



RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA EJECUTIVA N° 048-2021-SENAMHI/PREJ

Lima, 1 de octubre de 2021

VISTA:

La Nota de Elevación N° D000227-2021-SENAMHI-DMA de fecha 30 de setiembre de 2021, de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, 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, en este contexto, mediante documento del Visto, la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, traslada la Nota de Elevación N° D000227-2021-SENAMHI-SEA y el Informe Técnico N° D000029-2021-SENAMHI-SEA-EMD, de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico, a través del cual remiten la propuesta de Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, para su prepublicación;

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 prepublicación del Manual Técnico para la Elaboración de Documentos Técnicos sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, a fin de conocer las opiniones y/o sugerencias de los interesados;

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.- Disponer la prepublicación del 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.- La prepublicación se realizará en el Portal Web Institucional del SENAMHI (www.senamhi.gob.pe), a fin de conocer las opiniones y/o sugerencias de los interesados, por un plazo de quince (15) días calendarios contados a partir de la fecha de publicación de la presente Resolución.

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 54
	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	9
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 económica 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	10
6.6.1	Información de los datos meteorológicos	10
6.6.2	Clasificación climática	11
6.6.3	Tiempo y clima	12
6.7	Calidad del aire	14
6.7.1	Monitoreo de calidad del aire	14
6.7.2	Nivel de fondo	15
6.8	Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	16
6.8.1	Justificación del modelo utilizado	16
6.8.2	Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	16
6.9	Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos	16
6.9.1	Dominio de modelamiento	16
6.9.2	Periodo de modelamiento	16
6.9.3	Inventario de emisiones	17
6.9.4	Receptores de interés	18
6.9.5	Normas y criterios ambientales	18
6.9.6	Escenarios del modelamiento	18
6.9.7	Resultados	20
6.9.8	Validación	22
6.10	Conclusiones	22
6.11	Recomendaciones	22
6.12	Referencias Bibliográficas	22
6.13	Anexos	22
6.13.1	Anexo 1	22

	MANUAL TÉCNICO	Página	3 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

6.13.2	Anexo 2 (opcional, en el caso que se hayan utilizado datos meteorológicos modelados) .23	
6.13.3	Anexo 3 Inventario de emisiones 23	
6.13.4	Anexo 4 (según el/los escenarios/s de modelamiento realizado/s en el DTM) 23	
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 24	
VIII.	APÉNDICES..... 28	
IX.	GLOSARIO 53	

	MANUAL TÉCNICO	Página	4 de 54
	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 (SO₂), material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀), ozono (O₃), entre otros^{1,2,3}. Ahora bien, existen diversas actividades económicas 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 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 económicas. 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 A New Air Quality Perception Scale for Global Assessment of Air Pollution Health Effects- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1539-6924.2012.01862.x>

² Air quality trends and potential health effects – Development of an aggregate risk index - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231010011015>

³ Mortality and morbidity due to exposure to outdoor air pollution in Mashhad metropolis, Iran. The AirQ model approach- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935116303267>


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

	MANUAL TÉCNICO	Página	5 de 54
	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 54
	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.
- 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	7 de 54
	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 del formato y estructura final que tendrá el mismo, para efectos del servicio prestado en exclusividad aprobado mediante Decreto Supremo N°027-2021-MINAM, deberá contar con información ordenada de acuerdo a la estructura que se muestra en el Apéndice 1.

	MANUAL TÉCNICO	Página	8 de 54
	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 uno de los capítulos a desarrollar en el DTM:

6.1 Introducción

Debe contener:

- Una descripción breve de la actividad económica o fenómeno natural que genera emisiones;
- 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 (en el caso se hubieran realizado).

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

6.4 Descripción del área de estudio

6.4.1 Ubicación política y geográfica 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 el Cuadro N°1 (tal como se muestra a continuación), consignando una coordenada geográfica⁵ (DATUM WGS84) referencial del área de estudio (centroide⁶);


Cuadro N°1. Ubicación geográfica del área de estudio

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

- 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). 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.

