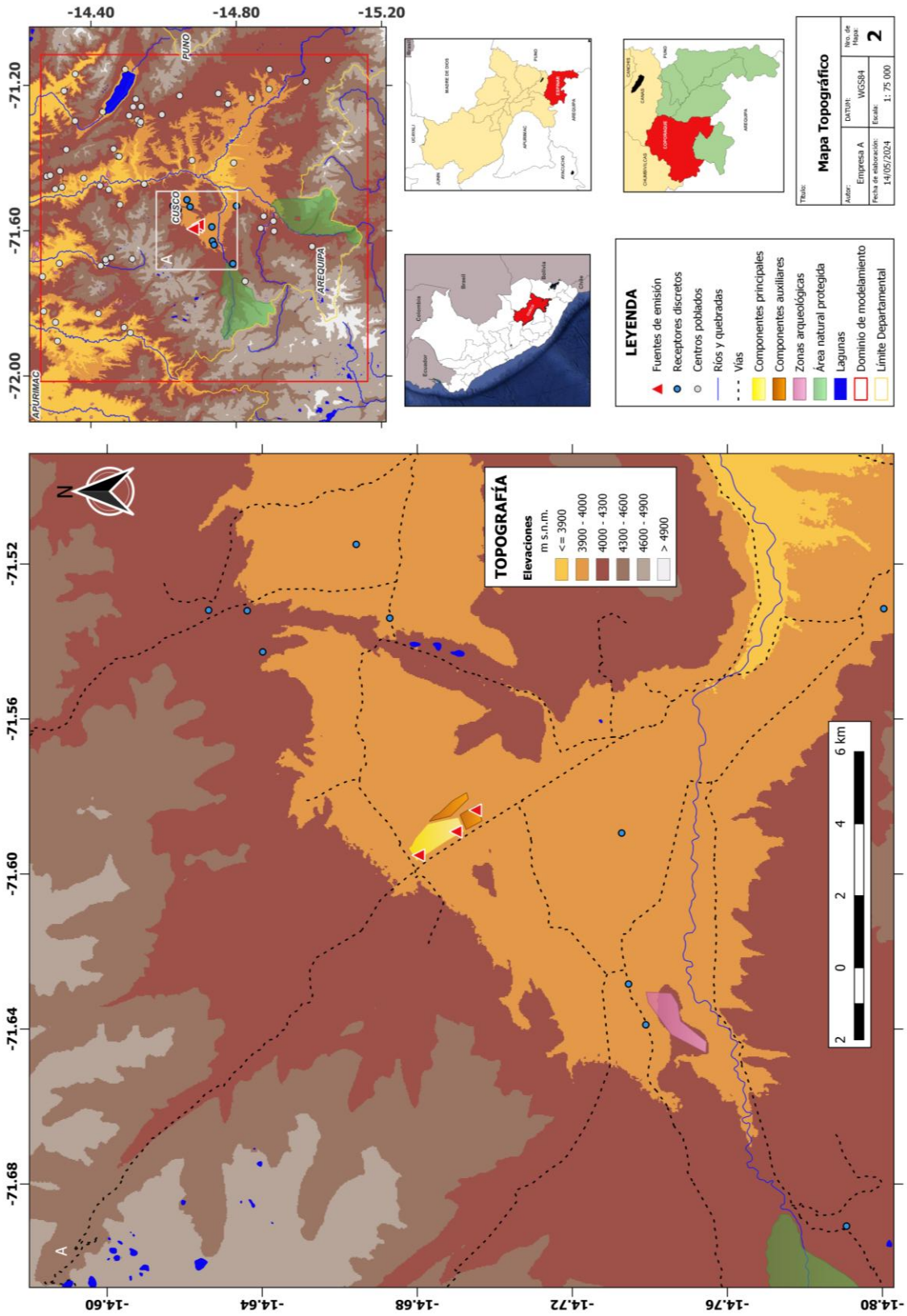
Isoconcentraciones

- Las isoconcentraciones deben ser generadas mediante el procesador de las salidas del modelamiento como el AERPLOT (AERMOD) o CALPLOT (CALPUFF). Asimismo, estas deben ser exportadas en formato Shapefile para su presentación en el Mapa de isoconcentraciones.

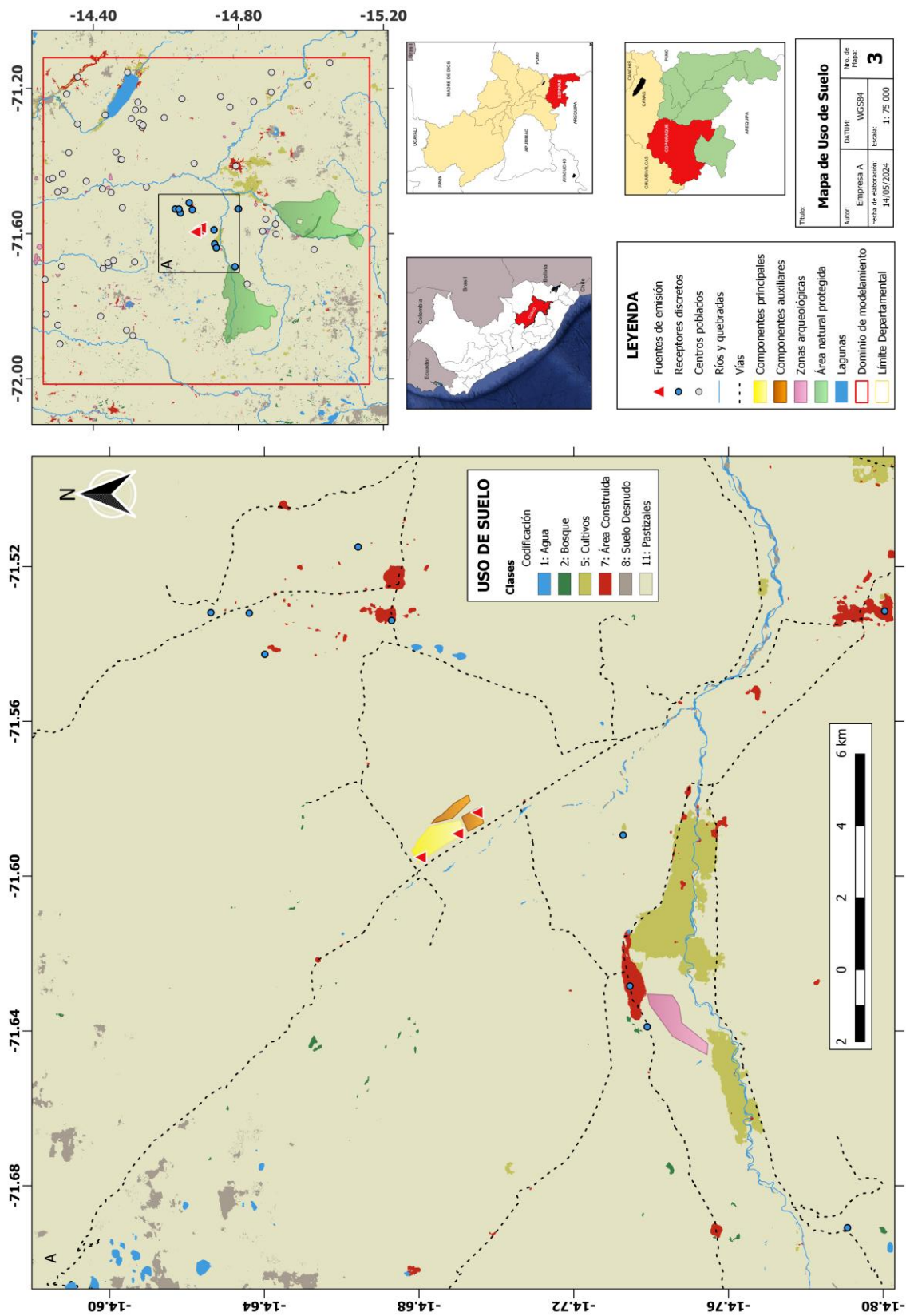
APÉNDICE 4: MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO



APÉNDICE 5: MAPA TOPOGRÁFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO



APÉNDICE 6: MAPA DE USO DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO



APÉNDICE 7: PERIODO DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

El periodo de los datos meteorológicos debe cubrir toda la variabilidad climática relevante del área de estudio, considerando las condiciones meteorológicas más desfavorables (US-EPA, 1978; US-EPA, 2017). La US-EPA recomienda que para fines regulatorios¹³ el periodo debería ser como mínimo de 5 años. El número exactos de años va a depender de poder cubrir los extremos climáticos que pueden generarse en un área determinada y los que puedan ser los más desfavorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos (US-EPA, 1978). Asimismo, se precisa que 5 años es un tiempo adecuado para la base de datos meteorológicos, sin embargo, el uso de años menores debe ser justificada si en ese tiempo se logra representar los eventos extremos que pueda generarse en el área de estudio.

En Brasil, mediante el Acuerdo de Directorio N°217/2014/I – Cetesb¹⁴, se menciona que, para elaborar un Documento Técnico, se debe utilizar datos meteorológicos de un periodo de 5 años continuos, debidamente validados mediante un análisis de consistencia. Por otro lado, en Argentina en su Resolución (OPDS) 559/19¹⁵ que aprueba el Procedimiento para la obtención, renovación o modificación de la Licencia de Emisiones Gaseosas a la Atmósfera (LEGA) / ANEXO III - Instructivo para la Aplicación de Modelos de Difusión Atmosférica a Emisiones Gaseosas, en su resolución se menciona lo siguiente:

“Para la utilización de estos modelos es necesario disponer de información meteorológica horaria, adecuadamente consistida, durante un período suficientemente representativo. Se deberá entonces contar con datos meteorológicos horarios de superficie en un período no inferior a los 5 años.”

Así también, de acuerdo con la Guía de Modelamiento de Dispersión de Aire de Ontario, el periodo de modelamiento meteorológico con fines regulatorios es de 5 años (Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2017). Por otro lado, el Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda indica que el uso más común de modelos de dispersión es evaluar los posibles efectos ambientales y para la salud de las descargas al aire desde instalaciones industriales o comerciales, para lo cual recomienda un periodo de 3 a 5 años. Además, indican que, un conjunto de datos meteorológicos de un año, no podrá caracterizar las condiciones meteorológicas más desfavorables y, por lo tanto, no se deben utilizar para modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, siendo esta una crítica a los estudios de modelamiento que solo consideran un año de evaluación (Ministry for the Environment, 2004).

La Agencia de Medio Ambiente y el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Gobierno de Reino Unido (2014), definen en su “Guía de Permisos ambientales: informes de modelos de dispersión del aire”, los requerimientos que se debe incluir un informe de modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos para obtener un permiso ambiental. En dicha guía, se establece con respecto a los datos

¹³ MDCA para fines regulatorios: constituyen todos los modelos que son utilizados para evaluar los impactos al ambiente por las emisiones producto de las actividades de empresas.

¹⁴ <https://licenciamiento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/documentos/Manual-DD-217-14.pdf>

¹⁵ https://www.ecofield.net/Legales/BsAs/res559-19_OPDS_BA.htm

Altiplano norte (Lago Titicaca), existe una relación entre la variabilidad interanual de las precipitaciones, el cual se explica por el calentamiento o enfriamiento generalizado de la troposfera tropical durante la fase negativa o positiva del ENOS y el fortalecimiento (debilitamiento) asociado de los vientos del oeste sobre los Andes Centrales (Garreaud & Aceituno, 2001). Igualmente, Lavado y Espinoza (2014), encontraron un alto porcentaje de anomalías durante el ENOS categorizados como fuertes, lo cual se reflejaba con un incremento de lluvias en la parte norte de la Vertiente del Pacífico (VP) y una disminución de lluvias en la región andina de la VP.

Es importante indicar que, existe mucha incertidumbre en los centros mundiales de investigación del clima en cuanto a la evolución de la intensidad y frecuencia del ENOS en el futuro, debido a la recurrencia de patrones asociados a nuevos modos de variabilidad interanual, y al contexto del cambio climático (SENAMHI, 2014). En ese sentido, el SENAMHI manifiesta que los eventos meteorológicos extremos se están haciendo más frecuentes, los cuales son atribuidos al calentamiento global, manifestándose en el incremento de los valores normales de distintas variables meteorológicas (temperaturas²⁰, precipitaciones, entre otros).

Ahora bien, dada la experiencia que el SENAMHI ha adquirido en la evaluación de documentos técnicos, se ha evidenciado que los usuarios utilizan modelos recomendados o alternativos de la US-EPA, como AERMOD y CALPUFF, dichos modelos requieren para su ejecución datos meteorológicos observados²¹ y/o modelados²² (superficie y altura).

En ese contexto, en el Perú los datos meteorológicos observados son muy escasos o a veces inexistentes, por lo que, en muchos casos se utilizan datos meteorológicos modelados. A nivel internacional, existen empresas que se encargan de proveer datos meteorológicos modelados con diferentes características (distintos modelos meteorológicos, diferentes escalas espaciales, entre otros) a quienes así lo requieran.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente y dada la importancia del uso de los modelos de dispersión, así como a la gran diversidad climática del Perú (38 climas)²³ que es resultado de la interacción entre su ubicación geográfica, la Cordillera de los Andes y de los diferentes factores climáticos que lo afectan, como el ENOS; el SENAMHI, ha visto por conveniente que, para elaborar un Documento técnico, se debe utilizar como mínimo los últimos tres (3) años de datos cuando se utilice datos meteorológicos observados y de los últimos seis (6) años de datos cuando se utilice datos meteorológicos modelados. Cabe precisar que cuando se tenga datos meteorológicos observados y modelados, la cantidad de datos a utilizar en el modelamiento será de 3 años.

