



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE  
MEDIANTE EL USO DE MODELOS DE  
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES PARA  
UNA CENTRAL ELECTRICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A:  
LUIS ENRIQUE CERVANTES CORTES**

**DIRECTOR DE TESIS:  
M. EN C. VICTOR HUGO VILLAR MARÍN**



**FES  
ZARAGOZA**

**CIUDAD DE MÉXICO.**

**Octubre 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# INDICE.

Lista de tablas.....	II
Lista de Figuras .....	III
Resumen .....	1
1.- Introducción.....	3
2.- Objetivo general .....	4
2.1 Objetivos específicos.....	4
3.- Sistema Eléctrico Nacional .....	5
4.- Contaminación atmosférica .....	13
4.1 Fuentes de contaminación atmosférica .....	13
4.2.- Contaminantes atmosféricos .....	19
4.3.- Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente .....	23
4.4 Regulación de la calidad del aire en México.....	26
5.- Dispersión de contaminantes en la atmósfera .....	31
5.2 Modelo de difusión turbulenta.....	36
5.3 La distribución Gaussiana o normal.....	37
5.4 Modelo Gaussiano de dispersión .....	39
6.- Modelado de la calidad del aire .....	47
7.- Softwares para el modelado de dispersión de contaminantes .....	50
8.- Caso práctico de aplicación del software AERMOD.....	55
Bibliografía.....	89

## Lista de tablas

Tabla 1.- Normativa aplicable para la calidad del aire en México. ....	27
Tabla 2.- Escenarios de operación de Central Termoeléctrica. ....	58
Tabla 3.- Número de receptores, mallado y dimensiones de la zona de estudio. ....	60
Tabla 4.- Tiempo de operación y consumo de combustible de la unidad convencional uno .....	62
Tabla 5.- Geometría de las chimeneas y características de las emisiones de los gases de combustión, Unidades Convencionales. ....	64
Tabla 6.- Geometría de la chimenea y características de las emisiones de los gases de combustión Unidades aeroderivadas (Power, 2023). ....	65
Tabla 7.- Estabilidad atmosférica de la zona de estudio. ....	71
Tabla 8.- Escenarios de operación para las unidades de generación de energía eléctrica. .....	79
Tabla 9.- Resultado de las modelaciones de dispersión de contaminantes. ....	80
Tabla 10.- Resultado de las modelaciones de dispersión de contaminantes. ....	85

## Lista de Figuras

Figura 1.- Regiones del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN, 2023-2037).....	6
Figura 2.- Consumo final y número de usuarios finales por GCR (2022) (PRODESEN, 2023-2037) .....	7
Figura 3.- Consumo final del SEN 2023 y 2037 (PRODESEN, 2023-2037) .....	8
Figura 4.- Desarrollo estimado de la capacidad instalada 2023-2037 (MW) (PRODESEN, 2023-2037) .....	8
Figura 5.- Porcentaje de adición de capacidad por tecnología 2023-2026 (PRODESEN, 2023-2037) .....	10
Figura 7.- Central termoeléctrica de la CFE, Manzanillo Colima (PRODESEN, 2023-2037) .....	16
Figura 8.- Emisión de gases contaminantes según el sector, año 2022. (SEMARNAT, 2023) .....	18
Figura 9.- Función de distribución Gaussiana para diferentes valores de $\mu$ y $\sigma$ . (Warner, 1992) .....	38
Figura 10.- Esquema de modelo de dispersión con una fuente equivalente a una altura efectiva H, de la chimenea (Warner, 1992) .....	40
Figura 11.- Esquema de componentes para un modelo de dispersión Gaussiano. ....	40
Figura 12.- Uso de una fuente imaginaria para describir la reflexión gaseosa en la superficie terrestre. (Warner, 1992) .....	43
Figura 13.- Efecto de la reflexión del suelo sobre la concentración de contaminantes en la dirección del viento. (Warner, 1992) .....	44
Figura 14.- Perfil de concentración a lo largo de la línea central, en la dirección $x$ y dirección $z$ . (Warner, 1992).....	46
Figura 15.- Funcionamiento de una Central Termoeléctrica Convencional (Ramírez, 2015) .....	55
Figura 16.- Funcionamiento de una unidad tipo turbogás (CENACE, 2022).....	57
Figura 23.- Área de estudio.....	59
Figura 24.- Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio .....	61
Figura 25.- Temperatura promedio mensual para la zona de estudio, 2022.....	68
Figura 26.- Temperatura máxima y mínima mensual para la zona de estudio, 2022.....	68
Figura 27.- Rosa de vientos Lerma, Campeche 2022 .....	70
Figura 28.- Área de estudio y malla cartesiana de receptores, 20 x 20 km. ....	77
Figura 29.- Curvas de isoconcentración de NO <sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Gas Natural</b> .....	81
Figura 30.- Curvas de isoconcentración de NO <sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Diésel</b> . ....	82

Figura 31.-Curvas de isoconcentración de SO <sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Diésel</b> .	82
Figura 32.-Curvas de isoconcentración de PM <sub>10</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Diésel</b> .	83
Figura 33.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Gas Natural</b> .	83
Figura 34.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Diésel</b> .	84
Figura 35.- Curvas de isoconcentración de NO <sub>2</sub> por la operación de tres unidades de generación eléctrica tipo convencionales. Operando con <b>Combustóleo</b> .	86
Figura 36.- Curvas de isoconcentración de SO <sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Combustóleo</b> .	86
Figura 37.- Curvas de isoconcentración de PM <sub>10</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Combustóleo</b> .	87
Figura 38.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con <b>Combustóleo</b> .	87

## **Dedicatorias**

A mis padres, Jesús Cervantes y Patricia Cortes. No tengo palabras para agradecerles el infinito apoyo durante mi vida académica, ustedes formaron las bases para llegar a este punto, gracias por siempre creer y confiar en mí.

