



**RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA EJECUTIVA
N° 053-2021-SENAMHI/PREJ**

Lima, 29 de octubre de 2021

VISTOS:

El Memorando N° D000618-2021-SENAMHI-DMA de fecha 29 de octubre de 2021, de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, y el Memorando N° D000380-2021-SENAMHI-OPP de fecha 29 de octubre de 2021, de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, y;

CONSIDERANDO:

Que, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, es un Organismo Público Ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente, con personería jurídica de derecho público interno y autonomía técnica, administrativa y económica, dentro de los límites del ordenamiento legal del Sector Público;

Que, la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental, proteger el ambiente, y sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país;

Que, de conformidad con lo dispuesto en los literales j) y n), del artículo 4 de la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, de acuerdo a su competencia técnica especializada, es la entidad encargada de otorgar conformidad a la información meteorológica e hidrológica, que sea utilizada en el país para la elaboración de proyectos, ejecución de obras u otras actividades que se relacionen con la investigación, el comercio, la industria u otros fines productivos o no, los cuales requerirán de dicha autorización expresamente; asimismo, el SENAMHI queda encargado de organizar, normar y promover un sistema de vigilancia atmosférica del país, a fin de preservar los peligros de la contaminación ambiental;

Que, el numeral 3, del literal a, del artículo 4 del Reglamento de la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, aprobado mediante Decreto Supremo N° 005-85-AE, señala que son objetivos del SENAMHI, la preservación del medio ambiente atmosférico mediante una vigilancia permanente de las condiciones meteorológicas que pueda favorecer la contaminación general de aire, detectando cualquier cambio en la composición de la atmósfera y sus posibles efectos sobre el clima;

Que, por su parte, el literal b, del artículo 5 del referido dispositivo legal, que fuera modificado mediante Decreto Supremo N° 027-2021-MINAM, precisa que es función del SENAMHI, *“Planificar, dirigir, coordinar, ejecutar y evaluar los estudios e investigaciones de carácter meteorológico, sus diversas manifestaciones y aplicaciones en la superficie terrestre, capas subyacentes y la atmósfera, incluidos los procesos de modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos”*;

Que, mediante el artículo 2 del Decreto Supremo N° 027-2021-MINAM, se aprueba el servicio que el SENAMHI se encuentra facultado a prestar en exclusividad denominado “Evaluación de documentos técnicos sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos”, a través del cual los administrados podrán obtener un Informe con la conformidad de la información

meteorológica y de los procesos del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, para la elaboración de estudios relacionados a actividades de investigación, comercio, industria u otros fines productivos o no, con la finalidad de determinar que el impacto de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la calidad del aire no represente un riesgo para la salud y el ambiente;

Que, sobre el particular, el artículo 4 del citado Decreto Supremo, establece las condiciones y requisitos para solicitar el servicio prestado en exclusividad, señalando que el Documento Técnico sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, debe seguir los lineamientos establecidos en el Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos del SENAMHI;

Que, mediante Resolución de Presidencia Ejecutiva N° 048-2021-SENAMHI/PREJ de fecha 1 de octubre de 2021, se dispuso la prepublicación del Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, por un plazo de quince (15) días calendarios contados a partir de la fecha de publicación, a fin de conocer las opiniones y/o sugerencias de los interesados;

Que, en este contexto, mediante Memorando N° D000618-2021-SENAMHI-DMA de fecha 29 de octubre de 2021, la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, traslada la Nota de Elevación N° D000251-2021-SENAMHI-SEA, y los Informes Técnicos N° D000031-2021-SENAMHI-SEA-EMD y N° D000006-2021-SENAMHI-SEA-FUL, de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico, a través del cual informan que se realizó la inclusión de comentarios y sugerencias al Manual Técnico que fuera prepublicado a través de la Resolución de Presidencia Ejecutiva N° 048-2021-SENAMHI/PREJ; por lo cual, remiten la propuesta de Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, para su aprobación correspondiente;

Que, con Memorando N° D000380-2021-SENAMHI-OPP de fecha 29 de octubre de 2021, la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, remite el Informe N° D000058-2021-SENAMHI-UM, de la Unidad de Modernización y Gestión de la Calidad, mediante el cual recomienda la aprobación de la propuesta de Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos;

Que, el literal f) del artículo 11 del Reglamento de Organización y Funciones del SENAMHI, aprobado mediante Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM, señala que es función de la Presidencia Ejecutiva expedir Resoluciones Presidenciales Ejecutivas en el ámbito de su competencia;

Que, teniendo en consideración las normas citadas, resulta necesario emitir la Resolución correspondiente que dispone la aprobación del Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos;

Con el visado del Gerente General, de la Directora de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, y del Director de la Oficina de Asesoría Jurídica; y,

De conformidad con la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, modificada por la Ley N° 27188; su Reglamento aprobado mediante Decreto Supremo N° 005-85-AE; el Reglamento de Organización y Funciones, aprobado mediante Decreto Supremo N° 003-2016-MINAM; y el Decreto Supremo N° 027-2021-MINAM, que modifica el Reglamento de la Ley N° 24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, aprobado mediante Decreto Supremo N° 005-85-AE, y aprueba servicio prestado en exclusividad por el SENAMHI.

SE RESUELVE:

Artículo 1.- Aprobar el Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, el mismo que forma parte integrante de la presente Resolución.

Artículo 2.- Disponer la publicación de la Presente Resolución en el Portal Web Institucional del SENAMHI (www.senamhi.gob.pe).

Regístrese y comuníquese

KEN TAKAHASHI GUEVARA
Presidente Ejecutivo
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
del Perú – SENAMHI



MANUAL TÉCNICO PARA LA ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Versión: 01

**SUBDIRECCIÓN DE EVALUACIÓN DEL AMBIENTE
ATMOSFÉRICO - DIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA Y
EVALUACIÓN AMBIENTAL ATMOSFÉRICA**

	MANUAL TÉCNICO		Página	2 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	4
II.	OBJETIVO	6
III.	ALCANCE	6
IV.	BASE LEGAL	6
V.	ESTRUCTURA DE UN DTM	7
VI.	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DE UN DTM	8
6.1	Introducción	8
6.2	Objetivos	8
6.3	Antecedentes	8
6.4	Descripción del área de estudio	9
6.4.1	Ubicación política y geográfica del área de estudio	9
6.4.2	Descripción de la actividad antropogénica o fenómeno natural que genera o generará emisiones en el área de estudio	10
6.5	Características del terreno	10
6.6	Climatología del área de estudio	11
6.6.1	Información de los datos meteorológicos	11
6.6.2	Clasificación climática	12
6.6.3	Tiempo y clima	12
6.7	Calidad del aire	15
6.7.1	Monitoreo de calidad del aire	15
6.7.2	Nivel de fondo	16
6.8	Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	17
6.8.1	Justificación del modelo utilizado	17
6.8.2	Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos.....	18
6.9	Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	18
6.9.1	Dominio de modelamiento.....	18
6.9.2	Periodo de modelamiento	18
6.9.3	Inventario de emisiones	18
6.9.4	Receptores discretos.....	20
6.9.5	Normas y criterios ambientales	20
6.9.6	Escenarios del modelamiento	21
6.9.7	Resultados	23
6.9.8	Validación.....	25
6.10	Conclusiones	25
6.11	Recomendaciones	25
6.12	Referencias Bibliográficas.....	26
6.13	Anexos	26
6.13.1	Anexo 1.....	26
6.13.2	Anexo 2 (opcional, en el caso que se hayan utilizado datos meteorológicos modelados) .	26