²⁰ <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/eventos-extremos-en-el-peru-se-intensificarian-por-el-cambio-climatico-en-el-2030/>

²¹ Datos meteorológicos observados, son aquellos que se generan en estaciones meteorológicas automáticas.

²² Datos meteorológicos modelados, son aquellos que se generan mediante el uso de modelos numéricos dentro de un sistema informático.

²³ Mapa de clasificación climática del Perú: <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/api/records/9f18b911-64af-4e6b-bbef-272bb20195e4/attachments/Resumen%20ejecutivo%20Climas%20del%20Peru%CC%81.pdf>.

Precisiones adicionales

a) Datos meteorológicos observados faltantes

- En el caso de utilizar datos meteorológicos observados en donde las series estén incompletas, se deben considerar los criterios descritos en el cuadro N°14, para poder utilizarlos como datos de entrada en un MDCA.

Cuadro N°14. Porcentaje de datos faltantes aceptables por variable meteorológica²⁴

Variable Meteorológica	Porcentaje de datos faltantes	Observación
Precipitación (mm)	1 día no debe tener ninguna hora faltante (24 horas completas). 1 mes puede tener como máximo el 10 % de días faltantes (3 días) *.	Los datos faltantes pueden ser aleatorios, no necesariamente consecutivos
Temperatura Máxima (°C)	1 día puede tener como máximo el 20% de horas faltantes (5 horas).	Los datos faltantes deben ser necesariamente consecutivos
Temperatura Mínima (°C)	1 mes puede tener como máximo el 15% de días faltantes (5 días) *.	
Velocidad del Viento (m/s)		
Dirección del Viento (°)		
Humedad Relativa (%)		

*Fuente: SENAMHI (2021).

- En el caso de no contar con el porcentaje de datos aceptables por variable meteorológica, estos datos meteorológicos no se pueden utilizar o emplearse como entrada en un MDCA. Por otro lado, para datos meteorológicos que cumplan con el porcentaje de datos faltantes por variable meteorológica, y con la intención de completar los datos al 100%, se pueden emplear técnicas de completación de datos como vecinos más cercanos, ecuaciones encadenadas, técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, entre otra previa sustentación técnica (Yozgatligil et al., 2013; Ferrari & Ozaki, 2014; Sattari et al., 2016).

b) Combinación de datos meteorológicos observados y modelados

- Cuando se disponga de datos meteorológicos observados de superficie y no se cuente con datos meteorológicos observados de altura, es posible utilizar datos meteorológicos modelados de altura para suplir esta limitante y utilizarlos como entrada para el MDCA. Para ello se considerará el periodo de datos meteorológicos observados. Por ejemplo:

²⁴ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>.

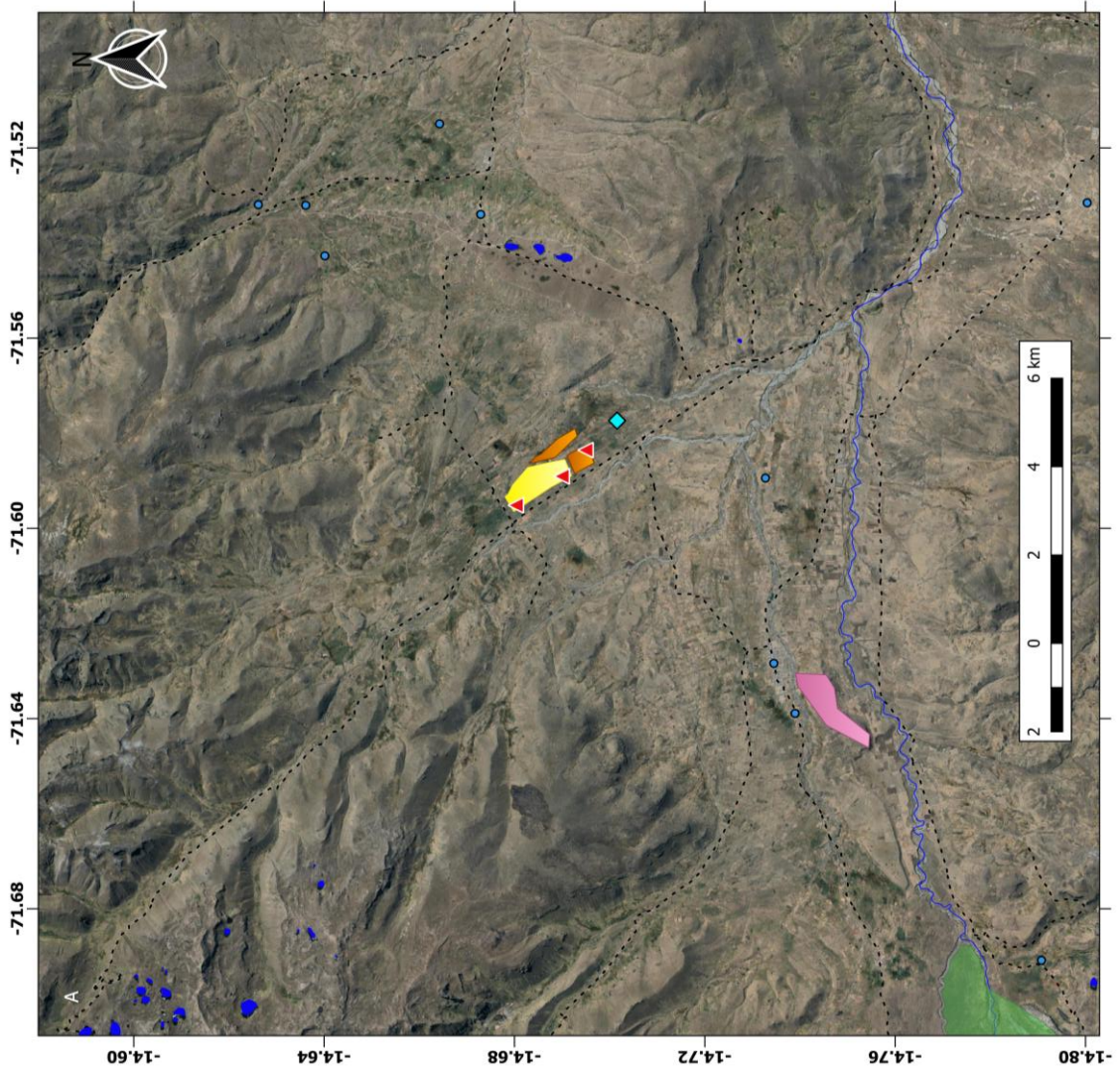
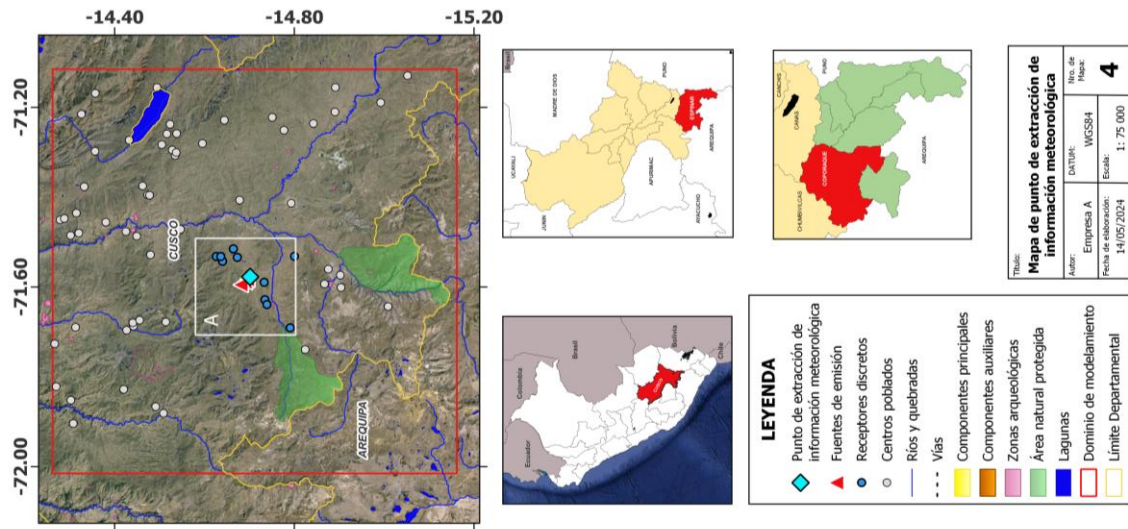
- Si se dispone de tres (03) años de datos meteorológicos observados de superficie, se puede utilizar tres (03) años de datos meteorológicos modelados de altura.
- Si se dispone de tres (03) años de datos meteorológicos observados de altura, se puede utilizar tres (03) años de datos meteorológicos modelados de superficie.
- Cabe precisar que, no se debe utilizar los estimadores de datos meteorológicos de altura de los MDCA (como por ejemplo el Upper Air Estimator, el cual se encuentra incluido en el modelo AERMOD View desarrollado por empresa canadiense Lakes Environmental) dado a que estos tienen un 50% de error en sus estimaciones (Thé et al., 2001). Asimismo, como lo mencionan Kalhor y Bajoghli (2017), los resultados del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos pueden subestimarse o sobrestimarse, por lo que sugieren que cuando no se disponga de datos meteorológicos de altura se utilicen otras fuentes (como datos modelados) y no el estimador predeterminado del MDCA.

APÉNDICE 8: EJEMPLO DE PARAMETRIZACIONES FÍSICAS DEL MODELO METEOROLÓGICO

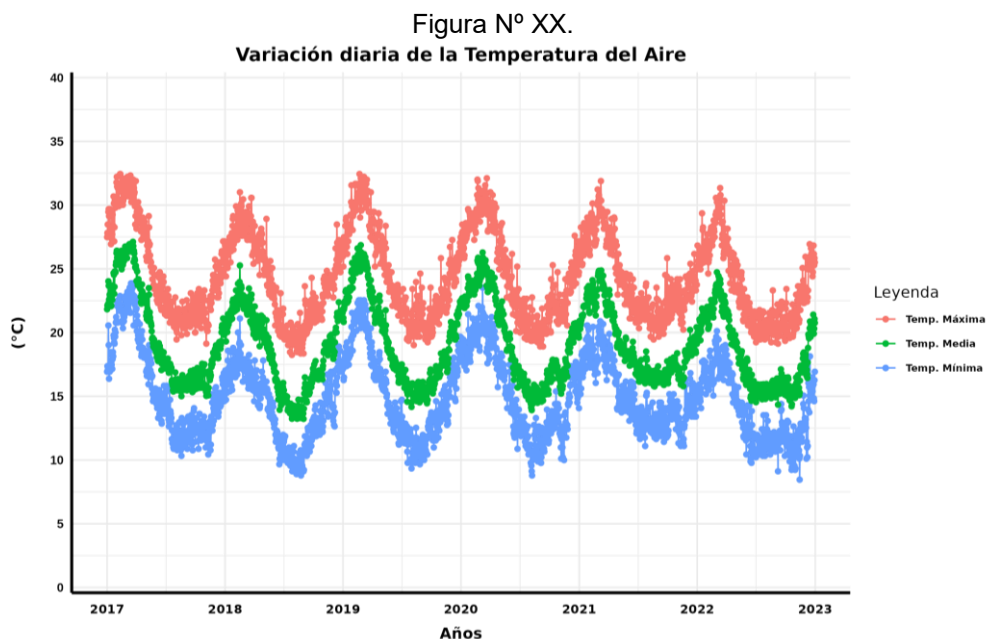
WRF Physics Options		
#	Type	Options Used
1	Microphysics	WRF Single-moment 3-class scheme mp_physics = X
2	Long-wave Radiation	RRTMG Longwave scheme ra_lw_physics = X
3	Short-wave Radiation	RRTMG Shortwave scheme ra_sw_physics = X
4	Surface Layer	Revised MM5 scheme sf_sfclay_physics = X
5	Land Surface	Unified Noah Land Surface model sf_surface_physics = X
6	Planetary Boundary Layer	Yonsei University (YSU) scheme bl_pbl_physics = X
7	Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (grid size > 10km only) cu_physics = X