A mis hermanos, David y Ana gracias por su inigualable apoyo y confianza, los amo.

A mis sobrinos, que me han enseñado el significado de paciencia y no dejan olvidarme de ese niño interior que todos tenemos.

A mis seres queridos que me han acompañado y los que ya no están, siempre fueron motivo de salir adelante, los llevo en mi corazón.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, me siento honrado de formar parte de su destacada comunidad académica, esta Universidad es mi hogar, donde me desarrollé y me preparé para un futuro, estoy profundamente agradecido por brindarme la educación para poder alcanzar este logro.

Estimado Mtro. Víctor Hugo Villar Marín, quiero expresar mi sincero agradecimiento por su valioso tiempo y asesoría para desarrollar el presente trabajo. Su inigualable experiencia y su guía han sido clave para mi desarrollo académico y profesional.

Al Ing. Alejandro Morales, por los conocimientos brindados en materia de calidad del aire y simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos, para realizar la presente tesis.

Al Ing. Vicente, Ing. Luis, Ing. Raúl y a la GPA, por darme su apoyo, brindarme su amistad y guiarme en el camino de un desarrollo profesional.

A mis grandes amigos, Santiago, Fera, Paniagua y Mario. Estoy muy agradecido de haber contado con su inigualable apoyo y amistad durante tantos años de estar juntos, gracias por todas las vivencias y experiencias.

A los profesores de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por todo su apoyo, ganas de enseñar y demostrar que las carencias no son un impedimento para dejar de hacer las cosas.

A mis queridos amigos universitarios, Alejandro, Vale, Issac, Richi, Eliseo, Jiret, Fernanda, Jhonny, Carlos, Andrés, Memo, todos aquellos que convivimos y reímos, gracias por hacer este periodo uno de los mejores. Gracias por su amistad y espero volver a vernos pronto.

Con mucho aprecio,

Enrique Cervantes.

*“Nada es imposible para aquel que lucha...”*

*Muten Roshi.*

*“Un hombre sin sueños propios, no tiene derecho a burlarse de los sueños ajenos”*

*Marshall D.*

## Simbología

$A$	Área de sección transversal
$C$	Concentración
$D$	Difusividad
$d$	Diámetro de la chimenea
$g$	Aceleración de la gravedad
$H$	Altura efectiva de la chimenea
$h$	altura verdadera de la chimenea
$\Delta h$	Elevación de la pluma
$K$	Coefficiente de difusión turbulenta
$k$	Coefficiente de transferencia de masa
$M$	Masa molar (peso molecular)
$m$	Masa
$P$	Presión
$Q$	Emisión de masa, masa por unidad de tiempo
$R$	Constante de los gases ideales
$Re$	Número de Reynolds
$t$	Tiempo
$u$	Velocidad del viento
$\sigma$	Desviación normal

## Resumen

El deterioro de la calidad del aire derivado de las diferentes actividades antropogénicas es un problema de creciente relevancia en la sociedad actual, este problema se ha convertido en una preocupación global, debido a su creciente impacto en la salud humana, la biodiversidad y el cambio climático. Este problema se ha agravado en las zonas urbanas en consecuencia de la creciente industrialización, el aumento del tráfico vehicular y demás factores antropogénicos relacionados con la aceleración en el crecimiento de la población (Gómez, 2002).

La constante liberación de contaminantes, como partículas finas, gases tóxicos y compuestos orgánicos volátiles, contribuye significativamente a la degradación de la calidad del aire y sus consecuencias negativas.

Este trabajo tiene como objetivo analizar y comprender la dispersión de contaminantes atmosféricos, centrándose en su impacto en la calidad del aire mediante el uso de un software para el desarrollo de las bases meteorológicas y la aplicación de un modelo matemático del tipo Gaussiano.

En este documento se presenta la estructura y los requerimientos mínimos necesarios que debe contener los estudios de dispersión de contaminantes a la atmósfera que se reportan a la autoridad ambiental para evaluar los posibles impactos a la calidad del aire de los proyectos de nueva construcción y/o modernización de las centrales de generación eléctrica.

Los estudios de dispersión de contaminantes atmosféricos son parte esencial en los proyectos donde el impacto sobre el medio ambiente se centra en el propio medio atmosférico. Cada vez son más los tipos de proyectos para los que la Administración Pública que exigen esta clase de estudios con el propósito de comprobar su viabilidad ambiental; siendo las Centrales de generación de energía que queman algún combustible fósil, las instalaciones de cogeneración e incineradores los casos evidentes en los que realizar un análisis del efecto de sus emisiones sobre la atmósfera es prácticamente obligado.

Es importante señalar que debido a la complejidad técnica inherente al desarrollo de estos estudios y el escaso personal técnico capacitados con este tipo de conocimientos se repercute en una serie de errores en su desarrollo; errores que obligan en la mayoría de los casos a la repetición de las modelaciones de los diferentes escenarios ocasionando retrasos en los trámites ante la autoridad ambiental, que repercute en los retrasos en la obtención de los permisos ambientales y costos económicos adicionales asociados.

La exposición de la población a los contaminantes atmosféricos está relacionada con una serie de enfermedades respiratorias y padecimientos cardiovasculares, así como a la disminución de la calidad de vida, por lo que en este documento las referencias para evaluar los impactos a la calidad del aire son las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) aplicables en materia de calidad del aire.

En el presente trabajo se describe la meteorología, la topografía del sitio de estudio y las condiciones de operación de la fuente de emisión, así como los datos mínimos necesarios para realizar la modelación de los contaminantes atmosféricos, el análisis de resultados y las conclusiones de las modelaciones.