	MANUAL TÉCNICO	Página	3 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

6.13.3	Anexo 3 Inventario de emisiones	26
6.13.4	Anexo 4 (según el/los escenarios/s de modelamiento realizado/s en el DTM)	26
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
VIII.	APÉNDICES.....	33
IX.	GLOSARIO	69

	MANUAL TÉCNICO	Página	4 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 (SO_2), material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10}), ozono (O_3), entre otros^{1,2,3}. Ahora bien, existen diversas actividades antrópicas que podrían ser perjudiciales para la calidad del aire, tales como la quema en la industria de la caña de azúcar, minería, incendios prescritos, el transporte, hidrocarburos, electricidad, así como también, fenómenos naturales, como las erupciones volcánicas, intrusión de sales marinas, erosión y resuspensión de suelos, entre otros. 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 2020 el 51.1% 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 ocasionada por 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

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 PM_{10}), 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/>

	MANUAL TÉCNICO		Página	5 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

finalidad es representar el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes del aire para una zona y periodo determinado.

En este contexto, mediante Decreto Supremo N°027-2021-MINAM, se aprueba el servicio prestado en exclusividad denominado “Evaluación de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos”, que el SENAMHI se encuentra facultado a prestar. Asimismo, en el referido dispositivo legal, se establecen las condiciones y requisitos para que cualquier persona natural o jurídica (en adelante usuarios) pueda solicitar el indicado servicio.

Por ende, y en el marco de lo dispuesto en el dispositivo legal referido anteriormente, el SENAMHI pone a disposición de los usuarios el presente Manual Técnico para la elaboración de un DTM.

	MANUAL TÉCNICO		Página	6 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

II. OBJETIVO

Orientar a los usuarios en la elaboración de un DTM, en el marco del servicio denominado “Evaluación de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos”.

III. ALCANCE

Está dirigido a usuarios que elaboran un DTM para propósitos de investigación, estudios o para incluirlos en un Instrumento de Gestión Ambiental (IGA).

IV. BASE LEGAL

El presente manual técnico, se encuentra enmarcado 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, modificado por la Ley N°27188.
- 4.3 Decreto Supremo N°005-85-AE, que aprueba el Reglamento de la Ley N°24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- 4.4 Decreto Supremo N°003-2016-MINAM, que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del SENAMHI.
- 4.5 Decreto Supremo N°003-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias.
- 4.6 Decreto Supremo N°010-2019-MINAM, que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.
- 4.7 Decreto Supremo N°023-2021-MINAM, que aprueba la Política Nacional del Ambiente al 2030.
- 4.8 Decreto Supremo N°027-2021-MINAM, que modifica el Reglamento de la Ley N°24031, Ley del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, aprobado mediante Decreto Supremo N°005-85-AE, y aprueba servicio prestado en exclusividad por el SENAMHI.
- 4.9 Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.
- 4.10 Decreto Legislativo N° 1078, Modificatoria de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.
- 4.11 Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.

	MANUAL TÉCNICO	Página	7 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

V. ESTRUCTURA DE UN DTM

El DTM puede ser elaborado con diferentes propósitos (de acuerdo al alcance del presente manual técnico), independientemente de formato final que tendrá el mismo, para efectos del servicio prestado en exclusividad aprobado mediante Decreto Supremo N°027-2021-MINAM, se deberá presentar la información ordenada de acuerdo a la estructura que se muestra en el Apéndice 1 y según el contenido mínimo que se indica en cada capítulo del presente manual técnico.

	MANUAL TÉCNICO	Página	8 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 previos relacionados a la calidad del aire del área de estudio (de existir información disponible);
- Las características de los datos meteorológicos y de la información sobre las características del terreno (topografía y uso de suelos), que fueron usados como entrada al Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos (MDCA);
- Una descripción del MDCA (indicando la versión);
- Una descripción de los monitoreos de calidad del aire.

Un ejemplo de como elaborar la introducción del DTM se muestra en el Apéndice 2.

6.2 Objetivos

Debe indicar los objetivos del DTM según su finalidad, tales como, investigación, estudio u otros.

Un ejemplo de como elaborar los objetivos de un DTM se muestra en el Apéndice 3.

6.3 Antecedentes

Debe describir:

- Los antecedentes que generaron la necesidad de realizar el DTM;

	MANUAL TÉCNICO		Página	9 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

- Estudios previos relacionados a la calidad del aire del área de estudio (de existir información);
- Diagnósticos, línea base y/o monitoreos de calidad del aire en el área de estudio elaborados por el usuario o por terceros.
- Otras fuentes de información relacionadas al DTM, siempre y cuando existiera, para lo cual deberá citarse dicha información.

Un ejemplo de como elaborar los antecedentes de un DTM se muestra en el Apéndice 4.

6.4 Descripción del área de estudio

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 deberá 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°1. Ubicación geográfica del área de estudio

ID	Coordenada Geográfica		Altitud (ms.n.m)
	Latitud	Longitud	

- Presentar un mapa base del área de estudio, en el cual se incluirá como mínimo vías de acceso, cuerpos de agua, centros poblados, Áreas Naturales Protegidas y/o Zonas Arqueológicas, Zonas de Amortiguamiento y los componentes del Proyecto principales y auxiliares, incidiendo principalmente en las fuentes de emisión que generará el Proyecto. La inclusión de estas capas dependerá de la disponibilidad de la información. Asimismo, es importante aclarar

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

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	10 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

que toda información complementaria que se utilice en los DTM, debe provenir de fuentes confiables y acreditadas.

- El mapa base debe presentarse en el Anexo 1 del DTM; asimismo, debe cumplir con las características mínimas solicitadas en el Apéndice 5 del presente manual técnico.

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

Se debe:

- Realizar una descripción detallada de la actividad antropogénica (si forma parte de un IGA deberá ser estrictamente la misma descripción presentada en el IGA) 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 indicará, 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, entre otros.

6.5 Características del terreno

Se debe:

- Describir detalladamente la información de los archivos sobre 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°2. 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 usos de suelos en el Anexo 1 del DTM, para lo cual se deberá seguir los requerimientos mínimos indicados en el Apéndice 5 del presente manual técnico.

6.6 Climatología del área de estudio

6.6.1 Información de los datos meteorológicos

Se debe:

- Indicar si los datos meteorológicos utilizados como entrada en el modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos 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, ha visto por conveniente 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. El sustento y presiones técnicas del periodo mínimo de los datos meteorológicos es descrito en el Apéndice 6 del presente manual técnico.
- En el caso de usar datos meteorológicos observados, será 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 deberá 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.

Cuadro N° 3. Información de la/s estación/es meteorológicas automáticas

N	Nombre de la estación	Coordenadas Geográficas		Altitud (ms.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 deberá presentar un mapa de ubicación de la/s estación/es meteorológica/s automática/s. El mapa debe presentarse en el Anexo 1 del DTM según las características mínimas solicitadas en el Apéndice 5 del presente manual técnico.
- En el caso de usar datos meteorológicos modelados, se debe indicar el nombre, versión, la resolución espacial y temporal del modelo

meteorológico utilizado, dicha información deberá ser consignada en un Cuadro e incluirlo en el DTM, tal como se indica a continuación:

Cuadro N° 4. Información del modelo meteorológico

Nombre del modelo meteorológico	Versión	Resolución espacial	Resolución temporal

- Se debe adjuntar la información sobre las parametrizaciones físicas del modelo meteorológico utilizado en el Anexo 2 del DTM.