X = Estos valores deben modificarse de acuerdo al área de estudio

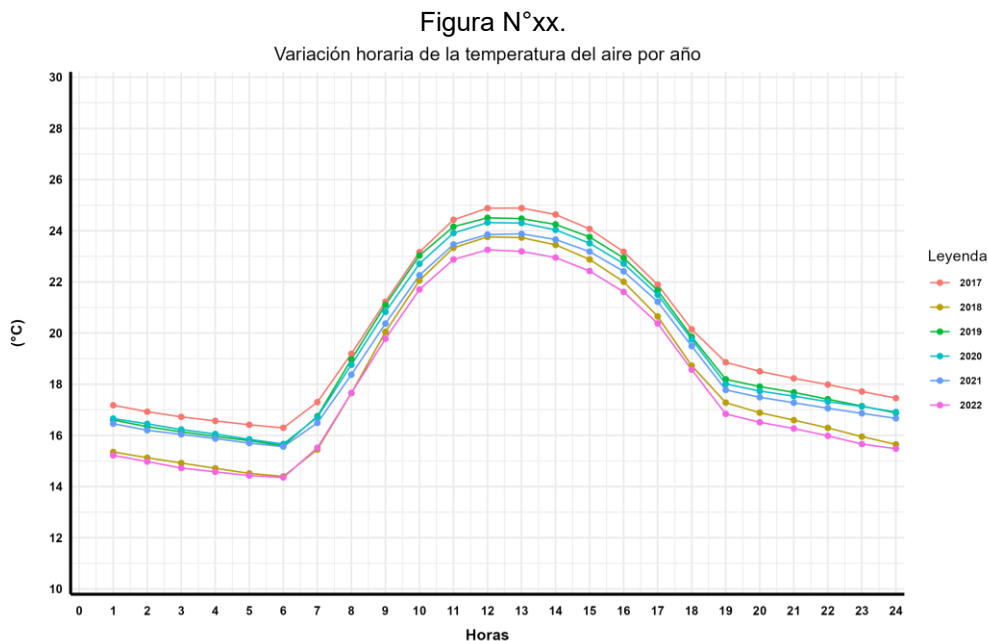
APÉNDICE 9: MODELO DE MAPA DE PUNTO DE EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS



APÉNDICE 10: GRÁFICOS DE COMPORTAMIENTO DE TEMPERTURA



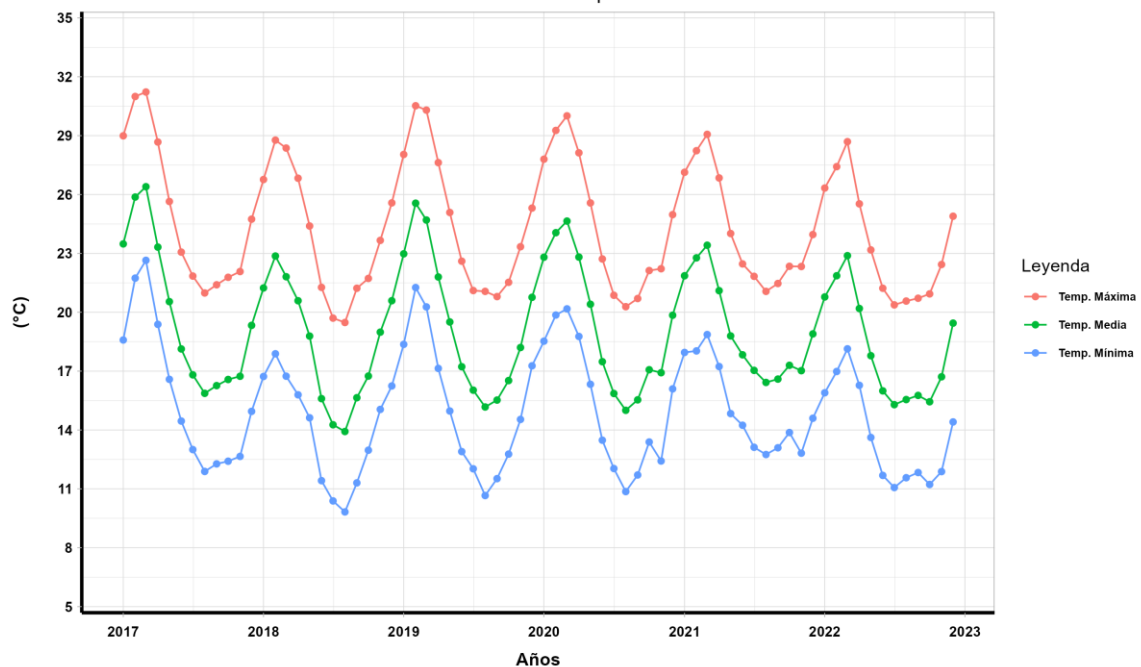
En la Figura N° XX, se puede observar patrones estacionales, con picos en los meses de verano y mínimas en los meses de invierno. Durante los meses de verano las temperaturas máximas sobrepasan los 30°C (llegando a alcanzar temperaturas de alrededor de 33°C); mientras que en los meses de invierno las temperaturas mínimas llegan a estar por debajo de los 10°C (llegando a alcanzar temperaturas de alrededor de 8°C), a excepción de los años 2017 y 2021 (donde las temperaturas mínimas son más altas que 10°C). Las temperaturas medias presentan picos en verano con valores alrededor de los 27°C y mínimas entorno a los 14°C. En general, el año 2017, es el año que presenta las temperaturas máximas y mínimas más altas.



La Figura xx, muestra el ciclo horario promedio de la temperatura en la zona de estudio. Como se puede apreciar, los valores mínimos horarios se presentan a las 05 horas, mientras que los máximos se presentan entre las 11 a 12 horas del día. Entre las 12 y 18 horas se aprecia una disminución rápida de la temperatura, mientras que, pasada las 18

horas hasta las 23 horas, la disminución de la temperatura es menos abrupta. Asimismo, se aprecia en la Figura 2, que las temperaturas que se presentaron en los años 2018 y 2022 fueron menores que la temperatura promedio (del periodo de datos meteorológicos); mientras que, el 2021 el comportamiento de la temperatura fue similar a la del promedio, llegando a presentarse mayores valores entre 0 a 7 horas, 8 a 15 horas y entre las 21 a 23 horas. De toda la serie, fue el año 2022 el que presentó las menores temperaturas, alcanzando valores mínimos de alrededor de 14°C; mientras que el 2017 presentó los valores más altos, con registros que alcanzaron los 24.8 °C. Los años que presentaron las mayores temperaturas, fueron 2017, 2018, 2019 y 2020; el año 2017 presentó la temperatura más elevada posiblemente relacionada al Fenómeno de El Niño Costero que aconteció dicho año.

Figura N°xx.
Variación mensual de la Temperatura del Aire



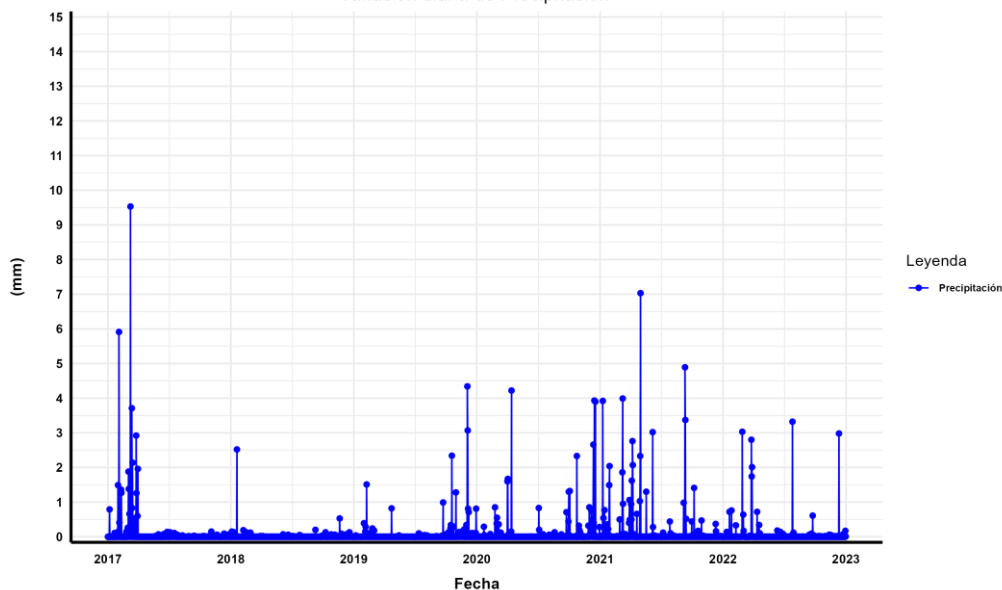
En la Figura N°XXX, se puede observar el comportamiento promedio mensual interanual de la Temperatura del Aire máxima, mínima y promedio. Los valores máximos generalmente se encuentran durante los meses de enero febrero siendo el año 2017 de todo el periodo de estudio quien alcanzo el mayor valor, lo cual estaría relacionado al Fenómeno de El Niño Costero. Por otro lado, respecto a las temperaturas mínimas, generalmente estas se encuentran durante el mes de julio y durante el año 2018 se alcanzó la temperatura mínima más baja para todo el periodo de estudio, siendo consecuencia de al Fenómeno de La Niña.

El código desarrollado en el lenguaje de programación R para la elaboración de las gráficas, del comportamiento de la temperatura del aire, está disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/SENAMHI-SEA/DTM/blob/main/DTM.R>

APÉNDICE 11: GRÁFICOS DE PRECIPITACIÓN

Figura N°xx.

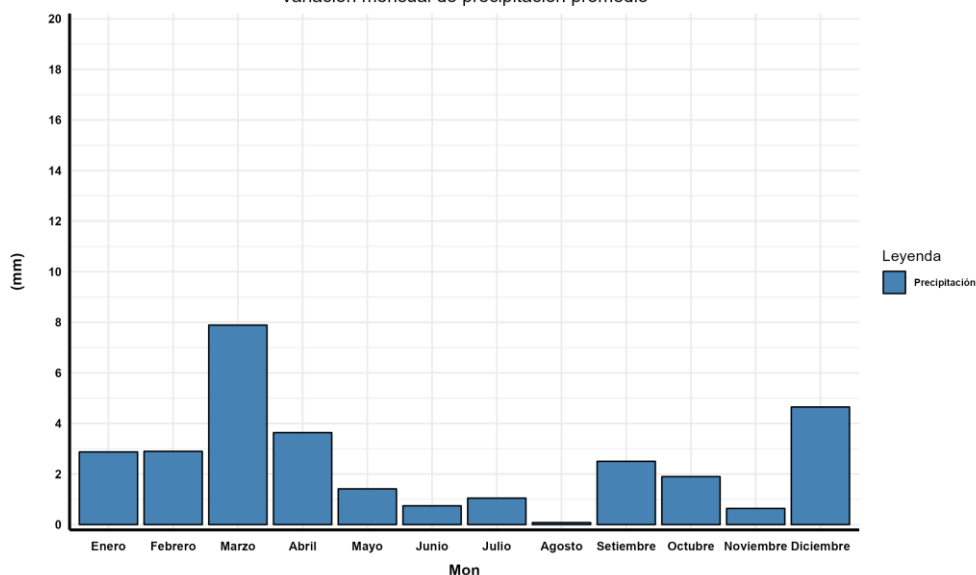
Variación diaria de Precipitación



La Figura N° XX, muestra la variabilidad horaria de la precipitación de todo el periodo de los datos meteorológicos (2017-2023), se observa que el año 2017 presenta la máxima precipitación de alrededor de 9.5 mm, seguida de 2021 con 7mm; asimismo, el 2021, presentó las precipitaciones más altas. De la serie de datos, se observa que en general los datos se presentan por debajo de los 2 mm.

Figura N°xx.

Variación mensual de precipitación promedio



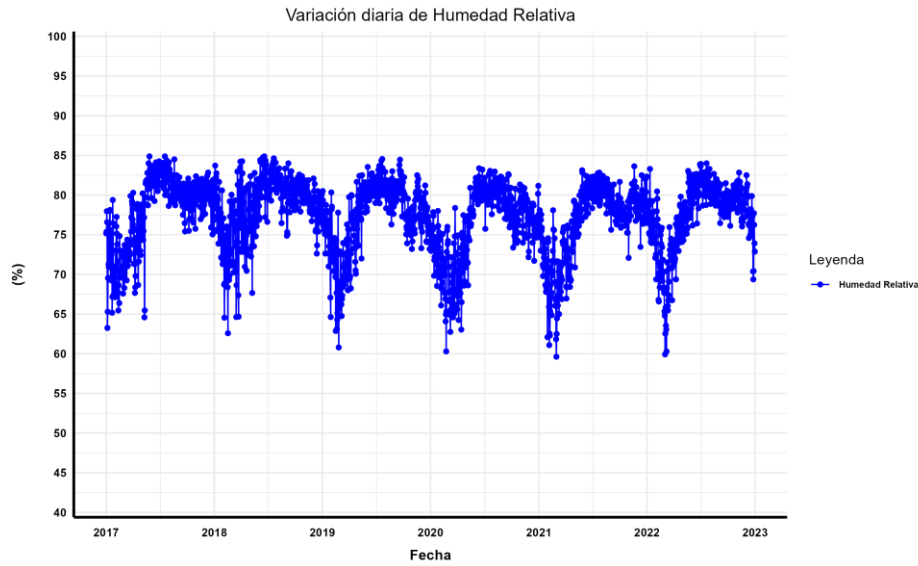
La Figura xx, variabilidad del promedio mensual de la precipitación acumulada de todo el periodo de estudio (2017-2023). Se observa que para enero y febrero la precipitación es baja, con medias cercanas a 2 mm, en marzo se incrementa con una mediana cerca de 5 mm y rango que alcanza hasta los 8 mm. Para el mes de abril la mediana se encuentra en torno a mm con un rango de hasta los 6mm, además presento un máximo de 12 mm. En los meses de mayo, junio, julio y agosto la precipitación disminuye considerablemente. En los meses de septiembre y octubre se presentan ligeros incrementos de la precipitación

con medianas alrededor de los 2 mm. Para el mes de diciembre se presenta un aumento con una mediana cercana a los 3mm y un rango cercano a los 8mm, con un valor máximo de 13mm.