## 1.- Introducción

La calidad del aire es un recurso vital para la salud y el bienestar de la humanidad y el entorno natural que compartimos. En un mundo en constante evolución, donde la demanda de energía eléctrica es una necesidad, las centrales eléctricas desempeñan un papel esencial en la generación de electricidad para suministrar nuestras comunidades e industrias. Sin embargo, este proceso no está exento de desafíos significativos, y uno de los problemas críticos que enfrentamos en la actualidad es la emisión de contaminantes atmosféricos como resultado de la operación de estas instalaciones.

A medida que la demanda de electricidad continúa creciendo y la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es un objetivo global, es esencial identificar y mitigar los impactos ambientales de la generación de energía eléctrica, por lo que es necesario comprender y abordar los problemas relacionados con la calidad del aire en el contexto de las centrales eléctricas de forma indispensable. Para abordar eficientemente esta problemática, es importante adoptar un enfoque integral que abarque desde la evaluación de las emisiones hasta el monitoreo de la calidad del aire y la implementación de políticas efectivas de control de contaminantes.

La relevancia de este estudio se fundamenta en la creciente conciencia de los efectos perjudiciales de la contaminación del aire en la salud humana y el medio ambiente. La exposición a contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), las partículas suspendidas (PM) y otros compuestos orgánicos volátiles (COV) están asociados con una serie de efectos adversos, que incluyen problemas respiratorios, cardiovasculares y neurológicos, así como daños en los ecosistemas y la biodiversidad.

La problemática se torna aún más crítica cuando se trata de equipos que requieran de combustibles fósiles para su funcionamiento, como son algunas centrales eléctricas, estas instalaciones pueden liberar cantidades significativas de

contaminantes a la atmósfera, que al dispersarse pueden provocar consecuencias en la calidad del aire en las áreas circundantes. La evaluación precisa de estos impactos es primordial para informar y orientar las decisiones de políticas públicas, así como para garantizar que se tomen medidas efectivas de mitigación y tratamiento.

En este sentido, los modelos de dispersión de contaminantes se convierten en herramientas de valor sustancioso para comprender y predecir cómo se distribuyen los contaminantes en la atmósfera y cómo afectan la calidad del aire en áreas específicas. Estos modelos utilizan información sobre emisiones, condiciones meteorológicas y características geográficas para simular la dispersión de contaminantes y estimar las concentraciones en las diferentes ubicaciones de interés.

## **2.- Objetivo general**

Analizar y comprender la dispersión de contaminantes atmosféricos, centrándose en su impacto en la calidad del aire y el medio ambiente, mediante el uso de un software para el desarrollo de las bases meteorológicas y la aplicación de un modelo matemático del tipo Gaussiano para la dispersión de contaminantes, que permita proporcionar una visión integral de este fenómeno, desde sus fuentes de emisión hasta su deposición final y la evaluación de sus efectos, a fin de proponer recomendaciones para su gestión y reducción.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Caracterizar los contaminantes atmosféricos en términos de su composición química y física.
- Evaluar los patrones de dispersión de contaminantes en la atmósfera, considerando factores meteorológicos y topográficos.

- Cuantificar el impacto de la contaminación atmosférica en la salud humana y el medio ambiente.
- Proporcionar recomendaciones y estrategias para la mitigación y gestión de la dispersión de contaminantes en el caso de rebasar los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normatividad aplicable en materia de calidad del aire.

### **3.- Sistema Eléctrico Nacional**

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se registró que la población del país paso de 126 millones de habitantes en 2020 a 129 millones de habitantes para el primer trimestre del 2023 (INEGI, 2023), lo que representó un aumento del 7% del uso de tecnología de acuerdo con datos del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACYT) (CONACYT, 2023) y el consecuente aumento en la demanda de suministro eléctrico. En este sentido, el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico (PRODESEN) estima un aumento en el consumo eléctrico de 2.5% anual en el periodo del 2023 al 2037 (PRODESEN, 2023-2037). Por lo anterior, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se encuentra con la obligación de cubrir esta demanda de energía eléctrica, ya sea con la construcción de nuevas Centrales de producción de energía eléctrica o con la modernización de sus Centrales existentes para aumentar la capacidad de producción de energía eléctrica.

Desde el punto de vista ambiental la CFE tiene la obligación de cumplir lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) relativo a realizar estudios técnicos que indiquen los posibles efectos que puedan ocasionar una obra o actividad sobre el medio ambiente. Para esto la CFE realiza estudios técnicos justificativos y/o Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA). Una parte importante de estos estudios implica la Evaluación de la Calidad del Aire en la zona de influencia de las Centrales y con ello conocer las posibles

afectaciones a la salud de la población aledaña, para lo cual es necesario hacer un estudio de dispersión de contaminantes.

El plan de desarrollo del sector eléctrico comienza con un análisis de la demanda y el consumo de electricidad a mediano y largo plazo, incluidas estimaciones de la demanda máxima integrada (bruta y neta) y del consumo de electricidad. De esta manera se podrá planificar eficazmente el desarrollo y ampliación de la capacidad de generación, transmisión, distribución y distribución y el suministro de insumos primarios de producción(PRODESEN, 2023-2037).

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se encuentra conformado por nueve Gerencias de Control Regional (GCR) y un pequeño sistema eléctrico aislado (Mulegé), como se muestra a continuación.



*Figura 1.- Regiones del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN, 2023-2037)*

El consumo neto nacional del SEN fue de 333.662 GWh en 2022, lo que representa un aumento de 3,4% respecto al consumo del año pasado. El aumento refleja la recuperación gradual de la economía del país luego de los daños a la salud causados por la pandemia de COVID-19, que llevó a la suspensión de algunas actividades manufactureras en todo el país (PRODESEN, 2023-2037).