6.6.2 Clasificación climática

Se debe indicar la clasificación climática del área de estudio, según el Mapa Climático del Perú⁷ actualizado por el SENAMHI.

6.6.3 Tiempo y clima

En el DTM es imprescindible comprender las condiciones meteorológicas que caracterizan el área de estudio (Rincón, 2012; De Visscher, 2014). Para lo cual, se usarán los datos meteorológicos descritos en el ítem 6.6.1. Asimismo, se han considerado las variables de Temperatura del aire, Precipitación, Humedad Relativa y Vientos (dirección y velocidad) como las mínimas para hacer analizadas en los DTM, sin embargo, el usuario puede incluir un análisis de nubosidad, de Radiación Global y/o de datos meteorológicos de altura (como la altura de la capa de mezcla, entre otros) 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).

⁷ <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

	MANUAL TÉCNICO	Página	13 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- 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 aún cuerpo de agua, entre otros. La determinación de esta puede 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 puede 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 representatividad 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).
- 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.

6.6.3.1 Temperatura del aire (°C)

Se debe elaborar:

- Un gráfico de series temporales de la variabilidad de la temperatura máxima promedio horario y mínima promedio horario de todo el periodo de datos meteorológicos, la cual se indicará como una Figura en el DTM. La temperatura máxima y mínima promedio horaria, es la máxima y mínima temperatura promedio entre las 0-23 horas.
- 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	14 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

6.6.3.2 Precipitación (mm).

Se debe elaborar:

- Un gráfico de series temporales de la variabilidad diaria de la precipitación de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará 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 indicará como una Figura en el DTM.

6.6.3.3 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 indicará 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 indicará como una Figura en el DTM.

6.6.3.4 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 indicará 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 indicará 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	15 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- Un gráfico de rosa de vientos para todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como una Figura en el DTM.

6.6.3.5 Radiación Global (W/m^2 o $KW/m^2 \times DIA$)-(opcional)

Se debe elaborar:

- Un gráfico que debe contener el ciclo horario promedio de la Radiación Global (W/m^2) de cada año del periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como una Figura en el DTM.
- Un gráfico de series temporales de la variabilidad diaria de la Radiación Global ($KW/m^2 \times DIA$) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como una Figura en el DTM.

6.7 Calidad del aire

6.7.1 Monitoreo de calidad del aire

En este ítem, se deberá 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 podrá 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.

Para el caso de proyectos de inversión que se enmarcan al Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental, los parámetros a modelar están sujetos a lo requerido por la entidad evaluadora del Instrumento de Gestión Ambiental, además, estos contaminantes se deben seleccionar analizando las características de las emisiones atmosféricas en cada una de las etapas del proyecto (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 deberán ser definidos de acuerdo a los criterios técnicos estipulados en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.

	MANUAL TÉCNICO	Página	16 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 deberá 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 DTM, cumpliendo con las características mínimas descritas en el Apéndice 5 del presente manual técnico.

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. Sin embargo, para el caso de DTM con otros propósitos, se puede utilizar siempre y cuando estos hayan pasado por un proceso de Intercomparación cumpliendo los lineamientos del Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad Ambiental del Aire.

6.7.2 Nivel de fondo

En función de los parámetros de calidad del aire que se van a monitorear y modelar (indicado en el ítem 6.7.1), se deberá 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 será modelado en el área de estudio, caso contrario se deberá sustentar técnicamente su estimación. Por ejemplo, se podría 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 serán consignadas en un Cuadro dentro del DTM.

Cuadro N°5. Concentraciones de fondo en el área de estudio

Contaminante	Periodo de monitoreo	Latitud	Longitud	Altitud (ms.n.m)	Concentración (µg/m³)

Para el caso de la estimación de las concentraciones de fondo se podrá 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.

6.8 Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

6.8.1 Justificación del modelo utilizado

Se debe:

- Indicar claramente el MDCA utilizado y su versión. Asimismo, es importante precisar que, para DTM que tengan el propósito de incluirlos en un Instrumento de Gestión Ambiental, 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	18 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- Justificar la elección del MDCA, considerando los criterios y recomendaciones indicados en los Apéndices 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 del presente manual técnico.

6.8.2 Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

Se debe:

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

6.9 Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos

6.9.1 Dominio de modelamiento

Se debe:

- Delimitar mediante un polígono el dominio de modelamiento e incluirlo en los mapas de isoconcentraciones que se generará posteriormente.

6.9.2 Periodo de modelamiento

Se debe indicar:

- El periodo de modelamiento en el que se elaborará el DTM será igual al periodo de datos meteorológicos utilizados como entrada al MDCA.

6.9.3 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 9 del presente manual técnico. En el caso de las fuentes de emisión del tipo área, volumen o lineales, se debe consignar un punto referencial. El formato del cuadro deberá ser como se muestra a continuación:

Cuadro N°6. Inventario de emisiones

ID	Tipo de fuente	Coordenadas Geográficas		Altitud (ms.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 5 del presente manual técnico.

6.9.3.1 Cálculo de emisiones y tasas de emisión

Se debe:

- 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)⁸;
- 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:

Cuadro N°7. Tasas de emisión

Fuente de emisión	Contaminante	Tasa de emisión (g/s)

- 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.

⁸ <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

- 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.

6.9.4 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 importante 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°8. 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 5 del presente manual técnico.
- Es importante señalar que para los DTM que tengan el propósito de ser incluidos en un IGA se deben identificar e incluir receptores discretos. Para el caso de investigaciones y estudios, la identificación de los receptores discretos es opcional, dado a que el propósito de estos no es necesariamente determinar los potenciales impactos en un lugar determinado.

6.9.5 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

	MANUAL TÉCNICO	Página	21 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

internacionales, no debe contravenir con normas y/o criterios nacionales.

6.9.6 Escenarios del modelamiento

Se debe seleccionar el escenario de modelamiento según el/los contaminante/s que se desee 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 6.9.5):

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

- Para el Benceno (C_6H_6), medido como promedio anual, el valor máximo en 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) y 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) y 25ª(vigesimoquinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Nitrógeno (NO_2), medido como promedio anual, el valor máximo en 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) y 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 máximo en 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) y 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 máximo en cada año del periodo de modelamiento.

	MANUAL TÉCNICO	Página	22 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- 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) y 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 (O_3), medido como promedio móvil de 8 horas, los valores de la 1ª(primer) y 25ª(vigesimoquinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Plomo (Pb) en PM_{10} , medido como promedio mensual, los valores de la 1ª(primer) y 5ª(quinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Plomo (Pb) en PM_{10} , medido como promedio anual, el valor máximo en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), medido como promedio 24 horas, los valores de la 1ª(primer) y 2ª(segunda) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	23 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

6.9.7 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 6.9.6.

$$CFI = CM + CF$$

Donde:

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

CM: Concentración modelada en los receptores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

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

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 manual técnico es determinar el aporte de las emisiones bajo estudio sobre las concentraciones de fondo determinadas o estimadas, razón por la cual independientemente del % que represente la concentración del fondo respecto a los ECA-aire, se deberá sumar la concentración modelada en los receptores discretos a la concentración de fondo.