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 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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

Se debe:

- Realizar una descripción detallada de la actividad económica 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 el Cuadro N°2 del DTM:

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). Los periodos mínimos de los datos meteorológicos son descritos en el Apéndice 6 del presenta manual técnico.

	MANUAL TÉCNICO	Página	11 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- 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 el cuadro N°3 e incluirlo en su DTM.

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 el cuadro N°4 e incluirlo en el DTM.

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.

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	12 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 6.5.1.

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).
- 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 y mínima diaria de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como Figura N°1 del DTM;
- 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 Figura N°2 del DTM.

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

	MANUAL TÉCNICO	Página	13 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

datos meteorológicos, la cual se indicará como Figura N° 3 del 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 Figura N°4 del 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 Figura N°5 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 Figura N°6 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 Figura N° 7 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 Figura N°8 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 Figura N°9 en el DTM;
- Un gráfico de rosa de vientos para todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como Figura N°10 en el DTM.

	MANUAL TÉCNICO	Página	14 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

6.6.3.5 Radiación Global (W/m²)-(opcional)

Se debe elaborar:

- Un gráfico que debe contener el ciclo horario promedio de la Radiación Global (W/m²) de cada año del periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como Figura N°11 en el DTM;
- Un gráfico de series temporales de la variabilidad diaria de la Radiación Global (W/m²) de todo el periodo de los datos meteorológicos, la cual se indicará como Figura N°12.

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 económicas 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.

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.

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	15 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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 6.6.1), se deberá determinar y/o estimar si las concentraciones de estos contaminantes en condiciones donde la actividad económica o fenómeno natural no este activo (donde las fuentes de emisión 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 económicas o del fenómeno natural que se pretende evaluar. Las concentraciones de fondo serán consignadas en el Cuadro N°5 del DTM.

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

Contaminante	Periodo de monitoreo	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	MANUAL TÉCNICO	Página	16 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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. Se debe utilizar una resolución espacial de 1km y una resolución temporal de 1 hora.
- Justificar la elección del MDCA, considerando los criterios y recomendaciones indicados en los Apéndices 6, 7, 8, 9, 10,11y12 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 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:

- 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

N	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)

- Asimismo, en el Anexo 3 del DTM, se debe describir detalladamente todos los procedimientos, parámetros

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

y ecuaciones para el cálculo de las emisiones y tasas de emisión.

6.9.4 Receptores de interés

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 de interés, que se definen como aquellas zonas o puntos que puedan ser vulnerables frente a los peligros de contaminación del aire, tales como, centros poblados, colegios, hospitales, parques, entre otros, los cuales deben ser presentados en un cuadro en el DTM, con la siguiente información:

Cuadro N°8. Receptores de interés

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 de interés, 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.

6.9.5 Normas y criterios ambientales

Se debe especificar y sustentar las normas y criterios ambientales que se van a utilizar para comparar los resultados de las concentraciones de los contaminantes generados en el modelamiento.


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):

	MANUAL TÉCNICO	Página	19 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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

- Para el Benceno (C₆H₆), medido como promedio anual, el valor máximo en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Azufre (SO₂), medido como promedio de 24 horas, los valores de la 1^a(primera) y 8^a(octava) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Nitrógeno (NO₂), medido como promedio de 1 hora, los valores de la 1^a(primera) y 25^a(vigésimoquinta) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Dióxido de Nitrógeno (NO₂), medido como promedio anual, el valor máximo en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀), medido como promedio de 24 horas, los valores de la 1^a(primera) y 8^a(octava) concentración máxima en cada año del periodo de modelamiento.
- Para el Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀), 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 1^a(primera) y 8^a(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.
- Para el Mercurio Gaseoso Total (Hg²), 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 1^a(primera) y 2^a(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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	20 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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

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 (µg/m³)

CM: Concentración modelada en los receptores de interés (µg/m³)

CF: Concentración de fondo (µg/m³)

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

6.9.7.1 Mapas de isoconcentraciones

Las concentraciones finales de cada escenario (8ª máximo del periodo de modelamiento) 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 interés, 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 de interés