Se entiende por consumo final de electricidad la energía utilizada por los diversos consumidores finales de la industria eléctrica, consumidores principales, consumidores de suministro cualificados y centros de carga remotos de autoabastecimiento. Los datos se agrupan en seis sectores de consumo: vivienda, comercio, servicios, agricultura, medianas empresas y gran industria. El consumo final del SEN se ubicó en 288,687GWh, lo que presentó un alza de 4.1% respecto al 2021, esto debido a la reapertura gradual de actividades económicas.

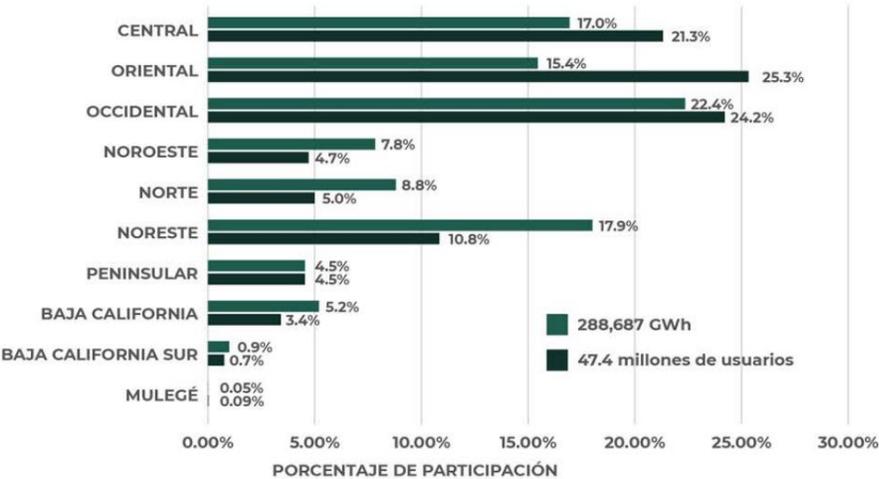


Figura 2.- Consumo final y número de usuarios finales por GCR (2022) (PRODESEN, 2023-2037)

En la Figura anterior se puede observar que la GCR Occidente concentra el 22.4% del consumo final, seguido por la GCR Noreste y Central. El número de usuarios finales que tuvieron energía eléctrica en 2022 aumentó a 47.4 millones, incrementando en 1.7% respecto a los 46.7 millones del 2021, la GCR Oriental concentra el mayor número de usuarios finales (25.3% del total). (PRODESEN, 2023-2037).

Para el periodo de 2023-2037 se estima un crecimiento de 2.8% en el consumo final, los sectores que suponen un mayor incremento son la empresa mediana, gran industria y agrícola, seguidos del residencial, comercial y el sector de servicios.

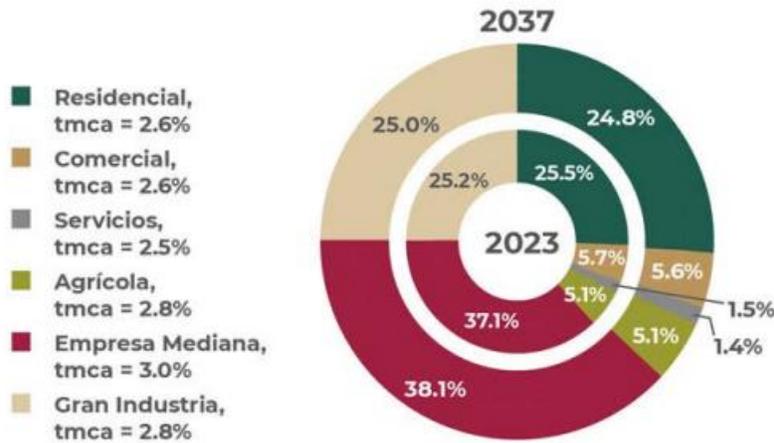


Figura 3.- Consumo final del SEN 2023 y 2037 (PRODESEN, 2023-2037)

Para el año 2037, el sector predominante será la empresa mediana con 38.1% del consumo total final del SEN, en segundo lugar, la gran industria con 25%, seguido de residencial son 24.8% y el resto con 12.1% de tasa media de crecimiento anual (tmca). Como se muestra en la Figura 3 donde todos los sectores de consumo muestran una tmca arriba del 2.5%. (PRODESEN, 2023-2037).

Entre 2018 y 2022, la capacidad instalada de generación de electricidad de México creció un 19,4%, mientras que el consumo neto creció un 7% durante el mismo período, por lo que la capacidad instalada creció más rápido que el crecimiento del consumo, lo que indica una planificación prospectiva