6.9.7.1 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 de 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 5 del presente manual técnico.

6.9.7.2 Concentraciones en los receptores discretos

Se debe analizar, describir y presentar las concentraciones finales (ver ítem 6.9.7) en los receptores discretos según sus escenarios 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°9. Concentraciones de PM₁₀

ID	Fecha de Ocurrencia de la máxima concentración final	Nombre del Receptor	Coordenadas Geográficas		Altitud (ms.n.m)	Escenario	Concentración (µg/m³)
			Latitud	Longitud			
						1 ^{a*} máxima (24 horas)	
						1 ^a máxima (24 horas)	
						...	
						8 ^{8**} máxima (24 horas)	
						8 ^a máxima (24 horas)	
						...	
						Promedio anual***	
						Promedio anual	
						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 máximo del 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°10. Concentraciones de PM_{2.5}

ID	Fecha de Ocurrencia de la máxima concentración final	Nombre del Receptor	Coordenadas Geográficas		Altitud (ms.n.m)	Escenario	Concentración (µg/m³)
			Latitud	Longitud			
						1 ^{a*} máxima (24 horas)	
						1 ^a máxima (24 horas)	
						...	
						8 ^{8**} máxima (24 horas)	
						8 ^a máxima (24 horas)	
						...	
						Promedio anual***	
						Promedio anual	
						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 máximo del 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.

6.9.8 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 11 del presente manual técnico). 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°11. Concentraciones del contaminante para validación

Fecha	CM	CF	CFI	CO

Donde:

- CM : Concentración modelada en los receptores discretos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- CF : Concentración de fondo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- CFI : Concentración final ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- CO : Concentración observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

6.10 Conclusiones

Las conclusiones del DTM deben:

- Resolver los objetivos planteados.
- Sintetizar brevemente los puntos de la climatología y de la calidad del aire del área de estudio;
- Sintetizar brevemente los resultados de las concentraciones finales en el área de estudio y los receptores de discretos según los escenarios de modelamiento.

6.11 Recomendaciones

Las recomendaciones del DTM deben:

	MANUAL TÉCNICO	Página	26 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- 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;
- Plantear alternativas de mitigación y control si los resultados finales del modelamiento exceden los ECA-aire para los escenarios planteados.

6.12 Referencias Bibliográficas

Se debe:

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

6.13 Anexos

6.13.1 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 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 de discretos

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

6.13.3 Anexo 3 Inventario de emisiones

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

Por ejemplo:

- Mapa de isoconcentraciones de PM₁₀
- Mapa de isoconcentraciones de PM_{2.5}

	MANUAL TÉCNICO	Página	27 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 Visscher, 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	28 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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-](https://www.gov.uk/guidance/environmental-permitting-air-dispersion-modelling-reports#explain-the-modelled-domain-and-receptors)

[modelling-reports#explain-the-modelled-domain-and-receptors](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.

Ferrari, G., Ozaki, V. (2014). Missing data imputation of climate datasets:

implications to modeling extreme drought events. Universidade de Sau

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 de 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.

	MANUAL TÉCNICO		Página	29 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

Metcalf, S., & Derwent, D. (2014). Atmospheric pollution and environmental change. *Atmospheric Pollution and Environmental Change*, 1–196.
<https://doi.org/10.4324/9780203783818>.

Ministerio de Energia 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	30 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO		Página	31 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	32 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	33 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	34 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 2: MODELO DE INTRODUCCIÓN

El presente Documento Técnico Sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos (DTM) fue elaborado con la intención de evaluar las emisiones generadas por la industria xxx dedicada a la elaboración de azúcar, para lo cual se realiza la quema de caña de azúcar. En la industria existen dos tipos de quema: las desarrolladas previas a la cosecha (precosecha) donde la plantación de caña de azúcar se encuentra en pie; y las desarrolladas después de la cosecha (postcosecha) aplicadas a los residuos generados durante la cosecha. La industria se encuentra ubicada en el distrito de Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado y departamento de Huánuco. En el año 2015 se realizaron estudios de monitoreo de calidad del aire por parte de la Municipalidad Provincial, cuyas conclusiones indicaron que el material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀) superaban sus respectivos Estándares de Calidad Ambiental para Aire, principalmente en los meses correspondientes al verano (MPLP, 2015).

En ese sentido el presente DTM, tiene el objetivo de evaluar el impacto en la calidad del aire de las actividades de quema prescrita de caña de azúcar con el fin de establecer medidas de manejo para la no afección a la población. Para la elaboración de DTM se utilizaron datos meteorológicos modelados generados por el Modelo de Pronóstico e Investigación del Tiempo (WRF, por sus siglas en inglés), con una resolución espacial de 1km y temporal de 1 hora, para el periodo 2015-2020. Asimismo, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), con una resolución espacial de 30m y un raster de uso de suelos proveniente del satélite Terra-MODIS Land Cover, con una resolución espacial de 540 m. Para la generación de los escenarios de modelamiento de la dispersión de los contaminantes atmosféricos, se utilizó el modelo CALPUFF v.5.1, para un dominio de 50 x 50 km con una resolución espacial de 500 m y resolución temporal de 1 hora, cuyas salidas fueron validadas con datos observados de un monitoreo de calidad del aire realizados durante 60 días en las estaciones de verano e invierno del año 2020.

	MANUAL TÉCNICO	Página	35 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 3: MODELOS DE OBJETIVOS

- Evaluar el comportamiento espacial y temporal de la dispersión del PM_{10} producto de las emisiones de la quema prescrita de caña de azúcar.
- Comparar las concentraciones de PM_{10} obtenidas con el modelo AERMOD con los ECA-aire vigentes.
- Determinar las zonas de mayor concentración de $PM_{2.5}$ en el distrito de las Palmas producto de la ladrillera XXX.

	MANUAL TÉCNICO	Página	36 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 4: MODELO DE ANTECEDENTES

- 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, 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 Ramon 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). Luego del procesamiento de los datos del monitoreo, los resultados indicaron que el material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀) superaban sus respectivos Estándares de Calidad Ambiental para Aire, principalmente en los meses correspondientes al verano (MDRR, 2015).

	MANUAL TÉCNICO	Página	37 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 5: 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 1:100 000, 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 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 de 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.

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:

	MANUAL TÉCNICO	Página	38 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	39 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 6: 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 regulatorios⁹ 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 – Cetesb¹⁰, 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) 559/19¹¹ 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

⁹ 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.

¹⁰ <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/documentos/Manual-DD-217-14.pdf>

¹¹ https://www.ecofield.net/Legales/BsAs/res559-19_OPDS_BA.htm

	MANUAL TÉCNICO		Página	41 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS			

y cuyos efectos suelen durar de 1 a 2 años (Okomura et al., 2017). Lo cual está acorde a lo que mencionan en el Centro de Aplicaciones Técnicas Ambientales de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAFETAC, por sus siglas en inglés)¹⁴ y Hanley et al. 2002¹⁵ pues la frecuencia de estos eventos tiene un ciclo irregular, variando entre 2 y 10 años.