El código desarrollado en el lenguaje de programación R para la elaboración de las gráficas, del comportamiento de la Humedad Relativa, está disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/SENAMHI-SEA/DTM/blob/main/DTM.R>

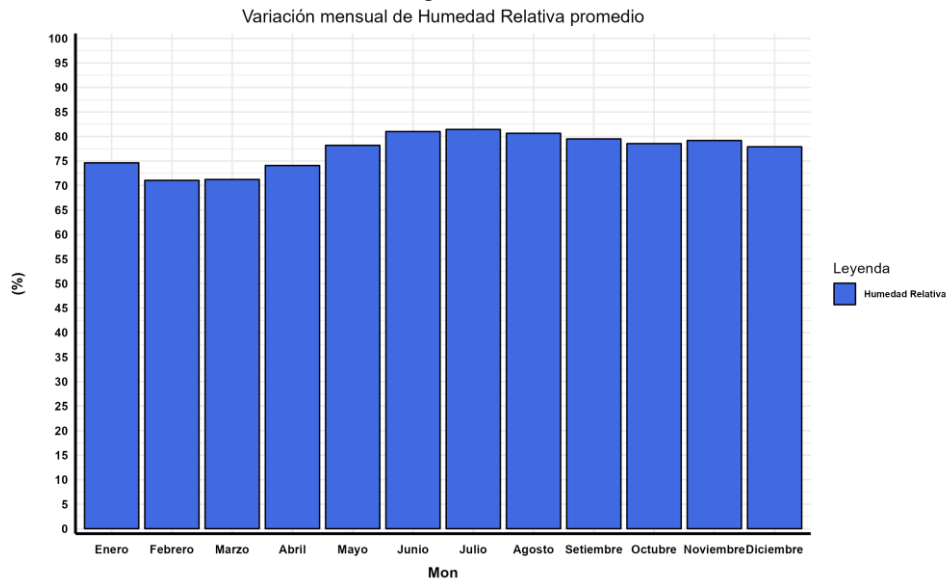
APÉNDICE 12: GRÁFICOS DE HUMEDAD RELATIVA

Figura N°xx.



La Figura N° xx, muestra la variabilidad diaria de la humedad relativa de todo el periodo de estudio (2017-2023). Como se puede apreciar, la gráfica exhibe un patrón estacional para cada año, mostrando valores más bajos durante los primeros meses del año (estación de verano) y valores más altos durante los meses de invierno. Los valores máximos están alrededor del 85%, mientras que los valores mínimos están alrededor del 60%.

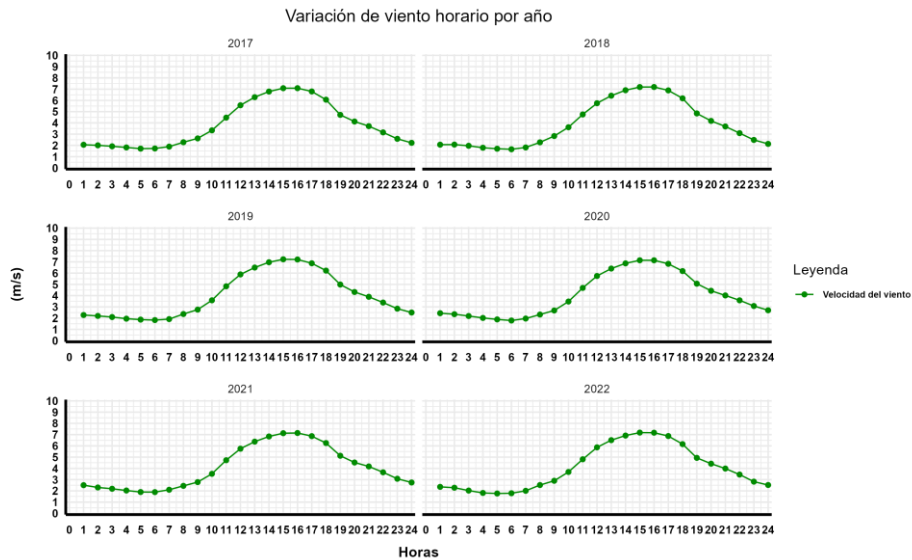
Figura N°xx.



La Figura xx, variabilidad del promedio mensual de la Humedad Relativa de todo el periodo de estudio (2017-2023). Se observa que para febrero y marzo la humedad es relativamente baja, con medias cercanas a 70. Hacia el mes de junio se presentan los calores de humedad más altos, estos cercanos a 82%. En los meses de invierno junio, julio y agosto la Humedad es más alta. En los meses de septiembre y octubre se presentan ligeras reducciones de la precipitación con medianas alrededor del 78%.

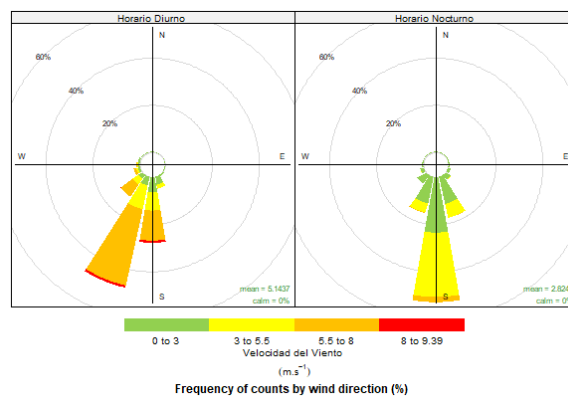
APÉNDICE 13: GRÁFICOS DE VIENTO

Figura N°: XX



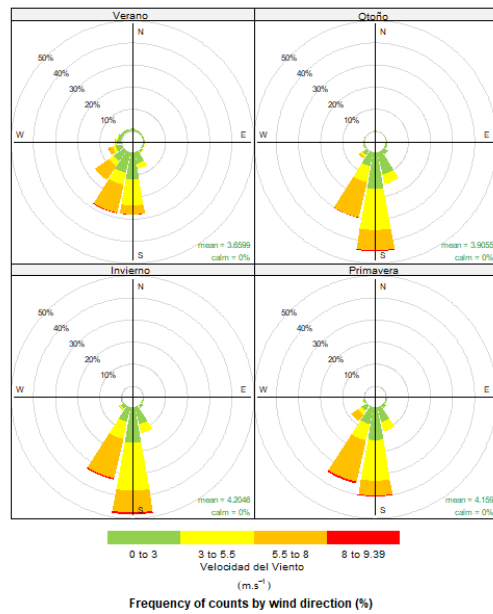
La Figura xx, muestra el ciclo horario promedio de la velocidad del viento en la zona de estudio. Como se puede apreciar, los valores mínimos horarios se presentan entre las 05 y 06 horas, mientras que los máximos se presentan entre las 15 a 16 horas del día. Entre las 18 y 20 horas se aprecia una disminución rápido del viento, mientras que, pasada las 21 horas hasta las 23 horas, la disminución es menos abrupta. Asimismo, se aprecia que los vientos que se presentaron en los años 2018 fueron menores que a los alcanzados en promedio (del periodo de datos meteorológicos); mientras que, el 2021 el comportamiento del viento fue similar a la del promedio. De toda la serie, fue el año 2022 el que presentó las menores temperaturas, alcanzando intensidades de viento cercanas a 1m/s.

Figura N°: XX



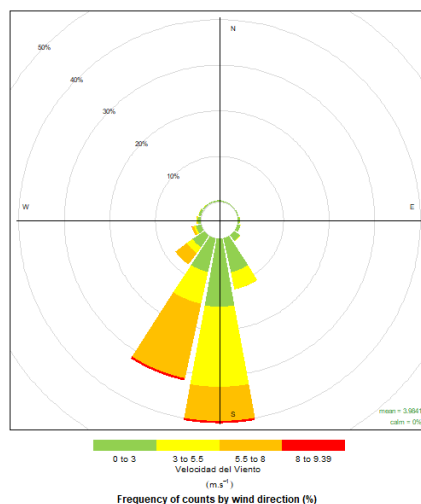
La Figura xx, muestra las rosas de viento del ciclo Diurno (06-19hrs) y Nocturno (19-06), presentando para el horario diurno una dirección predominante del sur suroeste (SSO) y con una velocidad máxima de 9.4 m/s y un promedio de 5.1 m/s. Por otro lado, con respecto al horario Nocturno, se alcanzó una velocidad predominante del Sur (S) con una intensidad máxima de 8m/s y un promedio de 2.8 m/s. Asimismo no registraron calmas durante el periodo de monitoreo.

Figura N°: XX



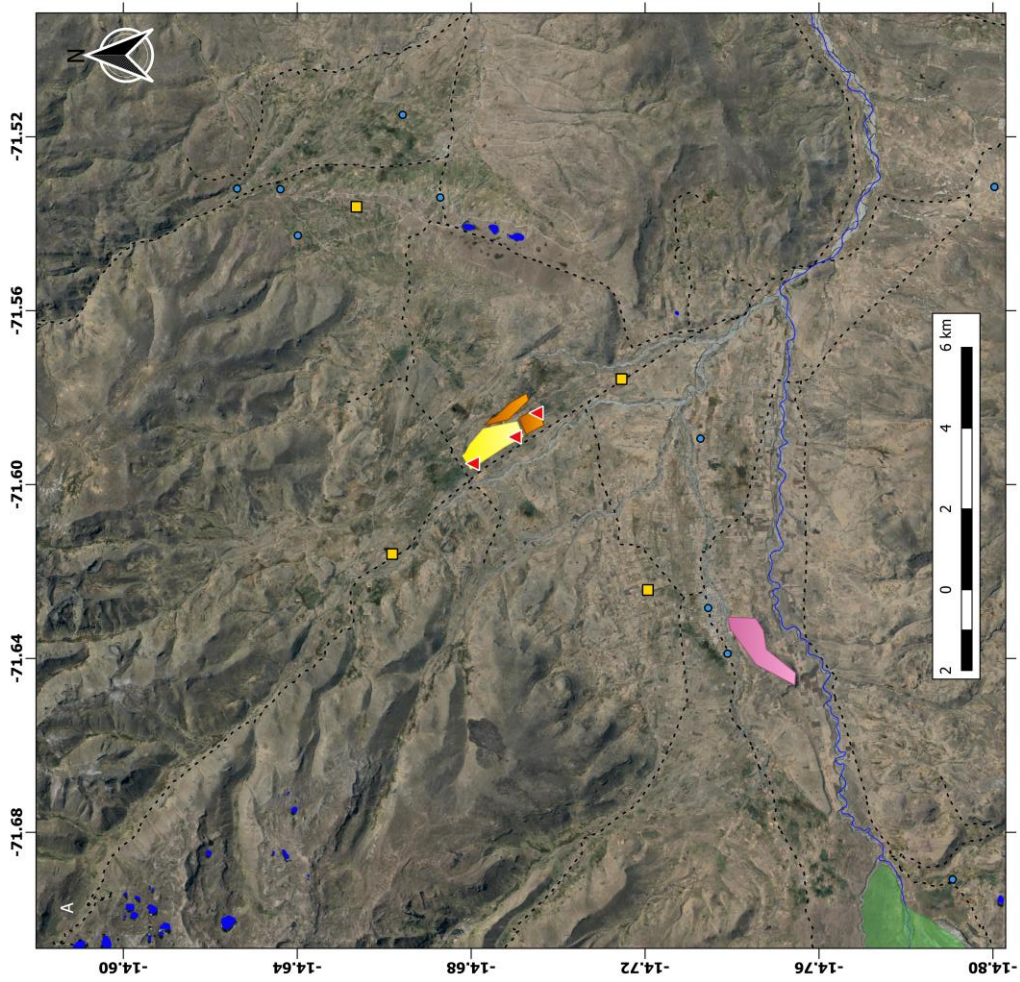
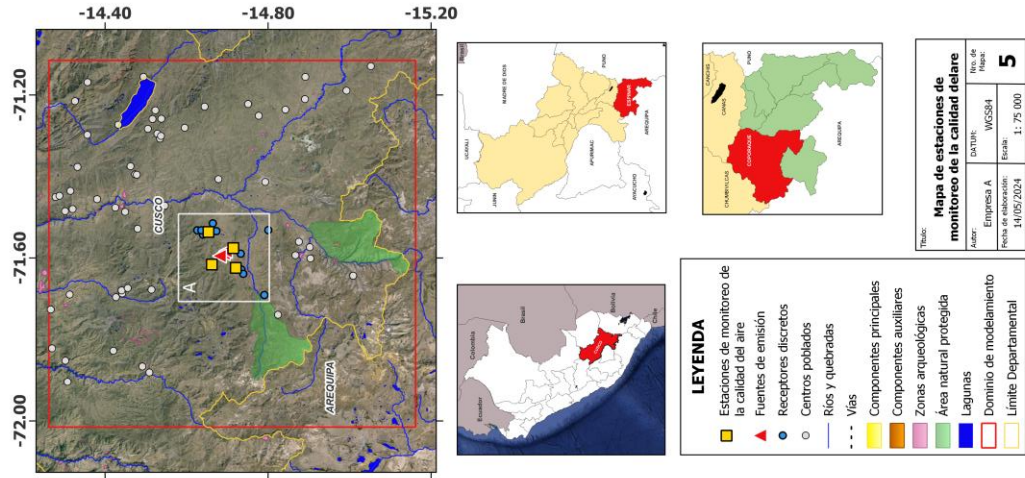
En la Figura N° XX se tiene la variación del viento a nivel estacional. Presentando para la estación de verano una dirección predominante del sur suroeste (SSO) y una intensidad máxima de hasta 9.4 m/s, con un promedio de 3.6m/s. Para la estación de otoño presento una dirección predominante del Sur (S), con una intensidad de hasta 9.4 m/s, sin embargo, registro un promedio de 3.9 m/s. En la estación de invierno se registró una dirección predominante del Sur (S) con una intensidad máxima del 9.4m/s y con un promedio de 4.2 m/s. Finalmente, en la estación de primavera se alcanzó una dirección predominante del Sur con una intensidad máxima de 9*.4 m/s y un flujo promedio de 4.1 m/s. Las estaciones con las velocidades más altas registradas en promedio, han sido las de invierno y primavera. Asimismo, cabe mencionar que no se registraron calmas.