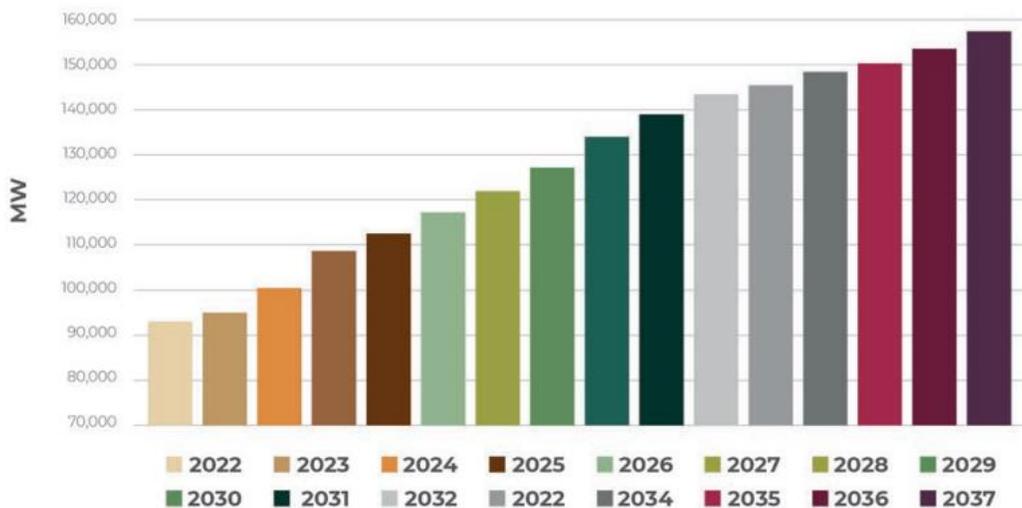


Figura 4.- Desarrollo estimado de la capacidad instalada 2023-2037 (MW) (PRODESEN, 2023-2037)

La Figura 4 describe el desarrollo acumulado estimado de la capacidad instalada del SEN en el período 2023-2037, tomando en cuenta los proyectos permanentes e indicativos del período, cuyo objetivo es promover la instalación de los medios necesarios para satisfacer el suministro eléctrico y la garantía del Sistema Eléctrico Nacional. (PRODESEN, 2023-2037).

### **Capacidad total instalada**

El SEN reporto para diciembre del 2022 una capacidad total instalada de 87,130 MW entre los diferentes productores de energía eléctrica, en los que se destaca la CFE, Productores Independientes de Energía Eléctrica (PIE), Autoabastecimiento (AU), Cogeneración (COG), Pequeña Producción (PP), Importación (IMP) y Usos Propios Continuos (UPC), con el uso de diferentes tecnologías para la producción de energía eléctrica, como son: Cogeneración Eficiente, Combustión Interna, Bioenergía, Turbogás, Fotovoltaica y Ciclo Combinado.

La Comisión Federal de Electricidad cuenta con una capacidad total instalada de 44,533 MW a junio de 2023, con el uso de distintas tecnologías para la producción de energía eléctrica. (PRODESEN, 2023-2037)

### **Adiciones a la capacidad instalada para el periodo 2023-2036**

El Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE) estima que entre 2023 y 2026 tenga lugar a una incorporación de capacidad neta a instalar de 20,428 Mega watts (MW) en el SEN.

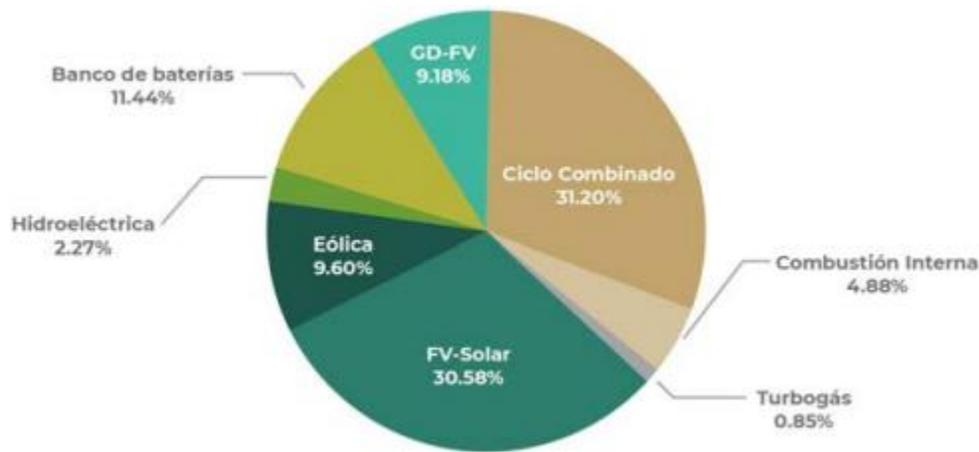


Figura 5.- Porcentaje de adición de capacidad por tecnología 2023-2026 (PRODESEN, 2023-2037)

La Figura anterior muestra una distribución en porcentaje de la incorporación de capacidad a instalar por tipo de tecnología en el periodo 2023-2026, se puede observar que este periodo se estima un 31.20% de la capacidad total a instalar por la tecnología de tipo Ciclo Combinado, siendo la que se tiene con mayor porcentaje.

### Centrales Termoeléctricas

La CFE cuenta con centrales termoeléctricas que son instalaciones industriales diseñadas para convertir la energía térmica contenida en un combustible (generalmente carbón, gas natural, derivados del petróleo o biomasa) en energía eléctrica. Estas centrales operan a través de un proceso termodinámico que involucra la generación de vapor de agua a alta presión, el cual impulsa una turbina conectada a un generador eléctrico.

Uno de los principales beneficios de las centrales termoeléctricas es la capacidad para generar grandes cantidades de electricidad de manera continua y confiable. A diferencia de fuentes de energía intermitentes como la solar o eólica, las centrales termoeléctricas pueden operar de manera constante, proporcionando una base sólida para el suministro de energía eléctrica. Esto es particularmente crucial para mantener la estabilidad de la red eléctrica y satisfacer la demanda constante de energía. (Rolf Kehlhofer, 2009).