Se ha demostrado mediante distintas investigaciones que los efectos del ENOS en el Perú, están relacionado a la variabilidad interanual de extremos regionales del clima (precipitaciones, inundaciones, sequías, entre otros). En los Andes Centrales, afectan en la fracción de los sistemas estratiformes de larga duración de las lluvias monzónicas que se duplican al 35% con una recurrencia semanal (Chavez et al., 2020). Asimismo, en el 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 (temperaturas¹⁶, 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

¹⁴ USAFETAC.1992. South America South of the Amazon River: a climatological study

¹⁵ A Quantitative Evaluation of ENSO Indices: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2)

¹⁶ <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/eventos-extremos-en-el-peru-se-intensificarian-por-el-cambio-climatico-en-el-2030/>

	MANUAL TÉCNICO	Página	42 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

modelos requieren para su ejecución datos meteorológicos observados¹⁷ y/o modelados¹⁸ (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)¹⁹ 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.

¹⁷ Datos meteorológicos observados, son aquellos que se generan en estaciones meteorológicas automáticas.

¹⁸ Datos meteorológicos modelados, son aquellos que se generan mediante el uso de modelos numéricos dentro de un sistema informático.

¹⁹ 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°12, para poder utilizarlos como datos de entrada en un MDCA.

Cuadro N°12. Porcentaje de datos faltantes aceptables por variable meteorológica²⁰

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). 1 mes puede tener como máximo el 15% de días faltantes (5 días)*.	Los datos faltantes deben ser necesariamente consecutivos
Temperatura Mínima (°C)		
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 podrán 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 podrán emplear técnicas de completación de datos como vecinos más cercanos, ecuaciones encadenadas, técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, entre otras previa sustentación técnica (Yozgatligil et al., 2013; Ferrari & Ozaki, 2014; Sattari et al., 2016).

²⁰ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>.

	MANUAL TÉCNICO	Página	44 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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:
 - 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	45 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 7: 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 homogéneas²¹ 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.

²¹ Condiciones meteorológicas homogéneas: Se refiere a la poca variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.

	MANUAL TÉCNICO	Página	46 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 receptores²² (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 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

²² 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	47 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	48 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	49 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 8: 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	50 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 9: 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.

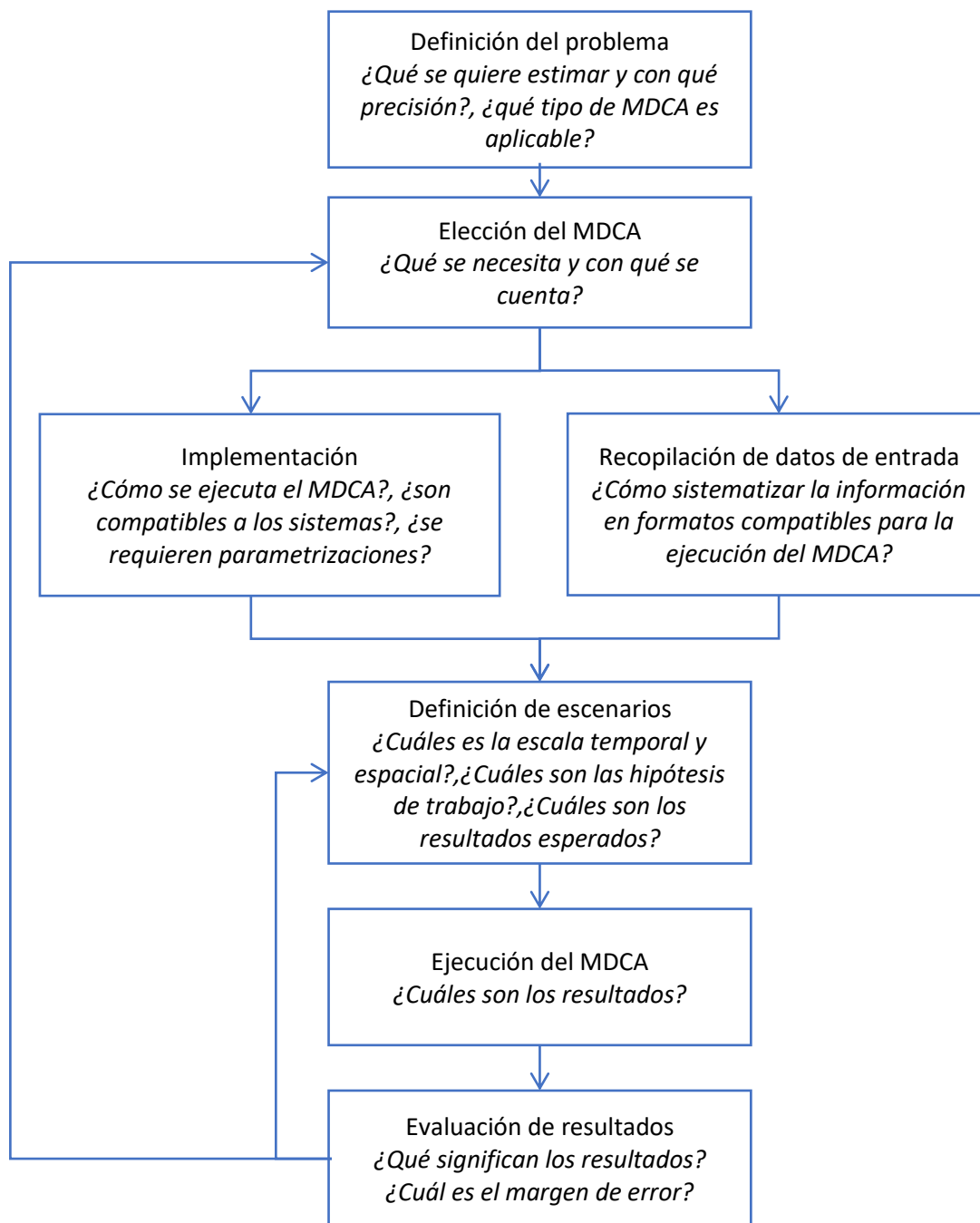


Figura N°2. Esquema de aplicación de un MDCA
Fuente: Adaptado de Morales (2006)

	MANUAL TÉCNICO	Página	52 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 10: 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):

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.

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.

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	53 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 NCAR²³ y la NOAA²⁴ de los Estados Unidos. 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 suelo

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) deberá tener una resolución espacial mínima de 90 metros y la información de usos de suelos deberá tener una resolución espacial mínima de 540 metros.

²³ National Center for Atmospheric Research

²⁴ National Oceanic and Atmospheric Administration

	MANUAL TÉCNICO	Página	54 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 usos de suelo dentro del dominio de modelamiento.

APÉNDICE 11: 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 (Rincón, 2012). 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°13, las cuales permitirán determinar el grado de incertidumbre de las salidas de los modelos.

Cuadro N°13. Pruebas para validación

Prueba	Fórmula
Sesgo de media geométrica (MG)	$MG = \exp (\ln \tilde{O}_i - \ln \tilde{P}_i)$
Varianza geométrica (VG)	$VG = \exp [(\ln \tilde{O}_i - \ln \tilde{P}_i)^2]$
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 $\tilde{O}_i$: Máximo valor del contaminante observado
 $\tilde{P}_i$: 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 aceptará que se empleen datos de monitoreos de calidad del aire para realizar el proceso de validación y se exigirán 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 permitirán determinar y asegurar una correcta representación de las condiciones de contaminación producto de las emisiones evaluadas en el área de estudio.

Cuadro N° 14. 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:

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.