Se debe analizar, describir y presentar las concentraciones finales (ver ítem 6.9.7) en los receptores de interés 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	Receptor	Coordenadas geográficas		Escenarios		
			Latitud	Longitud	1ª máxima (24 horas) *	8ª máxima (24 horas) **	1ª máxima (anual)***

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

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

*** Valor 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	Receptor	Coordenadas geográficas		Escenarios		
			Latitud	Longitud	1ª máxima (24 horas) *	8ª máxima (24 horas) **	1ª máxima (anual)***

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

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

*** Valor 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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	22 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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). Cabe precisar que, si la actividad económica 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.

6.10 Conclusiones

Las conclusiones del DTM deben:

- Sintetizar brevemente los puntos de la climatología y de la calidad del aire del área de estudio (agregar ejemplos);
- Sintetizar brevemente los resultados de las concentraciones finales en el área de estudio y los receptores de interés según los escenarios de modelamiento.

6.11 Recomendaciones

Las recomendaciones del DTM deben:

- Ser coherentes con los resultados obtenidos y deben estar orientadas a resolver algunas limitaciones que no se pudieron suplir en la elaboración del DTM presentado;
- 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

	MANUAL TÉCNICO	Página	23 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		


- 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 interés

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)

- Mapa de isoconcentraciones de PM10
- Mapa de isoconcentraciones de PM2.5

	MANUAL TÉCNICO	Página	24 de 54
	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.

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.

European Environment Agency (EEA). (2011). The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide.

Gallego, P., Gonzales, F., Sánchez B., Fernández P., Garcinuño M., Bravo C., Pradana A., Navarro R., Durand, J. (2012). Contaminación atmosférica. Editorial UNED. España.

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>.

	MANUAL TÉCNICO	Página	25 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

Jorquera. H. (2015). Introducción a la contaminación atmosférica. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile., 254. 902-5828.

Mendoza, A., Garcilla, M. (2009). Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona Metropolitana de Guadalajara, México. Rev. Int. Ambient. 25 (2) 73-85.

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

Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2007). Guía para la Evaluación de Impactos En la Calidad del Aire por Actividades Minero Metalúrgicas


Ministry for the Environment. (2004). Good practice guide for atmospheric dispersion modelling. Vol. Air Qualit. New Zeland.

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.

Morales, R. (2006). Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria. Chile.

Rincon, M. (2012). Acoplamiento de un modelo de mesoescala WRF al modelo de calidad del aire Calpuff. Universidad Nacional de Colombia.

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>

	MANUAL TÉCNICO	Página	26 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

Stull R.B. (1995) Meteorology Today for Scientists and Engineers. West Publishing Company, 385 pp.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (2009). Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/cred_guidance_0309.pdf


United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (2017). Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter. Recuperado de: https://www3.epa.gov/ttn/scram/guidance/guide/appw_17.pdf.

Villar, G. (2017). Estudio de modelos de dispersión y su aplicación al control industrial. Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. España.

Wark, K., Warner, C. (1990). Contaminantes del aire: Origen y control. Limusa. 9 Edición. 650 pag.


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

	MANUAL TÉCNICO	Página	27 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

México: un estudio de caso en Tuxpan, Veracruz. Ed.INE-SEMARNAT.

Mexico,61.


	MANUAL TÉCNICO	Página	28 de 54
	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