Las centrales termoeléctricas tienen varias ventajas que son claves en comparación con otras tecnologías de generación de energía:

- **Generación Continua:** Las centrales termoeléctricas proveen una fuente constante y confiable de energía eléctrica, asegurando la estabilidad en el suministro.
- **Ubicación Versátil:** Pueden construirse en diversas ubicaciones, independientemente de las condiciones climáticas y geográficas, permitiendo su instalación cerca de fuentes de combustible.
- **Escalabilidad:** Son fácilmente escalables para satisfacer las crecientes demandas de energía de una región o país.
- **Eficiencia Mejorada:** Avances tecnológicos han mejorado la eficiencia de conversión de calor a electricidad, reduciendo costos operativos y minimizando el impacto ambiental.
- **Flexibilidad de Combustibles:** Pueden utilizar una variedad de combustibles, incluyendo carbón, gas natural, petróleo o biomasa, brindando opciones según la disponibilidad local de recursos. (Rolf Kehlhofer, 2009)

En la Figura 6 se observan las diferentes tecnologías con las que cuenta la CFE para la producción de energía eléctrica. Centrales de tipo Ciclo Combinado, Térmica Convencional, Turbogás, Combustión Interna y Carboeléctrica, estas centrales tienen algo en común, todas ellas operan con combustibles fósiles como lo es el petróleo, diésel, gas natural o carbón. (PRODESEN, 2023-2037).

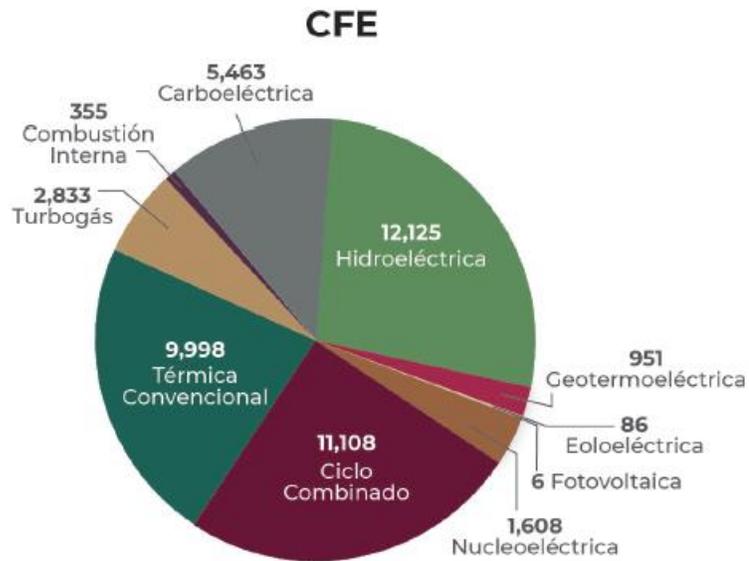


Figura 6.- Capacidad instala de la CFE al 31 de diciembre de 2022 en MW (PRODESEN, 2023-2037)

En el capítulo 4 denominado Contaminación atmosférica se describen las principales fuentes de contaminación atmosférica tanto las que se generan de manera natural como las generadas antropogénica mente; también se describen específicamente los principales contaminantes a la atmosfera que repercuten en la calidad del aire así como sus principales efectos a la salud, por últimos se describen las diferentes normas aplicables a la calidad del aire así como los valores límites máximos permisibles en el territorio nacional.

## **4.- Contaminación atmosférica**

### **4.1 Fuentes de contaminación atmosférica**

La contaminación del aire incluye elementos de origen natural y emisiones provocadas por actividades humanas (antropogénicas). Aunque los programas regulatorios se centran exclusivamente en la contaminación del aire causada por el hombre, es importante comprender que las fuentes naturales pueden interferir en los posibles impactos a la calidad del aire debido a que todas las emisiones a la atmósfera son transportadas por las corrientes de aire y las condiciones topográficas de la región interfieren de la misma manera.

#### **Naturales**

Las emisiones de contaminantes naturales varían de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones estacionales, geológicas y meteorológicas, así como los tipos de vegetación presentes. De manera similar, las actividades humanas también pueden contribuir a crear condiciones que aumenten la incidencia de contaminantes de fuentes naturales, por ejemplo, la deforestación/quema de tierras sin recuperación inmediata. Las fuentes de emisión naturales se pueden clasificar en fuentes biológicas (relacionadas con organismos vivos) y fuentes geológicas (relacionadas con procesos geológicos). (Porta, 2018).

#### **Fuentes biológicas**

Las plantas emiten COV, entre los que se incluyen compuestos oxigenados, como los aldehídos y cetonas, compuestos cíclicos y lineales generalmente insaturados, siendo el isopreno y terpenos los compuestos predominantes. Además de las plantas, las bacterias, virus, caspa y saliva de animales, polvo, ácaros de polvo y polen se consideran fuentes de contaminantes atmosféricos ya que existen muchas fuentes de emisión. (EPA, 2023)

## **Fuentes geológicas**

Las erupciones volcánicas representan una fuente natural concentrada y localizada de todo tipo de gases y partículas. De manera similar, el polvo y las partículas de la superficie transportados por fuertes vientos pueden transportarse a largas distancias y provocar altas concentraciones de partículas a corto plazo en áreas remotas.

Los incendios forestales también son fuentes importantes de partículas, CO y CO<sub>2</sub>, y los bosques vivos son fuentes importantes de COV altamente reactivos. Esta fuente es tan fuerte que puede detectarse mediante el olfato y la vista, y las emisiones se producen en zonas muy extensas. (Foster A, 2011).

## **Antropogénicas**

La población urbana y la ausencia de políticas públicas son factores que conducen a la contaminación de los recursos a largo plazo. En este sentido, los contaminantes que el ser humano libera a la atmósfera se pueden clasificar en cuatro grupos principales:

### **Fuentes domésticas**

Estas fuentes son la principal causa de emisiones de contaminantes a la atmósfera en áreas urbanas debido al calentamiento de espacios, cocina, limpieza, jardinería, pintura, lavado de ropa, etc. Antes de la revolución industrial, el fuego doméstico era la fuente de contaminación más importante debido a que los hogares contaban con sistemas de calefacción y sistemas de combustión ineficientes, aparte de contar con chimeneas notoriamente bajas.