Figura N°: XX

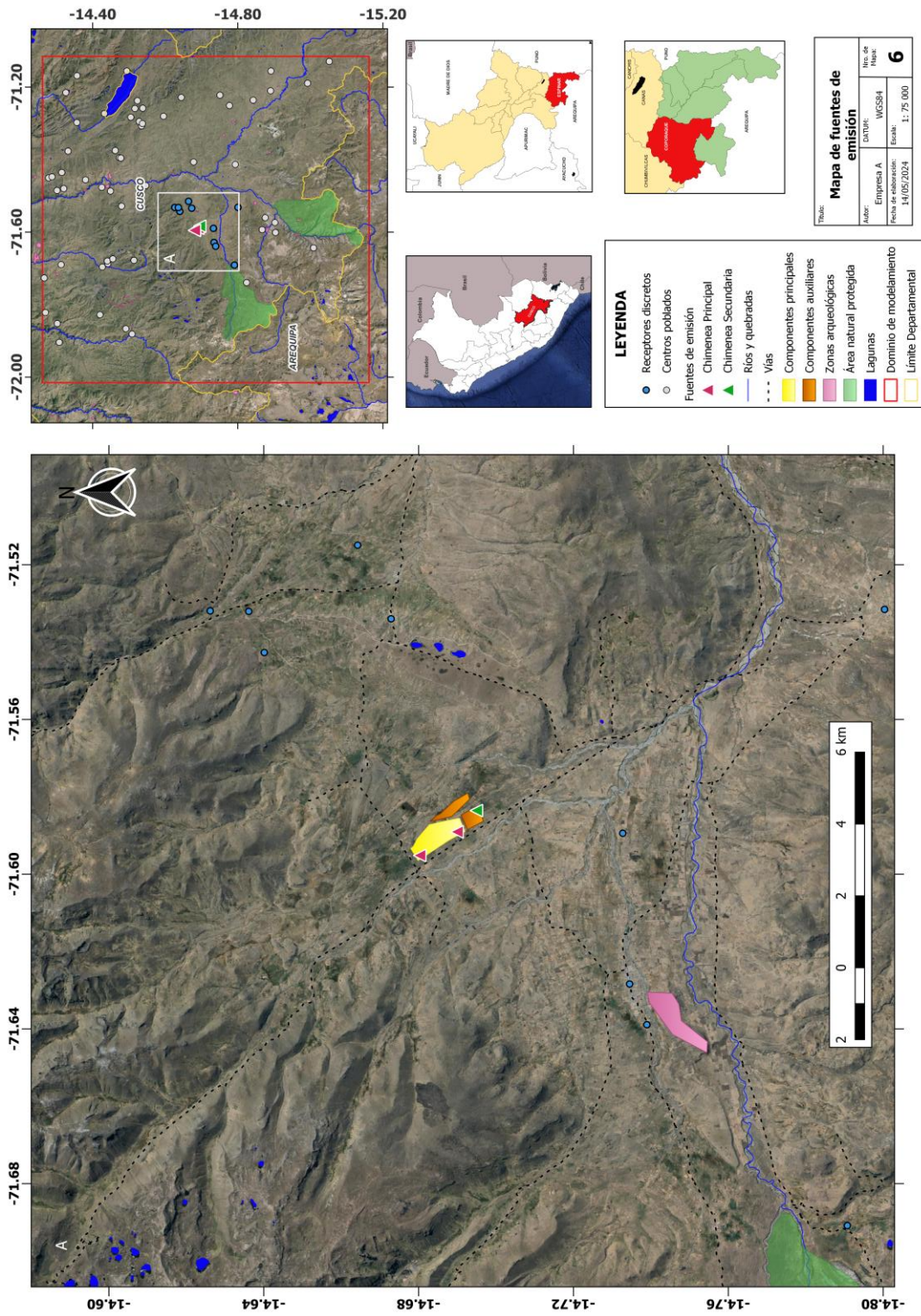


En la Figura N° XX se tiene la variación del viento para todo el periodo de estudio 2017-2023. Presentando una dirección predominante del sur (S) y una intensidad máxima de hasta 9.4 m/s, con un promedio de 3.9m/s.

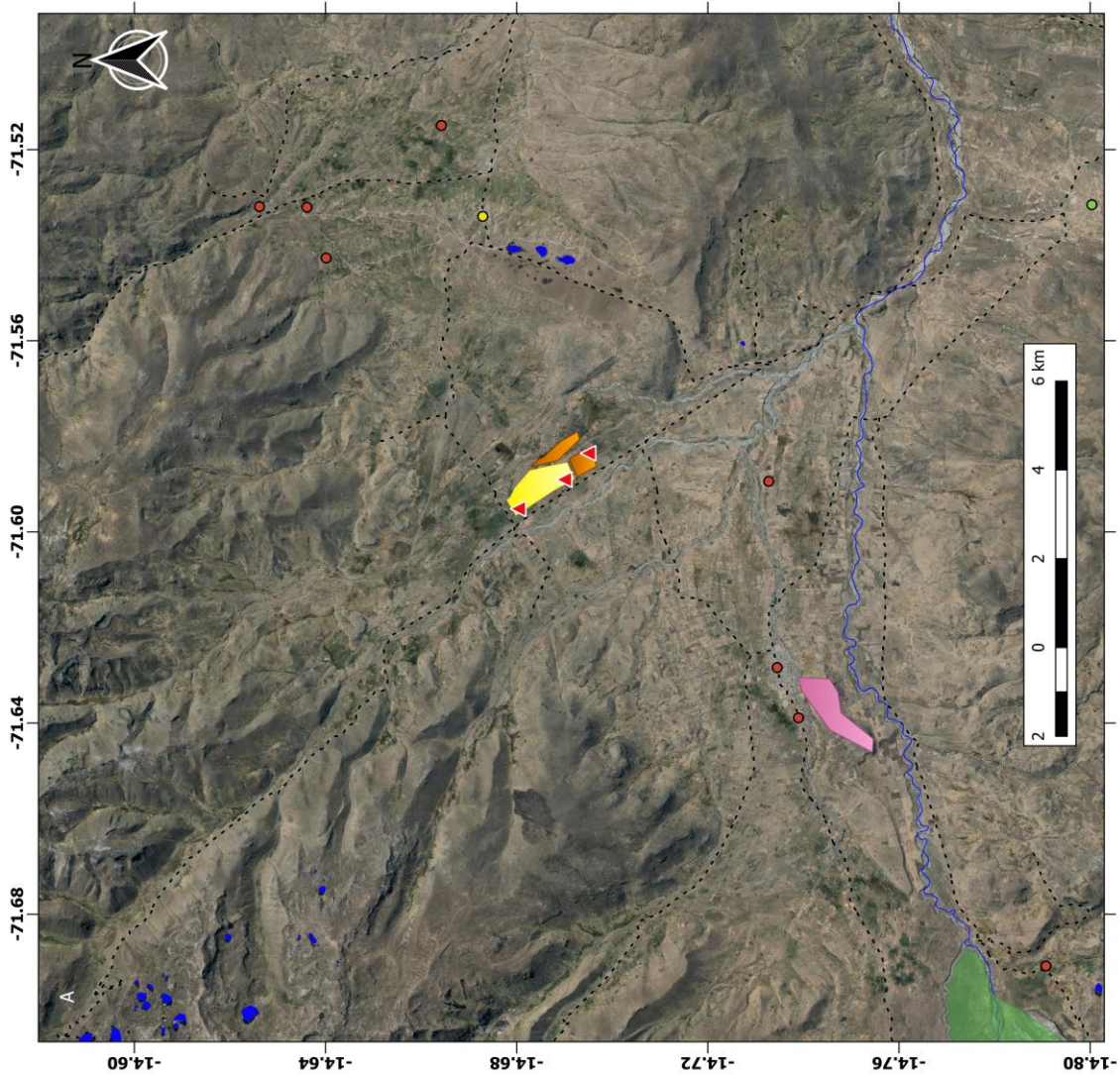
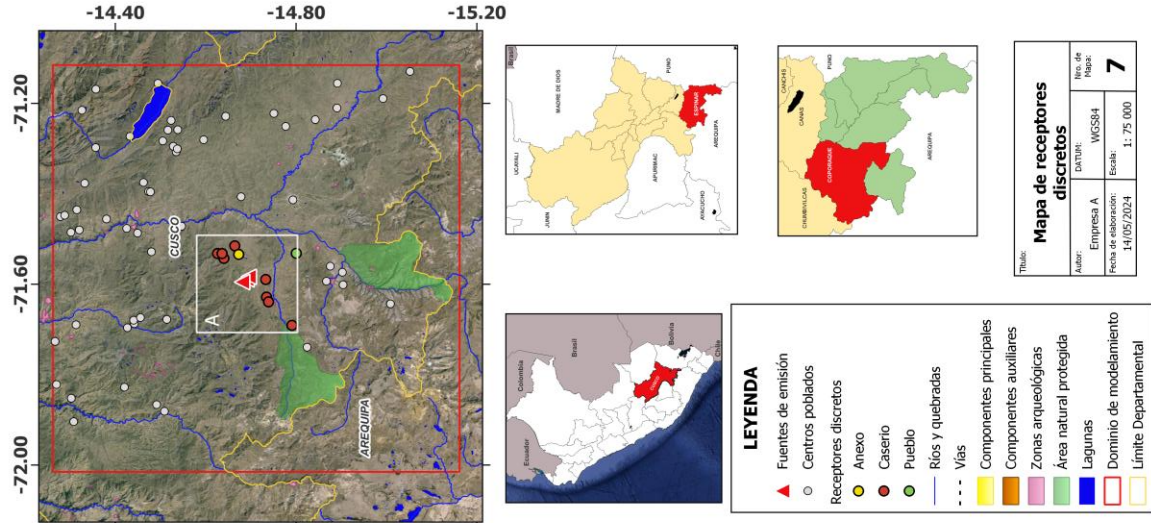
APÉNDICE 14: MODELO DE MAPA DE ESTACIONES DE CALIDAD DE AIRE