<p>Capítulo I : Introducción</p> <p>Capítulo II : Objetivos</p> <p>Capítulo III : Antecedentes</p> <p>Capítulo IV: Descripción del área de estudio</p> <p style="padding-left: 20px;">4.1. Ubicación geográfica y política del área de estudio</p> <p style="padding-left: 20px;">4.2. Descripción de la actividad económica o fenómeno natural que genera o generará emisiones en el área de estudio</p> <p>Capítulo V: Características del terreno</p> <p>Capítulo VI Climatología del área de estudio</p> <p style="padding-left: 20px;">6.1. Información de los datos meteorológicos</p> <p style="padding-left: 20px;">6.2. Clasificación climática</p> <p style="padding-left: 20px;">6.3. Tiempo y clima</p> <p>Capítulo VII: Calidad del aire</p> <p style="padding-left: 20px;">7.1. Monitoreo de calidad del aire</p> <p style="padding-left: 20px;">7.2. Nivel de fondo</p> <p>Capítulo VIII: Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos</p> <p style="padding-left: 20px;">8.1. Justificación del modelo utilizado</p> <p style="padding-left: 20px;">8.2. Metodología del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos</p> <p>Capítulo IX: Alcances del modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos</p> <p style="padding-left: 20px;">9.1. Dominio de modelamiento</p> <p style="padding-left: 20px;">9.2. Periodo de modelamiento</p> <p style="padding-left: 20px;">9.3. Inventario de emisiones</p> <p style="padding-left: 20px;">9.4. Receptores de interés</p> <p style="padding-left: 20px;">9.5. Normas y criterios ambientales</p> <p style="padding-left: 20px;">9.6. Escenarios del modelamiento</p> <p style="padding-left: 20px;">9.7. Resultados</p> <p style="padding-left: 20px;">9.8. Validación</p> <p>Capítulo X: Conclusiones</p> <p>Capítulo XI: Recomendaciones</p> <p>Capítulo XII: Referencias Bibliográficas</p> <p>Capítulo XIII: Anexos</p> <p style="padding-left: 20px;">13.1. Anexo 1</p> <p style="padding-left: 20px;">13.2. Anexo 2</p> <p style="padding-left: 20px;">13.3. Anexo 3</p>
--

	MANUAL TÉCNICO	Página	29 de 54
	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 (pre cosecha) donde la plantación de caña de azúcar se encuentra en pie; y las desarrolladas después de la cosecha (post cosecha) 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 afcción 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	30 de 54
	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 PM₁₀ producto de las emisiones de la quema prescrita de caña de azúcar.
- Comparar las concentraciones de PM₁₀ 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	31 de 54
	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	32 de 54
	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 máxima 1:100 000.
- 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 interés, 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 interés. Las capas de vías de acceso, receptores de interés, 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 interés 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:

Título: Mapa base del Proyecto Minero Nueva Esperanza		Nro. de Mapa: 1
Autor:	DATUM: WGS84	
Fecha de elaboración:	Escala: 1: 100 000	


	MANUAL TÉCNICO	Página	33 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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.

	MANUAL TÉCNICO	Página	34 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 6: PERIODO DE LOS DATOS METEOROLOGICOS

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, 2017). La US-EPA recomienda que para fines regulatorios⁹ el periodo debería ser como mínimo de 5 años.

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.”

Ahora bien, dada la experiencia que el SENAMHI ha adquirido en la evaluación de documentos técnicos sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos, se ha evidenciado que los usuarios utilizan modelos recomendados por la US-EPA y la EEA como AERMOD y CALPUFF, dichos modelos requieren para su ejecución datos meteorológicos observados¹² y/o modelados¹³ (superficie y altura). Asimismo, según el reporte del Instituto Geofísico del Perú¹⁴ (utilizando los criterios establecidos por el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño-ENFEN), los Fenómenos El Niño y La Niña ocurridos en los últimos 64 años tienen una frecuencia aproximada de 6 y 4 años respectivamente. Lo cual está acorde a lo que menciona el Centro de Aplicaciones Técnicas Ambientales de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAFETAC, por sus siglas en inglés)¹⁵, pues la frecuencia de

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


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

¹² Datos meteorológicos observados, son aquellos que se generan en estaciones meteorológicas automáticas.

¹³ Datos meteorológicos modelados, son aquellos que se generan mediante el uso de modelos numéricos dentro de un sistema informático.

¹⁴ http://met.igp.gob.pe/elniño/lista_eventos.html

¹⁵ USAFETAC.1992. South America South of the Amazon River : a climatological study

	MANUAL TÉCNICO	Página	35 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

estos eventos tiene un ciclo irregular, variando entre 2 y 10 años. Por otro lado, 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, en el Perú los datos meteorológicos observados son muy escasos o a veces inexistentes, por lo que, en muchos casos se usan 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.