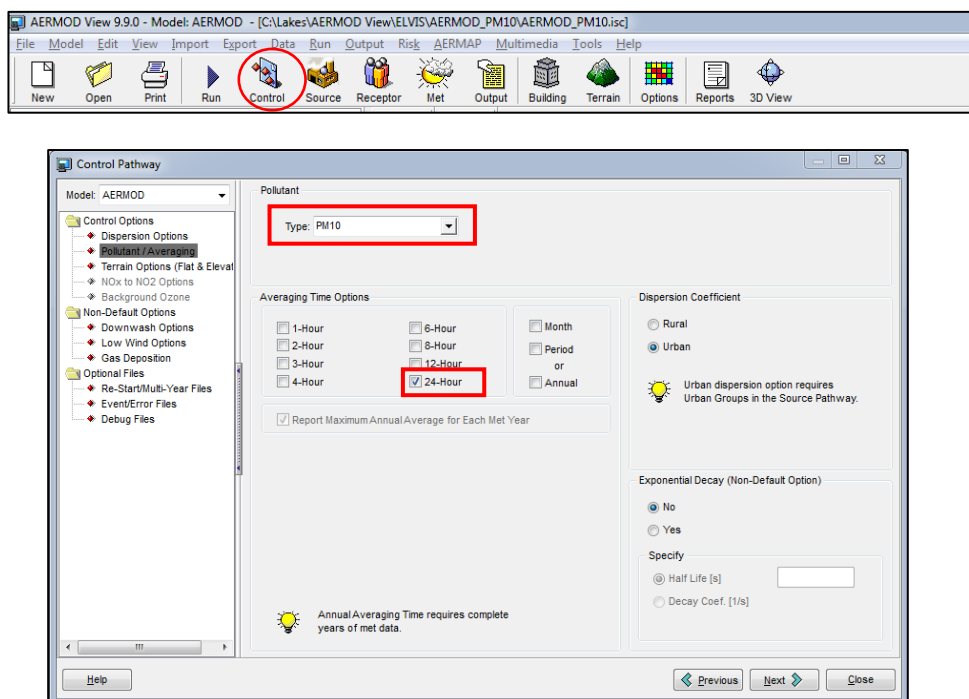
Para realizar una correcta validación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, es necesario tener datos observados y datos modelados de un mismo lugar y en un mismo periodo de tiempo y que la cantidad de éstos sean suficientemente grande para que las pruebas estadísticas sean significativas 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.

c.1) Extracción de concentraciones modeladas

Para extraer las concentraciones modeladas del MDCA (AERMOD View 9.9.0) para el PM₁₀ en 24 horas se procede a realizar los siguientes pasos:

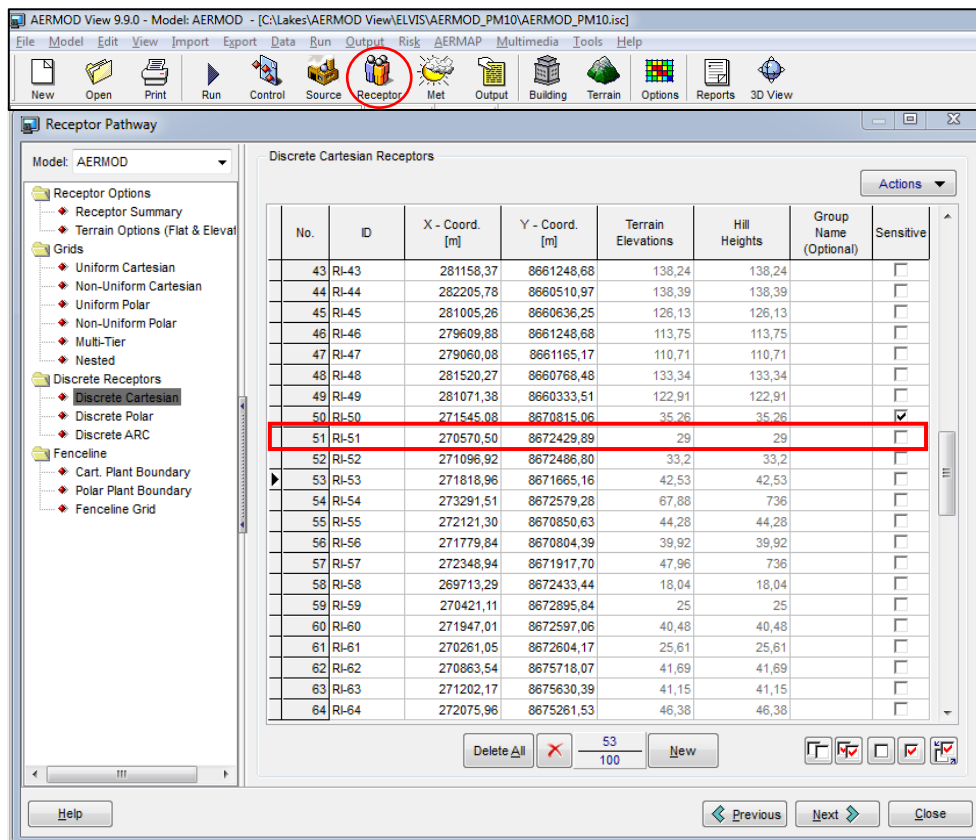
Paso 1: Se debe escoger el contaminante a evaluar, así como el escenario de modelamiento que se va a considerar para realizar el proceso de validación. Para ello, se apertura la ventana emergente de configuración de control (Control Pathway) del software AERMOD View 9.9.0. En este ejemplo, se escogió como contaminante al PM₁₀, y un escenario de 24 horas para la modelación de los promedios respectivos, tal como se ve en la siguiente figura:

Figura N°3. Configuración de Control



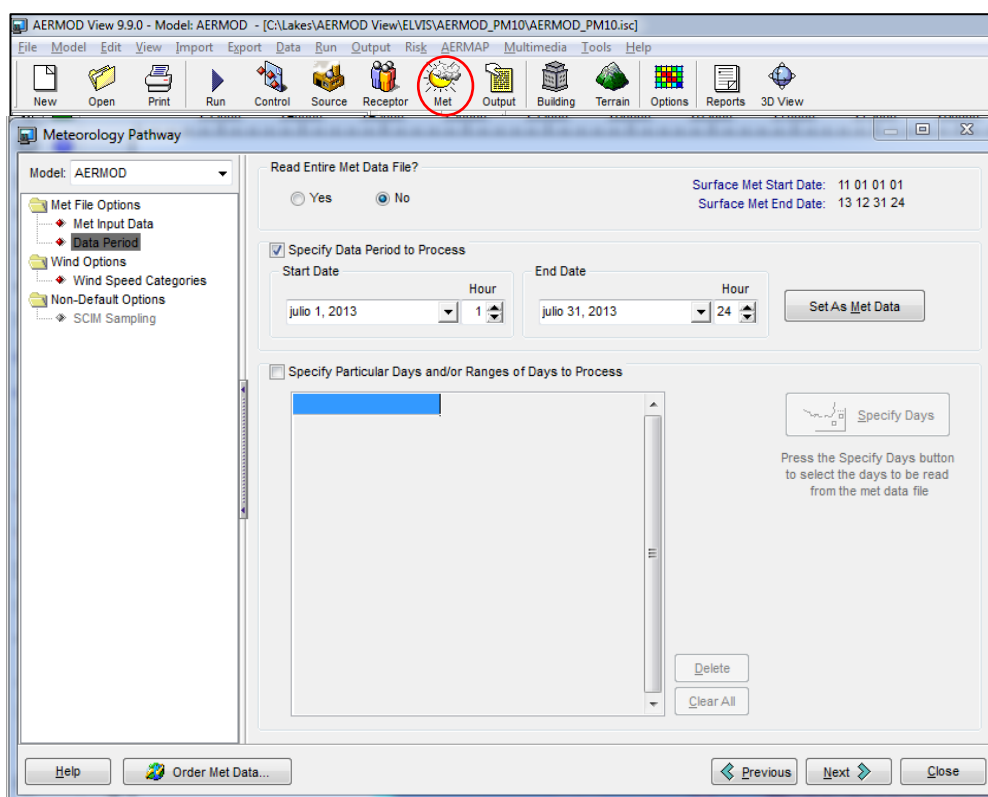
Paso 2: Se debe escoger el/los receptores/es discreto/s que se van a considerar para realizar el proceso de validación. Para ello, se apertura la ventana emergente de configuración de receptores (Receptor Pathway) del software AERMOD View 9.9.0. En este ejemplo, se escogió al receptor “RI-50”, como se ve en la siguiente figura:

Figura N°4. Configuración de Receptores



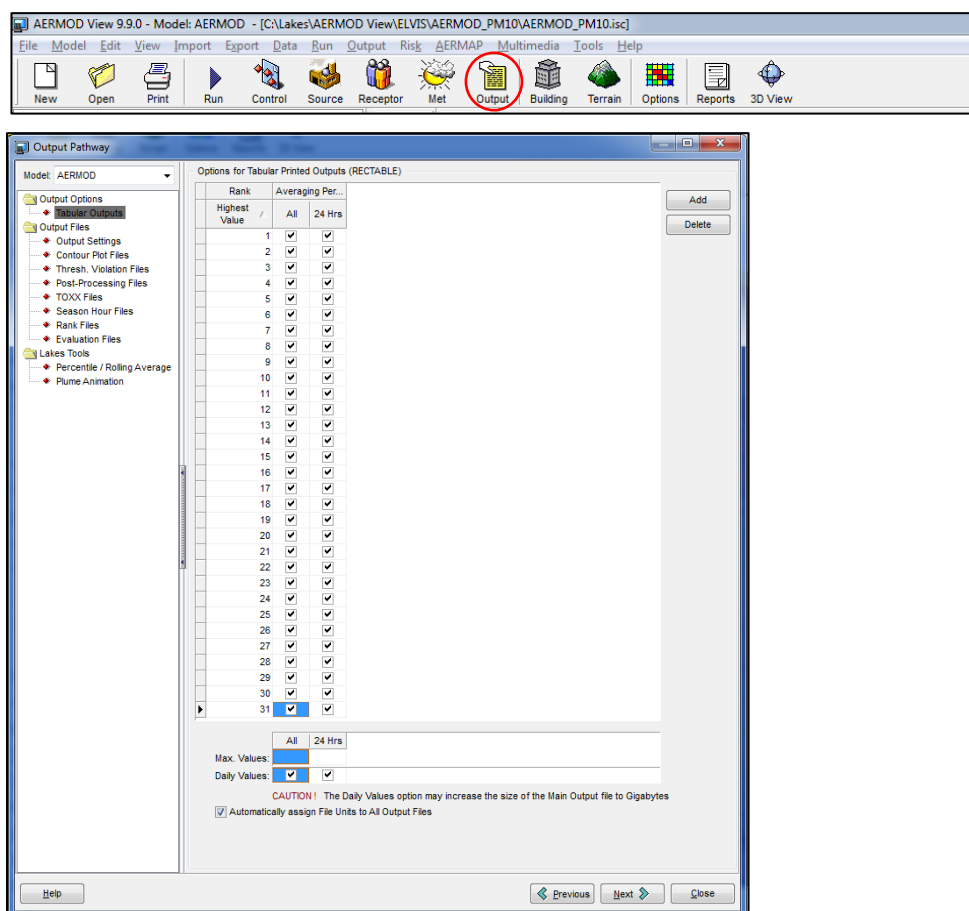
Paso 3: Se debe cambiar el periodo de modelamiento de tal manera que coincida con el periodo de monitoreo para el cual se cuenta con información de las concentraciones observadas del contaminante a evaluar. Para ello, se apertura la ventana emergente de la configuración meteorológica (Meteorology Pathway) del software AERMOD View 9.9.0. En la siguiente figura, se puede observar con fines de ejemplo, que se realizó el cambio por un periodo de datos correspondiente del 01 hasta el 31 de julio:

Figura N°5. Configuración de la Meteorología



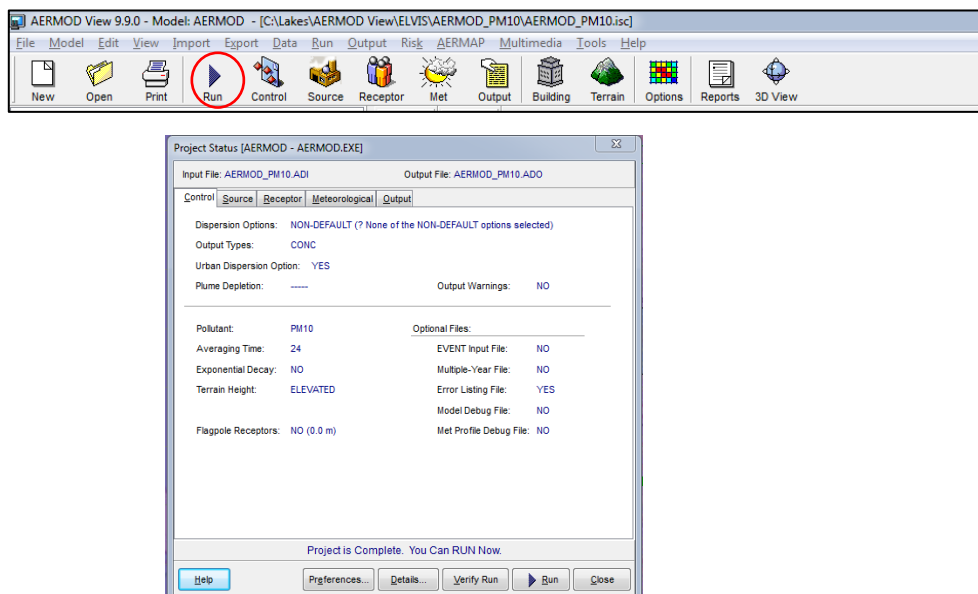
Paso 4: Se debe realizar un cambio en la configuración de los resultados para poder obtener todos los valores del periodo modelado y no solamente algún valor en específico de todo el periodo. Para ello, se apertura la ventana emergente de la configuración de salidas (Output Pathway) del software AERMOD View 9.9.0. En la siguiente figura, se puede observar, que se escogieron los 31 valores máximos diarios, con los que se puede obtener el valor promedio de cada día, ordenado desde los valores más altos hasta los valores más bajos.