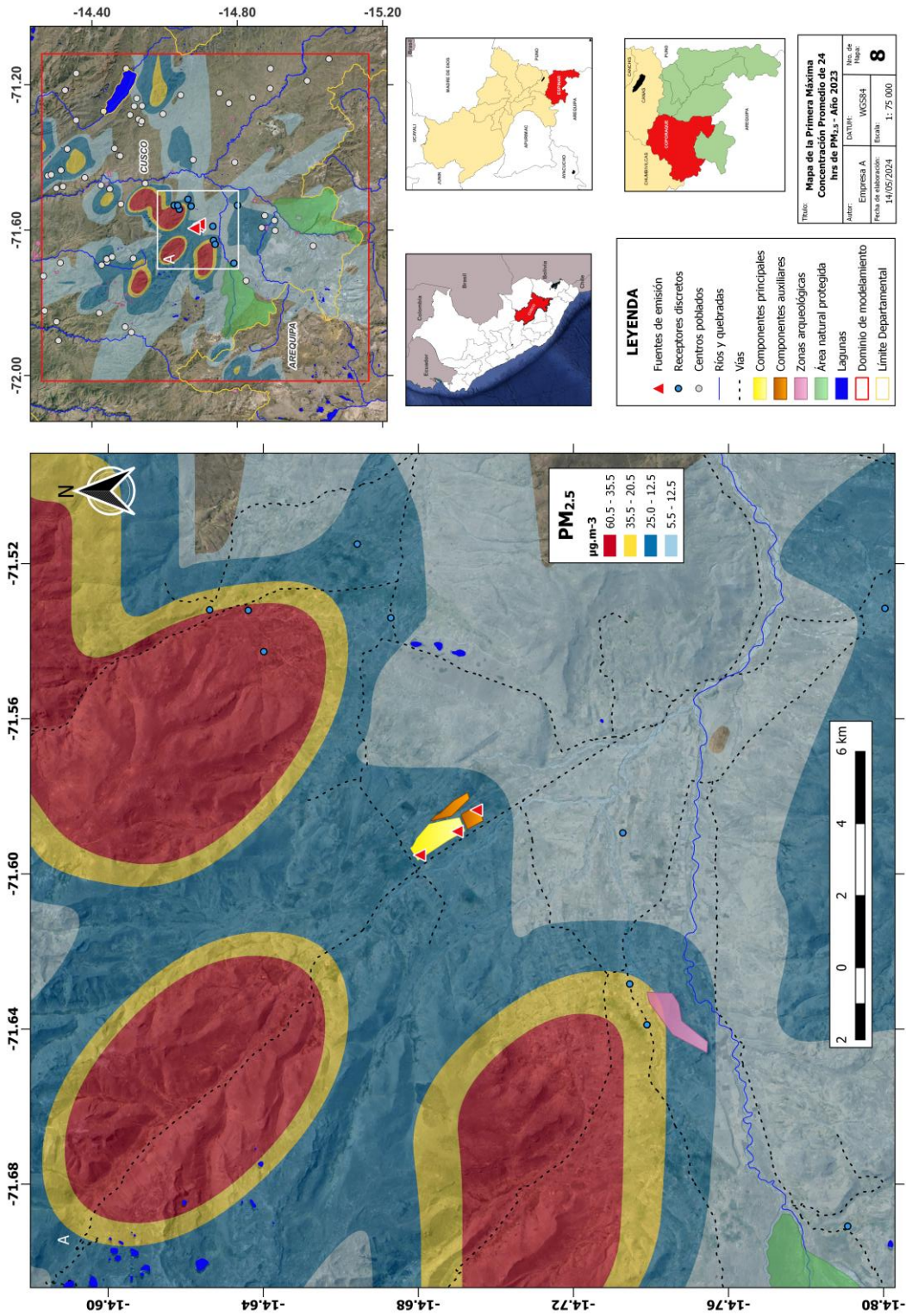
APÉNDICE 15: MODELOS DE MAPAS DE FUENTES DE EMISIÓN



APÉNDICE 16: MODELO DE MAPA DE RECEPTORES DISCRETOS



APÉNDICE 17: MODELO DE MAPA DE ISOCONCENTRACIONES



APÉNDICE 18: VALIDACIÓN DE LOS MDCA

Los MDCA tienen errores asociados a la información utilizada para generar sus salidas o a las parametrizaciones utilizadas en su configuración (US-EPA, 2023). Por eso es importante realizar un análisis cualitativo y cuantitativo para evaluar el desempeño del modelo (US-EPA, 2009). El análisis cualitativo debe realizarse mediante la comparación de las salidas de los MDCA y de la información observada (obtenidas en monitoreos de contaminantes del aire), a través de un análisis gráfico de la información. Con respecto al análisis cuantitativo, se debe utilizar pruebas estadísticas como las que se indican en el Cuadro N°15, las cuales permitirán determinar el grado de incertidumbre de las salidas de los modelos.

Cuadro N°15. Pruebas para validación

Prueba	Fórmula
Sesgo de media geométrica (MG)	$MG = \exp(\ln \bar{O}_i - \ln \bar{P}_i)$
Varianza geométrica (VG)	$VG = \exp[(\ln \bar{O}_i - \ln \bar{P}_i)^2]$
Diferencia absoluta normalizada (DAN)	$DAN = \frac{ O_i - P_i }{O_i + P_i}$
Error Absoluto Medio (EAM)	$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $
Error Medio Cuadrático Normalizado (ECMN)	$ECMN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$
Coefficiente de correlación (r)	$r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}}{\sigma_o \sigma_p}$
Coefficiente de determinación (r ²)	$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{P} - \bar{O})^2}$
BIAS (sesgo)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i = \bar{P} - \bar{O}$

N: Cantidad de datos P_i : Contaminante modelado O_i : Contaminante observado \bar{P} : Promedio del contaminante modelado \bar{O} : Promedio del contaminante observado
 σ_o : Desviación estándar de contaminantes observados σ_p : Desviación estándar de contaminantes modelados
 \bar{O}_i : Máximo valor del contaminante observado \bar{P}_i : Máximo valor del contaminante modelado

Precisiones adicionales

Para realizar una correcta validación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, es imperioso utilizar datos observados estadísticamente representativos de los datos modelados o idealmente que se tenga la misma cantidad de datos. Sin embargo, el acceso a un conjunto de datos de calidad del aire adecuada es muy limitada (De Visscher, 2014).

Por ello para DTM realizados en el Perú, se acepta que se empleen datos de monitoreos de calidad del aire para realizar el proceso de validación y se exigen que se encuentren en los rangos de aceptabilidad indicados a continuación:

a) Datos de monitoreos de calidad del aire:

Los datos obtenidos mediante los monitoreos de calidad del aire deben ser utilizados para realizar las pruebas de validación. Cabe precisar que estos deben registrarse en el periodo de modelamiento. Asimismo, dado que existen distintos métodos²⁵ para realizar un monitoreo de calidad del aire estipulados en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. Independientemente del tipo de método utilizado, estos datos tienen que ser representativos de un año y se deben utilizar para realizar la validación.

b) Rangos de aceptabilidad

A continuación, se muestra el siguiente cuadro, donde se precisan los rangos de aceptabilidad de las pruebas de validación, las cuales permiten determinar y asegurar una correcta representación de las condiciones de contaminación producto de las emisiones evaluadas en el área de estudio.

Cuadro N° 16. Pruebas para validación

Indicador	Rango	Fuente
Sesgo de media geométrica (MG)	$0.7 < MG < 1.3$	
Varianza geométrica (VG)	< 1.6	
Diferencia absoluta normalizada (DAN)	< 0.50	
Error cuadrático Absoluto Medio (EAM)	< 6	(Schatzmann et al. 2010; Hanna & Chang, 2012)
Error cuadrático medio normalizado (ECMN)	< 6	
Coefficiente de correlación (r)	> 0.6	
Coefficiente de determinación (r ²)	> 0.6	
BIAS (sesgo)	$ BIAS < 0.6$	

c) Ejemplo de aplicación:

Para realizar una correcta validación a las salidas de un MDCA, es necesario tener datos observados y datos modelados de un mismo lugar, en un mismo periodo de tiempo y que la cantidad de éstos sean suficientemente grande para que las pruebas estadísticas sean significativas al aceptar o rechazar nuestras hipótesis planteadas. Sin embargo, el acceso a un conjunto de datos de calidad del aire representativa es muy limitada en el Perú. Por lo tanto, como caso aplicativo se presenta el proceso de validación para las salidas de un MDCA considerando los 31 días del mes de julio del año 2013, como representativos de un año.

²⁵ Métodos de monitoreo de calidad del aire según su tecnología indicados en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire:

1. Sistemas manuales pasivos.
2. Sistemas manuales activos.
3. Sistemas automáticos.

c.1) Datos modelados

El usuario debe extraer las concentraciones modeladas del contaminante de su interés en la ubicación de la/s estación/es de monitoreo de calidad del aire.

c.2) Síntesis de concentraciones

En el Cuadro N°17 se presentan las concentraciones de un contaminante (PM₁₀) para el proceso de validación de los 31 días del mes de julio del año 2013. Las concentraciones que se consignan son la concentración final (CFI) y la concentración observada (CO). Asimismo, es importante precisar que la CFI se calcula como la concentración modelada en la ubicación de la estación de monitoreo de calidad del aire (CM) sumado a la concentración de fondo (CF). Para la aplicación se utiliza una CF de 16.06 µg/m³, la cual se calculó siguiendo los lineamientos del presente documento y el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.

Cuadro N°17. Concentraciones del contaminante para validación

Fecha	CM	CF	CFI	CO
1/07/2013	23.12	16.06	39.18	30.84
2/07/2013	23.99	16.06	40.05	34.89
3/07/2013	35.32	16.06	51.38	45.9
4/07/2013	16.01	16.06	32.07	27.68
5/07/2013	6.73	16.06	22.79	28.69
6/07/2013	12.42	16.06	28.48	22.14
7/07/2013	63.25	16.06	79.31	68.36
8/07/2013	2.16	16.06	18.22	22.44
9/07/2013	2.50	16.06	18.56	20.63
10/07/2013	2.03	16.06	18.09	17.56
11/07/2013	20.71	16.06	36.77	34.29
12/07/2013	2.07	16.06	18.13	21.4
13/07/2013	4.88	16.06	20.94	27.49
14/07/2013	2.54	16.06	18.60	22.45
15/07/2013	2.36	16.06	18.42	20.47
16/07/2013	22.56	16.06	38.62	34.97
17/07/2013	5.85	16.06	21.91	22.25
18/07/2013	2.70	16.06	18.76	19.88
19/07/2013	2.29	16.06	18.35	23.50
20/07/2013	2.60	16.06	18.66	20.59
21/07/2013	22.53	16.06	38.59	32.55
22/07/2013	14.39	16.06	30.45	24.80
23/07/2013	2.10	16.06	18.16	16.56
24/07/2013	1.50	16.06	17.56	18.55

25/07/2013	0.30	16.06	16.36	19.45
26/07/2013	0.87	16.06	16.93	18.21
27/07/2013	5.28	16.06	21.34	24.56
28/07/2013	2.06	16.06	18.12	20.59
29/07/2013	19.18	16.06	35.24	37.98
30/07/2013	0.00	16.06	16.06	19.85
31/07/2013	0.00	16.06	16.06	18.64

Donde:

CM : Concentración modelada en la estación de monitoreo de calidad del aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CF : Concentración de fondo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CFI : Concentración final ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CO : Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Los resultados de las pruebas de validación de las salidas del MDCA se presentan en el siguiente Cuadro. Asimismo, se presenta la gráfica de dispersión entre la concentración final (CFI) y la concentración observada (CO) (Figura N°9).

Cuadro N°18. Resultados de las pruebas para validación

Prueba	Resultado
Error Absoluto Medio	3.78
Raíz del Error Cuadrático Medio	4.45
Coefficiente de correlación (r)	0.96
Coefficiente de determinación (r^2)	0.93
BIAS (sesgo)	0.13

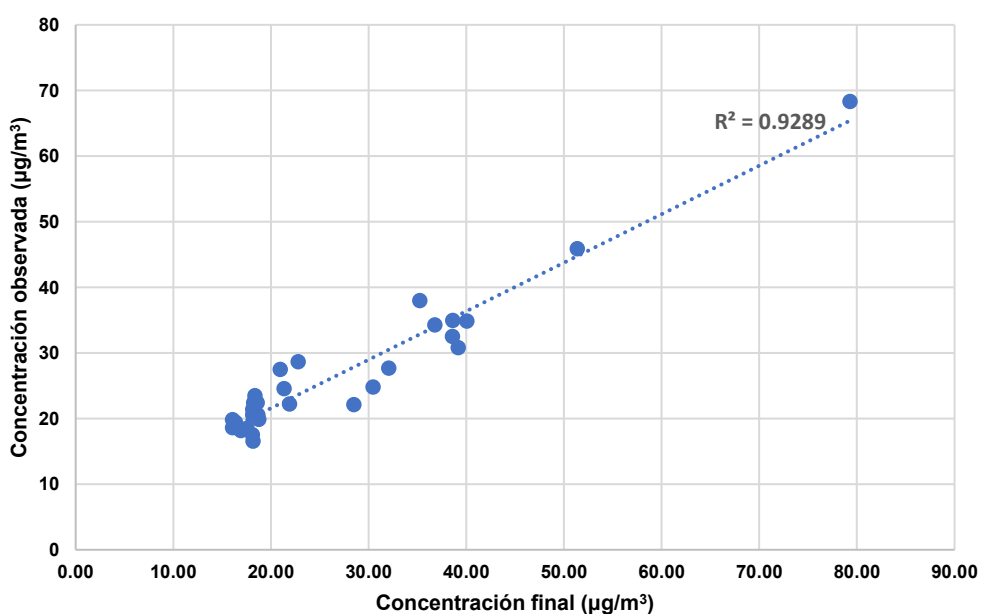


Figura N°3. Diagrama de dispersión entre las concentraciones finales (CFI) y las concentraciones observadas (CO)

De acuerdo con los resultados de las pruebas de validación, las salidas del modelo logran un buen desempeño. Los resultados nos indican que el MDCA es preciso: con un coeficiente de correlación (r) de 0.96 y un coeficiente de determinación (r^2) de 0.93. Así

también, el MDCA es exacto: con un error absoluto medio de 3.78, con una Raíz del Error Cuadrático Medio de 4.45 y con un sesgo de 0.13. Asimismo, el diagrama de dispersión entre las CFI y las CO, permite visualizar la alta correlación lineal entre las concentraciones, lo cual se valida con el alto coeficiente de determinación ($r^2=0.93$).

Finalmente, tomando en consideración los Rangos de Aceptabilidad del presente documento (Coeficiente de correlación (r) >0.6 ; Coeficiente de determinación (r^2) >0.6 y $|\text{BIAS}| < 0.6$), se concluye que las salidas del modelo son Aceptables.

APÉNDICE 19: CLASIFICACIÓN DE LOS MDCA

Según De Visscher (2014) y Metcalfe & Derwent (2014) los MDCA se clasifican de la siguiente manera:

- **Modelos Gaussianos:**

Gallego et al. (2012) indican que los modelos Gaussianos se basan en hipótesis relativamente sencillas de acuerdo con la naturaleza estocástica de la turbulencia y la dispersión del contaminante. Tiene su origen en una solución particular de la ecuación de advección-difusión en condiciones muy restrictivas. Son muy utilizados debido a que son intuitivos, fáciles y manejables.

Estos modelos son válidos sólo para condiciones topográficas y meteorológicas homogéneas²⁶ dentro del área de estudio. Asumiendo que el comportamiento del contaminante sigue una distribución Gaussiana.