## **Fuentes comerciales**

El percloroetileno, un hidrocarburo clorado, es el disolvente utilizado en casi todas las máquinas pequeñas de limpieza comercial. Existen establecimientos o actividades comerciales que liberan contaminantes en la atmósfera donde se incluyen restaurantes, hoteles, talleres de autos, escuelas, imprentas, tintorerías y talleres de pintura. (Porta, 2018).

## **Fuentes fijas**

Son aquellas que operan en un punto fijo, donde el foco de emisión no se desplaza en forma autónoma en un periodo de tiempo. En México, la LGEEPA las define como todas las instalaciones ubicadas en un solo lugar que están diseñadas para desarrollar actividades o procesos industriales, comerciales, de servicios, o que producen o pueden producir emisiones contaminantes a la atmósfera. En el Artículo 111 Bis y en el Artículo 11 de la (LGEEPA, 2023) se mencionan las fuentes puntuales bajo jurisdicción federal, incluyen:

## **Fuentes industriales**

Las fuentes industriales de contaminación del aire son más notables porque las emisiones generalmente están concentradas. Los procesos de combustión son una fuente común de NO<sub>x</sub>; Otra fuente de contaminación son las fábricas de fertilizantes nitrogenados y las fábricas de explosivos. El SO<sub>x</sub> también se produce durante la combustión, especialmente cuando se utiliza carbón. Otra fuente de SO<sub>x</sub> proviene de los procesos de refinación de minerales sulfurados, fundiciones de metales no ferrosos y refinerías de petróleo. El H<sub>2</sub>S se emite en grandes cantidades en fábricas de papel, plantas de procesamiento y limpieza de gas natural, refinerías de petróleo, industrias de fibras sintéticas y plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales. (Murcia, 2020)

- Los siguientes sectores industriales: químico, petrolero y petroquímico; pinturas y tintas; automotriz; celulosa y papel; acero y hierro; vidrio; generación de energía eléctrica; asbestos; cemento y cal; así como tratamiento de aguas residuales.
- Todos los establecimientos, proyectos o actividades (industrial, comercial o de servicios) administrados por entidades públicas Federales.
- Fuentes que afecten el equilibrio ecológico de un estado o país.

Estos establecimientos deben solicitar una licencia de operación, a través de la SEMARNAT.

De igual forma, anualmente deben presentar la estimación de emisiones anuales de contaminantes a través de la Cédula de Operación Anual (COA) y realizar las mediciones en chimenea requeridas por la normatividad correspondiente. (SEMARNAT, 2023)



*Figura 7.- Central termoeléctrica de la CFE, Manzanillo Colima (PRODESEN, 2023-2037)*

## **Fuentes de área**

Las fuentes de área representan aquellas que son demasiado numerosas y dispersas como para poder ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales. Colectivamente, sin embargo, las fuentes de área representan un porcentaje significativo de las emisiones de los contaminantes, por lo que deben siempre incluirse en un inventario de emisiones.

En los inventarios de fuentes de área, los datos de las emisiones se agrupan en fuentes similares o categorías. Un inventario de fuentes de área generalmente consiste en las siguientes grandes categorías:

- Combustión en fuentes fijas;
- Fuentes semiestacionarias;
- Uso de solventes;
- Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo;
- Fuentes industriales y comerciales ligeras;
- Fuentes agrícolas;
- Manejo de residuos;
- Fuentes de área misceláneas.

Cada una de estas categorías está integrada por otras subcategorías más específicas, que son determinadas por sus procesos de emisión similares o por la similitud en los métodos para estimar sus emisiones. Un inventario amplio de fuentes de área puede abarcar un número de 150 o más subcategorías de fuentes de emisión. (SEMARNAT, 2023)

## **Fuentes móviles**

Las fuentes móviles de emisión están constituidas por los vehículos automotores que incluyen automóviles, camiones y autobuses diseñados para circular en la vía pública. En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de las emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM. Debido a la magnitud de sus emisiones y a las consideraciones especiales requeridas para estimar su volumen, los vehículos automotores se manejan separadamente de otras

fuentes de área. Las emisiones de vehículos automotores están integradas por diversos contaminantes que son generados por diferentes procesos, los más comúnmente considerados son las emisiones del escape, que resultan del uso del combustible. (SEMARNAT, 2023)

Según datos del Gobierno de México en el informe del Medio Ambiente para el año 2022 en la Figura 8 se muestran las principales fuentes de emisiones de contaminantes atmosféricos donde se puede observar que sector que tuvo mayor contribución a la emisión total fue el sector de energía que participo con un 70% del total de las emisiones; le siguen la categoría de procesos industriales y uso de productos con el 8%, los sectores de agricultura y ganadería con el 5 y 10% respectivamente, y por último el sector de residuos aportó el 7% de las emisiones.