Figura N°6. Configuración de Salidas



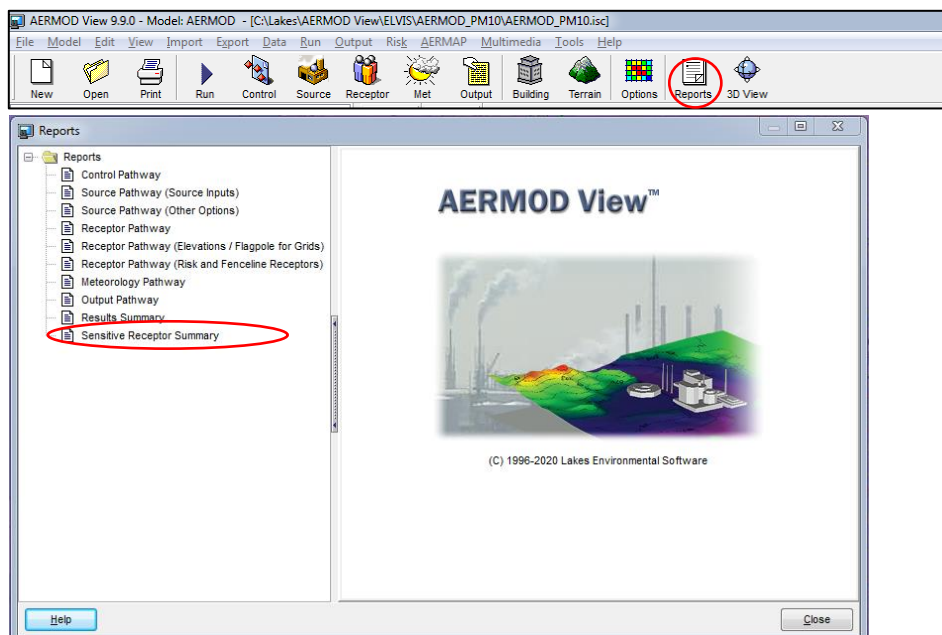
Paso 5: Con las configuraciones previas se procede a ejecutar el modelo. Para ello, se apertura la ventana emergente del Estado del Proyecto (Project Status) para la corrida de simulación respectiva en el software AERMOD View 9.9.0.

Figura N°7. Corrida del modelo



Paso 6: Una vez corrida la simulación debemos ingresar al módulo de reportes (Reports), para poder observar los resultados. Una vez en la ventana de reportes deberemos escoger la opción de resumen para los receptores discretos escogidos (Sensitive Receptor Summary).

Figura N°8. Extracción de resultados



c.2) Síntesis de concentraciones

En el Cuadro N°15 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 participan son la concentración final (CFI) y la concentración observada (CO). Asimismo, es importante precisar que la CFI se calcula como la concentración modelada en los receptores discretos (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 Manual Técnico y el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire.

Cuadro N°15. 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 los receptores discretos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

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°16. 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

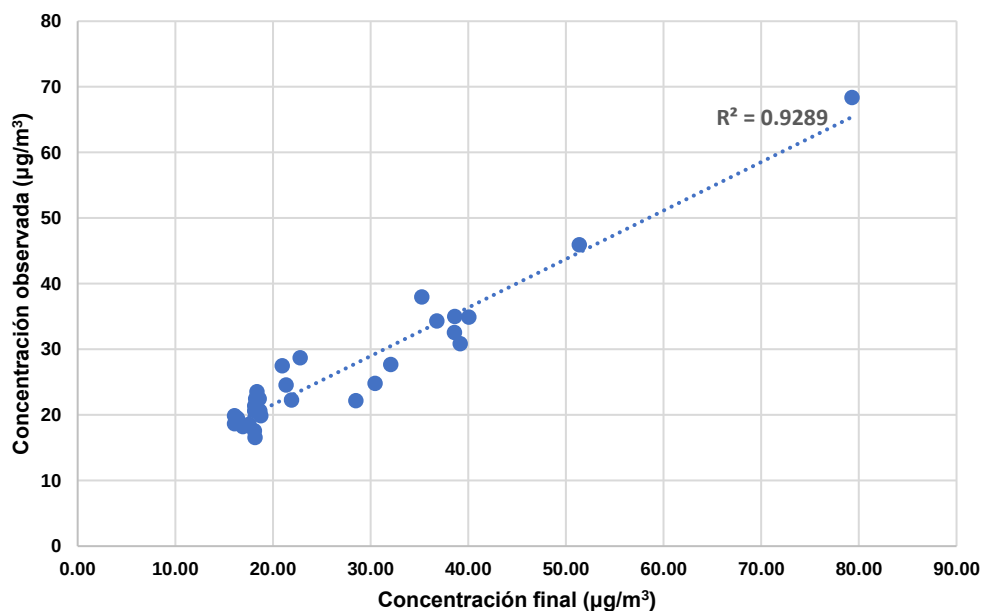


Figura N°9. Diagrama de dispersión entre las concentraciones finales (CFI) y las concentraciones observadas (CO)

	MANUAL TÉCNICO	Página	64 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 manual (Coeficiente de correlación (r) >0.6 ; Coeficiente de determinación (r^2) >0.6 y $|BIAS| < 0.6$), se concluye que las salidas del modelo son Aceptables.

	MANUAL TÉCNICO	Página	65 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 12: 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:

- elegir el modelo más apropiado para el propósito previsto, y
- justificar esta elección en la metodología de estudio.

Recomendación 2:

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

- ¿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).

- ¿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.

- ¿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.

- ¿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

	MANUAL TÉCNICO	Página	66 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

químicos (por ejemplo, la producción de NO_2 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

	MANUAL TÉCNICO	Página	67 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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:

	MANUAL TÉCNICO	Página	68 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	69 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

IX. GLOSARIO

- 1) **Área de estudio:** El área de estudio comprende la superficie que abarca la/s fuente/s de emisión y los receptores de discretos.
- 2) **Características de terreno:** Se refiere a la topografía y el uso de suelo del dominio de modelamiento.
- 3) **Centroide:** Se refiere a la ubicación del centro geométrico de un cuerpo (Meriam y Kraige, 1999).
- 4) **Condiciones meteorológicas heterogéneas:** Se refiere a la gran variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.
- 5) **Condiciones meteorológicas homogéneas:** Se refiere a la poca variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.
- 6) **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.
- 7) **Datos meteorológicos observados:** Datos meteorológicos observados, son aquellos que se generan en estaciones meteorológicas automáticas.
- 8) **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.
- 9) **Isoconcentraciones:** Representación gráfica de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos mediante curvas de nivel.
- 10) **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.
- 11) **La Agencia Europea de Protección Ambiental (EEA):** La EEA en los últimos años ha proporcionado conocimiento científico y datos necesarios para ayudar a tomar decisiones fundamentadas para el uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. En el año 2011 generó la Directiva denominada “Aplicación de modelos de calidad de aire para la Unión Europea”, que por su contenido ha sido utilizada en diferentes países de América Latina como

	MANUAL TÉCNICO	Página	70 de 70
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

Colombia, Chile, Brasil, Argentina, entre otros, como guía para la aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

- 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) **Obstáculo:** Se considera como un obstáculo a cualquier barrera física como paredes, edificaciones, arboles, entre otros.
- 15) **Receptor discretos:** 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.
- 16) **Terreno complejo:** Entendiéndose como terreno complejo a aquellas áreas donde los receptores se encuentran a una altura mayor a la altura de liberación de los contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes de emisión.
- 17) **Terreno simple:** Entendiéndose como terreno simple a aquellas áreas donde los receptores se encuentran a una altura menor a la altura de liberación de los contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes de emisión.