Los modelos de pluma gaussiana utilizan una aproximación de "estado estable", que asume que, durante el paso de tiempo del modelo, las emisiones, la meteorología y otras entradas del modelo, son constantes en todo el dominio del modelo, lo que da como resultado una pluma resuelta con las emisiones distribuidas a lo largo de la pluma de acuerdo con una distribución gaussiana. Esta formulación permite que los modelos gaussianos estimen los impactos de campo cercano de un número limitado de fuentes a una resolución relativamente alta, con escalas temporales de una hora y escalas espaciales de metros. Sin embargo, esta formulación permite solo contaminantes relativamente inertes, con consideraciones muy limitadas de transformación y eliminación, y limita aún más el dominio para el que se puede utilizar el modelo. Por lo tanto, los modelos gaussianos pueden no ser apropiados si las entradas del modelo están cambiando bruscamente durante el paso de tiempo del modelo o dentro del dominio del modelo deseado, o si se necesitan consideraciones químicas más avanzadas.

- **Modelo Gaussiano recomendado**

AERMOD

Fue elaborado por el Comité de Mejora del Modelo Regulatorio de la Agencia de Protección Ambiental y la Sociedad Meteorológica Americana (AERMOD, por sus siglas en inglés). Es un modelo de dispersión de estado estacionario diseñado para modelar la dispersión de corto alcance (hasta 50 kilómetros) de las emisiones de contaminantes atmosféricos, en terrenos simples y complejos (US-EPA, 2017). Entendiéndose como terrenos simples a aquellas áreas donde los receptores²⁷ (centros poblados, colegios, hospitales, entre otros) se encuentran por debajo de la altura de donde se liberan los contaminantes de la fuente de emisión y como terrenos

²⁶ Condiciones meteorológicas homogéneas: Se refiere a la poca variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.

²⁷ Receptores: Ubicación de zonas de interés donde se requiere evaluar las concentraciones de contaminantes producto de la pluma de dispersión generadas por las fuentes de emisión.

complejos a aquellas áreas donde los receptores se encuentran por encima de la altura indicada.

- **Modelos Eulerianos**

Los modelos Eulerianos usan un sistema fijo en el espacio para determinar las concentraciones de los contaminantes. Existen distintos grados de complejidad en estos modelos, que van de una representación simple de la dispersión, hasta modelos que incluyen procesos fotoquímicos y de aerosoles (Wark & Warner, 1990).

Los modelos de cuadrícula fotoquímicos son modelos eulerianos tridimensionales basados en cuadrículas que tratan los procesos químicos y físicos en cada celda de la cuadrícula y utilizan procesos de difusión y transporte para mover especies químicas entre celdas de la cuadrícula. Los modelos eulerianos asumen que las emisiones se distribuyen uniformemente a lo largo de cada celda de la cuadrícula del modelo. A resoluciones de cuadrícula gruesas, los modelos eulerianos tienen dificultades con la resolución de escala fina de plumas individuales. Sin embargo, estos tipos de modelos se pueden aplicar adecuadamente para la evaluación de los impactos de contaminantes reactivos a escala regional y de campo cercano de fuentes específicas o todas las fuentes. Los modelos de cuadrícula fotoquímica simulan un entorno más realista para la transformación química, pero las simulaciones pueden requerir más recursos que los modelos de penacho lagrangiano o gaussiano.

- **Modelo Euleriano recomendado**

CMAQ

El modelo de Calidad del Aire Comunitario de Multiescala (CMAQ, por sus siglas en inglés), es un modelo fotoquímico Euleriano que permite simular el smog fotoquímico, la dispersión atmosférica de gases, el material particulado, así como la deposición seca y húmeda de los contaminantes en escalas que varían desde la urbana a la regional. Por sus características este modelo puede solucionar condiciones de terrenos simples y complejos, así como condiciones meteorológicas homogéneas y heterogéneas.

- **Modelos Lagrangianos**

Los modelos lagrangianos determinan la concentración de contaminantes en un volumen de aire que varía verticalmente y que se desplaza horizontalmente según una trayectoria en función del viento (Wark & Warner, 1990). Estos modelos permiten representar condiciones meteorológicas homogéneas y heterogéneas.

Los modelos lagrangianos, por otro lado, son de estado no estacionario y asumen que las condiciones de entrada del modelo están cambiando en el dominio del modelo y el paso de tiempo del modelo. Los modelos lagrangianos también se pueden utilizar para determinar los impactos de campo cercano y lejano a partir de un número limitado de fuentes. Tradicionalmente, los modelos lagrangianos se han utilizado para contaminantes relativamente inertes, con consideraciones de eliminación un poco más complejas que los modelos gaussianos. Algunos modelos lagrangianos tratan la química de partículas y gases en la columna. Sin embargo, estos modelos requieren campos de concentración de oxidantes variables en el

tiempo y el espacio y, en el caso de partículas finas ($PM_{2.5}$), agentes neutralizantes, como el amoníaco. Los campos de fondo confiables son críticos para aplicaciones que involucran la formación de contaminantes secundarios porque los impactos secundarios generalmente ocurren cuando los precursores en la pluma se mezclan y reaccionan con especies en la atmósfera de fondo. Estos agentes oxidantes y neutralizantes no se miden de forma rutinaria, pero se pueden generar con un modelo de cuadrícula fotoquímica tridimensional.

- **Modelo Lagrangiano recomendado**

AUSTAL

Este modelo simula la dispersión de contaminantes atmosféricos mediante un proceso de caminata aleatoria (modelo de simulación Lagrangiano) y posee algoritmos que consideran los efectos de terrenos complejos, la nubosidad y las reacciones químicas de primer orden.

- **Modelos del tipo “puff”**

Los modelos tipo “puff” son una combinación entre los modelos Gaussianos y los modelos Lagrangianos, en el sentido de que esencialmente calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea llamada “puff”, a lo largo de una trayectoria. En este tipo de modelos las emisiones experimentan procesos de transformación química al mismo tiempo que se van desplazando a través de un campo meteorológico tridimensional (Zuk et.al, 2006).

- **Modelo del tipo puff recomendado**

CALPUFF:

Modelo Puff de California (CALPUFF, por sus siglas en inglés), es un modelo que contiene algoritmos para simular los efectos del terreno sobre los procesos de dispersión y remoción de los contaminantes. Las características del modelo permiten tratar al mismo tiempo las fuentes puntuales y de área en dominios de modelado que varían desde metros a cientos de kilómetros. Este modelo también permite estimar las concentraciones de los contaminantes con resoluciones temporales que varían de una hora a un año promedio.

APÉNDICE 20: VENTAJAS Y LIMITACIONES EN EL USO DE LOS MDCA

Históricamente, la evaluación de la calidad del aire se ha basado en datos de monitoreo de contaminantes del aire, estos datos son considerados lo más cercanos a la realidad; a menudo se considera que las simulaciones generadas por los MDCA tienen mayor grado de incertidumbre que el monitoreo.

A continuación, se presentan las ventajas y limitaciones en el uso de los MDCA (Ministry for the Environment, 2004; EEA, 2011):

a) Ventajas del uso de los MDCA

- El modelamiento puede proporcionar potencialmente información de un espacio completo del área en estudio, mientras que la cobertura espacial de un monitoreo suele ser limitado.
- El modelamiento se puede aplicar para el pronóstico, se puede usar para predecir la calidad del aire como resultado de cambios en las emisiones de contaminantes y/o de las condiciones meteorológicas.
- El modelamiento proporciona una mejor comprensión de las fuentes, causas y procesos que determinan la calidad del aire.
- Los modelos pueden proporcionar una evaluación dentro de las zonas en las que no se puede realizar un monitoreo.
- El modelamiento genera ahorro de costos, el número de lugares de monitoreo se puede reducir potencialmente.

b) Limitaciones del uso de los MDCA

- Los modelos requieren datos de entrada extensos, particularmente de un inventario de emisiones y de variables meteorológicas, que no siempre son confiables o fáciles de adquirir.
- Los modelos tienen limitaciones en sus resultados y se requiere de una validación para su aplicación.
- La aplicación de los modelos requiere de usuarios con experiencia y conocimiento en el área del modelamiento numérico.

APÉNDICE 21: CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN MDCA

Zuk et al. (2006) mencionan que para la selección y utilización de un MDCA se tiene que considerar, al menos, los siguientes aspectos:

a) El problema a resolver:

Depende si se analizará la dispersión de un contaminante primario (contaminantes que se generan en la fuente) y/o contaminante secundario (contaminantes que son producto de las reacciones física y químicas de los contaminantes primarios en la atmósfera); si el contaminante es reactivo o no reactivo; si se estudiará las emisiones de una o varias fuentes; las características del terreno, información disponible (datos de estaciones meteorológicas, datos de monitoreos de calidad del aire); entre otros.

b) La extensión del dominio de modelamiento:

Se debe de considerar la ubicación de la o las fuentes de emisión, la presencia de receptores de discretos a ser evaluados y la distancia que alcanzaría la pluma de dispersión.

c) Las características del terreno y las condiciones meteorológicas del dominio de modelamiento:

En este sentido es fundamental analizar las características del terreno (la topografía y los usos de suelos) y de las condiciones meteorológicas (homogéneas o heterogéneas).

d) Los recursos técnicos y recursos humanos disponibles:

Estas consideraciones prácticas incluyen las características del equipo de cómputo (alta o baja capacidad de memoria y procesamiento), y la experiencia del personal, tanto en aplicación de modelos, como en el procesamiento de los datos que se utilizan como insumos para los modelos y en la interpretación de los resultados de la simulación.

e) El detalle y la calidad de las bases de datos disponibles (insumos):

Es indispensable analizar el tipo de insumos con que se cuenta, como son la confiabilidad, el grado de detalle y la precisión de la información de las condiciones meteorológicas, características del terreno y las emisiones de contaminantes (para una sola fuente o para una región completa).

En la figura N° 2 se muestra un esquema del resumen de las etapas de selección, ejecución y evaluación de la aplicación de un MDCA.

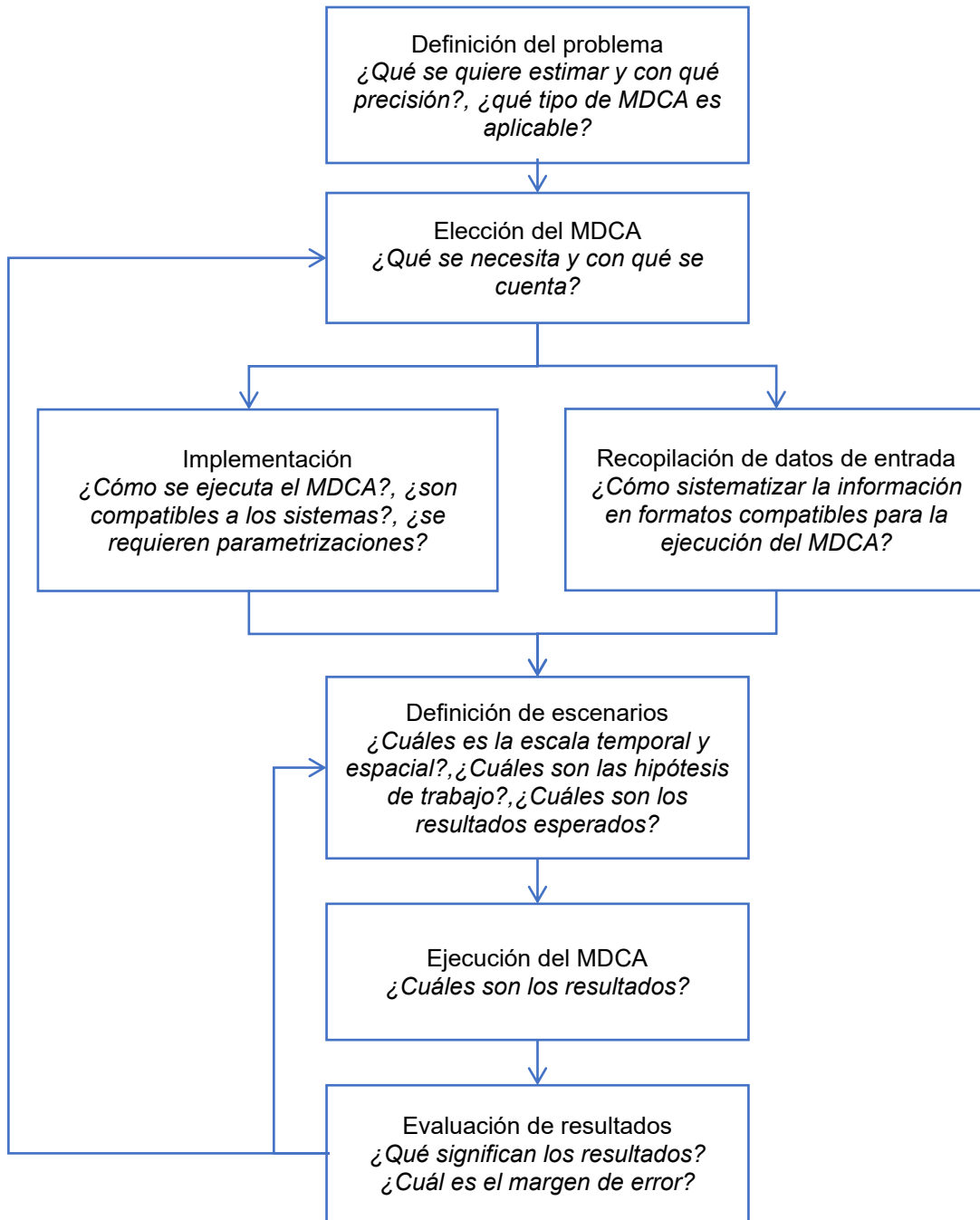


Figura N°2. Esquema de aplicación de un MDCA
Fuente: Adaptado de Morales (2006)

APÉNDICE 22: DATOS DE ENTRADA DE UN MDCA

Fuentes de emisión

Las emisiones son aquellas sustancias que se liberan a la atmósfera, las cuales pueden ser de origen natural o resultantes de actividades humanas (INECC, 2007). Asimismo, las fuentes de emisión se pueden clasificar de la siguiente manera (AEP, 2020; EPA, 2023):

Fuentes fijas:

Son fuentes de emisión situadas en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca de manera dispersa. A su vez las fuentes fijas pueden ser:

- a) Fuentes puntuales: Emiten contaminantes a la atmósfera por ductos o chimeneas.
- b) Fuentes de área: Emiten contaminantes en sobre un área determinada.
- c) Fuentes de volumen: Es una fuente de área con una tercera dimensión (altura), por ejemplo, emisiones de polvo, pilas de carbón, entre otros.
- d) Fuentes dispersas o difusas: Son aquellas donde los focos de emisión se dispersan en un área. Por ejemplo, las quemas abiertas controladas.