Por lo tanto, de acuerdo a lo expuesto anteriormente y dada la importancia del uso de los modelos recomendados por las indicadas Agencias, así como a la gran diversidad climática del Perú (38 climas)¹⁷ y a los efectos del ENOS¹⁸ en la variabilidad interanual de las condiciones meteorológicas en nuestro país que se evidencian con eventos extremos más frecuentes, se establece que el periodo mínimo de para elaborar un Documento Técnico sobre Modelamiento de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos será de los seis (6) últimos años cuando se utilicen datos meteorológicos modelados (superficie y altura), con la finalidad de garantizar que las condiciones meteorológicas más desfavorables para la dispersión sean representadas en los resultados y cuando se utilicen datos meteorológicos observados (superficie y altura) el periodo mínimo será de los últimos tres (3) años.

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

¹⁷ 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>.

¹⁸ Ciclo natural global del clima, de interacción océano-atmósfera, que ocurre en el Océano Pacífico. La intensidad de sus fases induce cambios en los patrones normales de lluvia, en la temperatura y en los sistemas de presión de la región tropical del Océano Pacífico, que afecta el clima del mundo entero: <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/255>.

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

Cuadro N°11. Porcentaje de datos faltantes aceptables por variable meteorológica¹⁹


Variable Meteorológica	Porcentaje de datos faltantes	Observación
Precipitación (mm)	Menor al 10% (3 días) durante el mes	Los datos faltantes pueden ser aleatorios, no necesariamente consecutivos
Temperatura Máxima (°C)	Menor al 15% (5 días) durante el mes	Los datos faltantes deben ser necesariamente consecutivos
Temperatura Mínima (°C)		
Velocidad del Viento (m/s)		
Dirección del Viento (°)		
Humedad Relativa (%)		

Fuente: SENAMHI (2021).

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.
- Cabe precisar que, no se debe utilizar los estimadores de datos meteorológicos de altura de los MDCA (como por ejemplo el Upper Air Estimator del AERMOD), pues 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.

¹⁹ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>.

	MANUAL TÉCNICO	Página	37 de 54
	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 homogéneas²⁰ 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.

²⁰ Condiciones meteorológicas homogéneas: Se refiere a la poca variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas dentro de un espacio o región.

	MANUAL TÉCNICO	Página	38 de 54
	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 5 kilómetros) de las emisiones de contaminantes atmosféricos, en terrenos simples y complejos (US-EPA, 2017). Entendiéndose como terrenos simples a aquellas áreas donde los receptores²¹ (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

²¹ 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	39 de 54
	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	40 de 54
	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	41 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

APÉNDICE 8: VENTAJAS Y LIMITACIONES EN EL USO DE MODELOS

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	42 de 54
	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 físicas 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 interés 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.