Fuentes móviles:

Son las fuentes que, por razón de uso o propósito, son susceptibles a desplazarse, como por ejemplo los vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Fuentes fugitivas:

La EPA define a las emisiones fugitivas como “aquellas emisiones que razonablemente no podrían pasar a través de una chimenea, respiradero u otra abertura funcionalmente equivalente”. De esta manera se consideran como emisiones fugitivas a las fugas y los derrames, que obedecen más a la rotura o imperfección de sellos, tuberías o conexiones utilizados en los equipos para el transporte de fluidos, y que ocurren por el desgaste y la falta de mantenimiento. Por lo tanto, las emisiones fugitivas pueden provenir de fuentes fijas o móviles.

Datos meteorológicos

Fuente de datos meteorológicos

Existen dos tipos de fuentes de datos meteorológicos: los observados por las estaciones meteorológicas automáticas y los simulados por modelos meteorológicos. Los datos meteorológicos necesarios para la modelación deben de ser de la superficie y en altura. Debido a la limitada disponibilidad de datos meteorológicos observados en altura se recomienda el uso de modelos meteorológicos para suplir esta información faltante.

El modelo recomendado para la generación de datos meteorológicos modelados es el conocido como “Pronóstico e Investigación del Tiempo” (WRF por sus siglas en inglés)

desarrollado por el NCAR²⁸ y la NOAA²⁹ de los Estados Unidos. Asimismo, es importante precisar que, para los DTM que tengan el propósito de incluirlos en un IGA, se debe utilizar una resolución espacial de mínimo un 1km y una resolución temporal de 1 hora. Para el caso de estudios e investigaciones, el usuario debe determinar la resolución espacial y temporal según sus objetivos planteados.

A continuación, se presentan algunos criterios para el uso de información meteorológica en los modelos Gaussianos, tipo “puff” y Eulerianos:

a) Criterios para el uso de información meteorológica en Modelos Gaussianos

Los modelos Gaussianos requieren de datos meteorológicos de superficie y de altura. Estos datos deben provenir de una estación cuya ubicación debe estar en la misma fuente de emisión o debe provenir de otra estación que no esté a más de 5 kilómetros de distancia de la misma. Sin embargo, en el caso de no contarse con datos observados, se pueden utilizar alternativamente datos generados por modelos meteorológicos.

b) Criterios para el uso de datos meteorológicos en Modelos “puff” y Eulerianos

Schmitz et al. (2011) mencionan que en el caso de los modelos tipo “puff” y Eulerianos, si bien son capaces de representar la meteorología heterogénea en el dominio de modelamiento, no tienen un desempeño superior al modelo Gaussiano si se utiliza información meteorológica de una sola estación. Es por ello que, estos modelos deben utilizar preferiblemente más de dos estaciones meteorológicas con datos observados y/o datos provenientes de un modelo meteorológico.

Características del terreno: topografía y uso de suelos

Los modelos requieren incorporar las características del terreno, a través de archivos con información topográfica y de los tipos de usos de suelo. La información topográfica (modelos de elevación digital) debe tener una resolución espacial mínima de 90 metros y la información de uso de suelos debe tener una resolución espacial mínima de 540 metros.

Otras variables necesarias para algunos modelos son: Albedo, rugosidad superficial, índice de área foliar y razón de Bowen. Estas variables no existen en la base de datos de Perú, por lo que se recomienda usar tablas que proveen los modelos y que asocian estas variables a los tipos de uso de suelos dentro del dominio de modelamiento.

²⁸ National Center for Atmospheric Research

²⁹ National Oceanic and Atmospheric Administration

APÉNDICE 23: RECOMENDACIONES PARA APLICAR UN MDCA

Las siguientes recomendaciones están basadas en las guías de buenas prácticas para uso de los MDCA de la US-EPA y EAA:

Recomendación 1:

Para obtener los mejores resultados posibles, el modelador debe:

- a) Elegir el modelo más apropiado para el propósito previsto, y
- b) Justificar esta elección en la metodología de estudio.

Recomendación 2:

Los siguientes criterios deben usarse para decidir si se usa un modelo gaussiano:

- a) ¿Estás buscando impactos cercanos o lejanos de la/s fuente/s de emisión?

El alcance de los modelos gaussianos como el AERMOD, es de 50 km, sin embargo, el alcance o su uso, va a depender de las características del terreno del área de estudio, la variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas de esta y del tipo de contaminante que queremos modelar (primario o secundario).

- b) ¿Son importantes los problemas de causalidad (es decir, el tiempo que tardan los contaminantes en viajar del punto A al punto B)?

Los modelos gaussianos no toman en cuenta el tiempo que los contaminantes viajan de un punto a otro.

- c) ¿Es probable que la deposición húmeda o seca de contaminantes sea un problema?

CALPUFF presenta los algoritmos para modelar deposición seca y húmeda de gases y partículas, mientras que AERMOD solo presenta un algoritmo de coeficientes de reflexión bruto para estimar la deposición de partículas. Es recomendable utilizar un modelo avanzado como CALPUFF para omitir las limitaciones de modelos gaussianos como el AERMOD.

- d) ¿Desea considerar la química de óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x)?

Los modelos gaussianos tratan la química de SO_x y NO_x como una simple decadencia exponencial, pero no intentan abordar los mecanismos detallados de la química atmosférica. Alternativamente, pueden simular procesos químicos (por ejemplo, la producción de NO₂ a partir de NO_x), como un paso posterior al procesamiento. Los modelos avanzados (CALPUFF) pueden ocuparse de SO_x, NO_x y la química orgánica, química de fase acuosa y producción de aerosoles secundarios.

- e) ¿Es probable que ocurran eventos de estancamiento durante la noche?

Es poco probable que los modelos gaussianos modelen con precisión los eventos de estancamiento, por lo que es recomendable utilizar modelos avanzados como el CALPUFF.

Recomendación 3:

Los modelos gaussianos son generalmente aplicables cuando:

- a) Los contaminantes son químicamente inertes, es apropiado un mecanismo simple de primer orden, o la química puede llevarse a cabo como un paso posterior al procesamiento;
- b) La meteorología puede considerarse especialmente homogénea;
- c) Hay pocos periodos de vientos tranquilos o ligeros

Se necesita una elección cuidadosa del modelo gaussiano si es necesario simular los efectos de la deposición, la química o la fumigación.

Recomendación 4:

Los modelos avanzados deben usarse cuando:

- a) Las condiciones meteorológicas varían según el dominio de modelado y, por lo tanto, no son compatibles con un modelo de estado estacionario o gaussianos;
- b) Los contaminantes atmosféricos se acumulan en condiciones de calma o vuelven a circular cuando el viento cambia de dirección;
- c) Se experimenta periodos frecuentes de baja velocidad del viento o calma en el área de estudio;
- d) Las transformaciones químicas entre especies contaminantes son importantes;
- e) Los datos meteorológicos apropiados están disponibles para conducirlos;
- f) Se disponga de un archivo meteorológico de buena calidad;

Recomendación 5:

Al modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos de una fuente o varias fuentes de emisión ubicada/s cerca de la costa, se debe utilizar un modelo avanzado como el CALPUFF, pues los modelos gaussianos tienen limitaciones en este tipo de condiciones.

Recomendación 6:

Para modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos a escala regional:

- a) Utilizar modelos meteorológicos y sus modelos de dispersión asociados;
- b) Considerar la transformación de contaminantes debido a la química atmosférica.

Recomendación 7:

Utilizar datos de tasas de emisión variable cuando:

- a) Exista evidencia que muestre cuanto y con qué frecuencia la tasa de emisión variará a medida que cambian las condiciones operativas.

Cuando se utilice tasas de emisión variables, se debe tener en cuenta otros factores que también varían con las condiciones operativas, como la disminución de las velocidades y temperaturas de salida.

Recomendación 8:

El dominio de modelamiento debe ser delimitado mediante un polígono y este debe contener a los receptores discretos (por ejemplo, centros poblados, áreas residenciales, escuelas, hospitales, entre otros).

Recomendación 9:

Obtener y usar los datos de las características del terreno (topografía y uso de suelos), considerando lo siguiente:

- a) La información topográfica (modelos de elevación digital) debe tener una resolución espacial mínima de 90 metros y la información de usos de suelos deberá tener una resolución espacial mínima de 540 metros.

Recomendación 10:

Cuando use modelos gaussianos, debe utilizar:

- a) Curvas de dispersión Pasquill-Gifford para todas las fuentes, excepto aquellas con chimeneas muy altas;
- b) Curvas de dispersión Briggs-Rural para chimeneas de más de 100 metros;
- c) El mismo tipo de coeficiente de dispersión vertical que el seleccionado para las ecuaciones horizontales.

Cuando use modelos avanzados, se debe considerar los esquemas de turbulencia y dispersión disponibles, y debe usar la opción que:

- a) Haga el mejor uso de los datos meteorológicos disponibles (por ejemplo, parámetros de turbulencia medidos).

IX. GLOSARIO

- 1) **Área de estudio:** También denominada como área de actuación o área de levantamiento de información de línea base. Es el área donde se llevará a cabo los estudios de caracterización que conforman la línea base.
- 2) **Calmas:** Ausencia de movimiento del aire o viento con velocidad inferior a un nudo (OMM, 1992).
- 3) **Características de terreno:** Se refiere a la topografía y el uso de suelo del dominio de modelamiento.
- 4) **Centroide:** Se refiere a la ubicación del centro geométrico de un cuerpo (Meriam y Kraige, 1999).
- 5) **Condiciones meteorológicas heterogéneas:** Se refiere a la gran variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.
- 6) **Condiciones meteorológicas homogéneas:** Se refiere a la poca variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.
- 7) **Datos meteorológicos modelados:** Datos meteorológicos modelados, son aquellos que se generan mediante el uso de modelos numéricos dentro de un sistema informático, también se considerará como datos meteorológicos modelados a aquellos que provengan de plataformas de reanálisis.
- 8) **Datos meteorológicos observados:** Datos meteorológicos observados, son aquellos que se generan en estaciones meteorológicas automáticas.
- 9) **Dominio de modelamiento:** Se define como el área geográfica para la cual se realizan los análisis de calidad de aire requeridos para su regulación (US-EPA, 2017). Este dominio se determina en función de las fuentes de emisión, así como de la presencia de receptores de discretos susceptibles de ser afectados. Asimismo, dicho dominio puede requerir ser ajustado (ampliado) en relación a los resultados de una modelación preliminar, para encontrar el punto máximo del impacto. El dominio elegido debe abarcar un área de influencia tal que dentro de este se encuentre los receptores de discretos que serán afectados por la dispersión de los contaminantes atmosféricos.
- 10) **Isoconcentraciones:** Representación gráfica de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos mediante curvas de nivel.
- 11) **La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA):** La US-EPA desde 1970 ha desarrollado una gran variedad de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos de diferente complejidad, usados con fines regulatorios. Estos modelos de la US-EPA están a la vanguardia del desarrollo científico y tecnológico, siendo estos ampliamente reconocidos y utilizados a nivel mundial.
- 12) **Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos (MDCA):** Los MDCA para fines regulatorios, constituyen todos los modelos que son utilizados para evaluar los impactos al ambiente por las emisiones producto de las actividades de empresas.
- 13) **Modelo meteorológico:** Es una representación matemática del comportamiento de las condiciones meteorológicas para un área determinada, a través de un sistema informático.
- 14) **Receptor discreto:** Ubicación de zona donde se requiere evaluar las concentraciones de contaminantes producto de la pluma de dispersión generadas por una o varias fuentes de emisión. Se ha cambiado en el Manual Técnico la denominación de "receptores de interés" por "receptores discretos". Los receptores discretos son aquellos lugares donde es importante evaluar el comportamiento de la concentración de contaminantes, dependiendo de la naturaleza del Documento Técnico, un receptor

discreto, también puede ser, por ejemplo, una estación de monitoreo, una zona de conservación, un cuerpo de agua, entre otros.