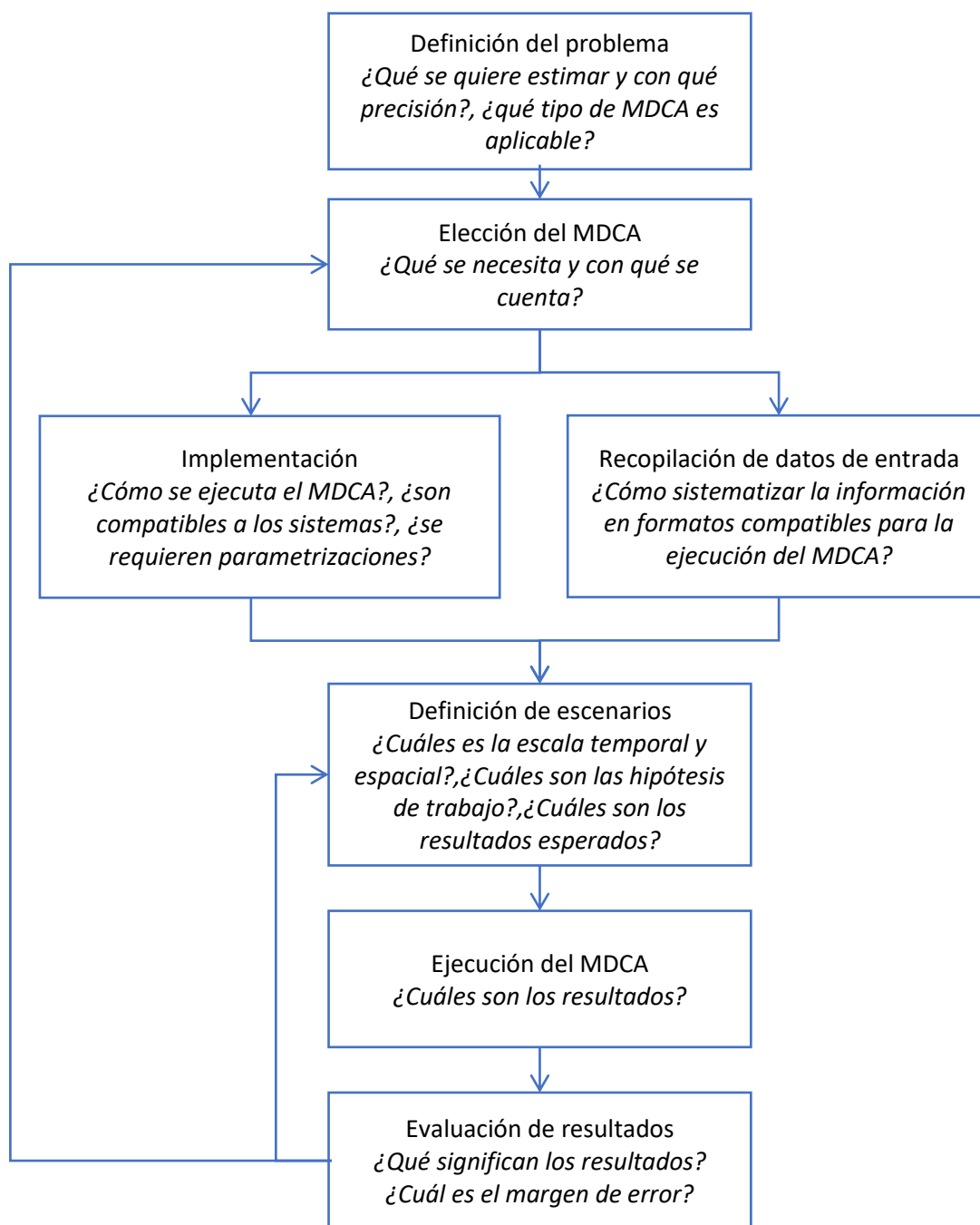



Figura N°2. Esquema de aplicación de un MDCA
 Fuente: Adaptado de Morales (2006)

	MANUAL TÉCNICO	Página	44 de 54
	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	45 de 54
	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 NCAR²² y la NOAA²³ 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 máxima de 90 metros y la información de usos de suelos deberá tener una resolución espacial máxima de 540 metros.

²² National Center for Atmospheric Research

²³ National Oceanic and Atmospheric Administration

	MANUAL TÉCNICO	Página	46 de 54
	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° 12, las cuales permitirán determinar el grado de incertidumbre de las salidas de los modelos.

Cuadro N° 12. Pruebas para validación

Prueba	Fórmula
Error Absoluto Medio	$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i $
Error Medio Cuadrático	$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$
Coeficiente de correlación (r)	$r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}}{\sigma_O \sigma_P}$
Coeficiente 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

	MANUAL TÉCNICO	Página	48 de 54
	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:

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

Recomendación 2:

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

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

Los modelos gaussianos solo se aplican a cortas distancias (a menos de 5 kilómetros de emisión). No es prudente suponer que las condiciones meteorológicas serán las mismas a más de 5 kilómetros de distancia como en la fuente.

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


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

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

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

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

Los modelos gaussianos tratan la química de SO_x y NO_x como una simple decadencia exponencial, pero no intentan abordar los mecanismos detallados de la química atmosférica. Alternativamente, pueden simular procesos químicos (por ejemplo, la producción de NO₂ a partir de NO_x), como un paso

	MANUAL TÉCNICO	Página	49 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

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) las fuentes o receptores están ubicados en terrenos complejos;
- c) los contaminantes atmosféricos se acumulan en condiciones de calma o vuelven a circular cuando el viento cambia de dirección;
- d) se experimenta periodos frecuentes de baja velocidad del viento o calma en el área de estudio;
- e) las transformaciones químicas entre especies contaminantes son importantes;
- f) los datos meteorológicos apropiados están disponibles para conducirlos;
- g) se disponga de un archivo meteorológico de buena calidad;
- h) se puede producir un archivo meteorológico de buena calidad para el área de estudio.

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 considerar utilizar un

	MANUAL TÉCNICO	Página	50 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

modelo avanzado como el CALPUFF, pues los modelos gaussianos tienen limitaciones en este tipo de condiciones.

Recomendación 6:

Para modelar la dispersión de contaminantes atmosféricos a escala regional:

- a) utilizar modelos meteorológicos de pronóstico y sus modelos de dispersión asociados;
- b) considerar la transformación de contaminantes debido a la química atmosférica.

Recomendación 7:

Seleccionar el tipo de modelo según las características de la fuente de emisión. Utilizar dimensiones y características medidas (o planificadas) para describir la fuente de emisión.

Si las dimensiones y características de la/s fuente/s de emisión no se conocen con precisión (en el caso de fuentes naturales como erupciones volcánicas) o no se han calculado, se debe considerar tanto el peor de los casos (es decir, la configuración de la fuente que resulta en la concentración más alta a nivel del suelo) como las dimensiones realistas más probables.

Recomendación 8:

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 9:

Si se ejecuta un modelo avanzando con múltiples fuentes de emisión, se debe:

- a) usar un archivo de entrada de datos meteorológicos que contenga direcciones de viento con alta resolución, para determinar cuál de las fuentes de emisión generara las concentraciones más altas;
- b) tener en cuenta el efecto potencial de la corriente descendente.

	MANUAL TÉCNICO	Página	51 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

Recomendación 10:

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

Recomendación 11:

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

Recomendación 12:

Configurar el MDCA para reflejar las condiciones de contaminación más reales o lo más cerca posible, utilizando los escenarios de modelamiento recomendados en el numeral 6.8.8 del capítulo VI.

Recomendación 13:

Cuando use modelos gaussianos, debe utilizar:

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


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

- a) haga el mejor uso de los datos meteorológicos disponibles (por ejemplo, parámetros de turbulencia medidos);
- b) sea el esquema más apropiado y útil para el caso en consideración: utilizar un análisis de sensibilidad del desempeño del modelo a los diferentes esquemas de turbulencia y dispersión para identificar la opción más apropiada y útil.


Recomendación 14:

Para la aplicabilidad del rango aproximado de los MDCA:

- a) Para los receptores de interés que se encuentren a distancias menores de 50 metros de la fuente: el AERMOD es recomendable.


	MANUAL TÉCNICO	Página	52 de 54
	ELABORACIÓN DE DOCUMENTOS TÉCNICOS SOBRE MODELAMIENTO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS		

- b) Para los receptores de interés que se encuentren a distancias entre 50 - 100 metros de la fuente, en este rango generalmente es aceptable el uso de un modelo gaussiano como AERMOD, pues los resultados para distancias mayores de aproximadamente 5 kilómetros perderán precisión debido a los cambios de viento sobre esa distancia.
- c) Para los receptores de interés que se encuentren a distancias mayores de 10 kilómetros de la fuente, es recomendable usar un modelo de mesoescala o regional que use campos de viento sobre la extensión del dominio de modelamiento.

	MANUAL TÉCNICO	Página	53 de 54
	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 interés.
- 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 interés 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 interés 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	54 de 54
	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 de interés:** 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.
- 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.