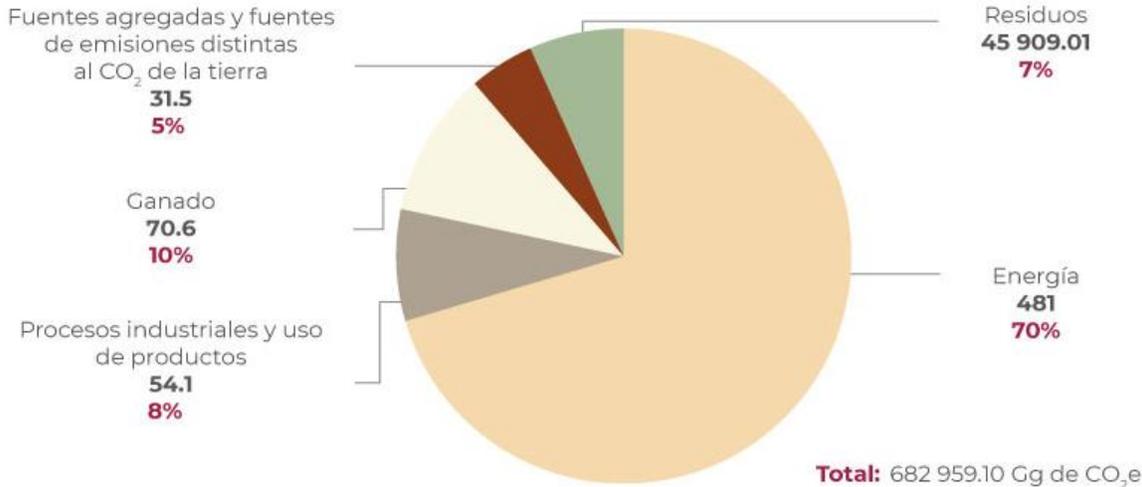


Figura 8.- Emisión de gases contaminantes según el sector, año 2022. (SEMARNAT, 2023)

## **4.2.- Contaminantes atmosféricos**

Entendiéndose que la contaminación atmosférica es la presencia de cualquier agente físico, químico o biológico, o la combinación de estos en lugares y concentraciones que puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal. La experiencia cotidiana demuestra que la contaminación atmosférica cambia constantemente con las actividades humanas y las condiciones meteorológicas, y en consecuencia este estado no puede ser considerado como estático.

Los contaminantes son clasificados por primarios y secundarios, siendo los primeros aquellos que permanecen en la atmósfera de la misma manera en la que fueron emitidos por la fuente de contaminación, los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y las partículas serían ejemplos de contaminantes primarios, mientras que los secundarios son aquellos que son generados a partir de reacciones en la atmósfera de los contaminantes primarios, el trióxido de azufre y dióxido de nitrógeno son ejemplos de estos. (Porta, 2018)

En el siguiente apartado se describen aquellos contaminantes atmosféricos que son derivados de la generación de energía eléctrica y se consideran contaminantes criterios dentro de la legislación ambiental. Los contaminantes criterios son aquellos contaminantes normados que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. (COFEPRIS, 2023)

### **Compuestos de nitrógeno**

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) comprenden un grupo de especies químicas que es la suma del monóxido de nitrógeno (NO) y del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), se producen principalmente durante los procesos de combustión en los motores, en las calderas, estufas y calentadores domésticos, entre otros, además también se

emiten durante los incendios. El compuesto de mayor importancia por sus efectos en la salud dentro de los NO<sub>x</sub>, es el NO<sub>2</sub>, que puede ser de origen primario, a partir de la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión, o secundario, por la oxidación en la atmósfera del NO, el cual tiene como fuente principal, los vehículos, sin embargo, este se oxida en la atmósfera para formar NO<sub>2</sub>; éste desempeña un rol importante en la formación de ozono troposférico en ambientes urbanos y rurales, además, los NO<sub>x</sub> son precursores de aerosoles de nitrato de amonio.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de México 2016 (SEMARNAT, 2019), se emiten 3,059,940.51 toneladas anuales de NO<sub>x</sub>, donde las fuentes móviles son el principal origen de la emisión con un 43.71%, seguida de las fuentes naturales con 37.68%, (actividad microbiana del suelo) las fuentes fijas con 14.35% (generación de energía eléctrica) y las fuentes de área con 4.26% (combustible agrícola y doméstica e incendios forestales). (NOM-023-SSA1-2021, 2020)

## **Compuestos de azufre**

Desde el comienzo de la revolución industrial, los principales componentes de la contaminación del aire han sido el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y las partículas procedentes de la quema de combustibles fósiles. En algunas ciudades del mundo, la contaminación por SO<sub>2</sub> es un problema grave, especialmente en aquellas donde se utiliza carbón u otros combustibles ricos en azufre en los hogares, la industria y los vehículos. (NOM-025-SSA1-2021, 21).

Según el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) de 2008, las fuentes que liberan aproximadamente el 97.3% de las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera son la generación de electricidad (46.98%), el petróleo y los petroquímicos (35.14%), transporte por tuberías (3.22%), alimentos (1.75%), productos químicos (4.39%), metales comunes (1.15%), papel (1.42%), productos minerales no metálicos

(1.41%), embarcaciones marítimas (0.71%) , combustión agrícola (0.68%) y turismo (0.44%), 2,180,627 toneladas anuales. (SEMARNAT, 2008).

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro con un olor fuerte e irritante, se disuelve bien en agua y aire, el SO<sub>2</sub> es higroscópico, por lo tanto, forma aerosoles de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), que son partes importantes de la llamada lluvia ácida que provoca el deterioro de los bosques, acidifica lagos, canales, ríos y suelos. La formación y duración de los aerosoles en la atmósfera depende de las condiciones climáticas y de la cantidad de contaminantes en el aire. (NOM-022-SSA1-2019, 19)

## **Partículas**

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas sólidas o líquidas que persisten en la atmósfera durante diversos períodos de tiempo y cuyas propiedades físicas y químicas dependen de su origen en ambientes urbanos y rurales, así como de la generación y tipo de precursores. Los principales componentes de las partículas son: sulfatos, nitratos, amonio, carbono elemental y orgánico, oligoelementos, sales y metales pesados. Por su origen se clasifican en naturales o provocadas por el hombre, y las emisiones directas de la fuente de contaminación se clasifican en primarias o secundarias, resultantes de reacciones químicas entre gases y partículas primarias en la atmósfera. (NOM-025-SSA1-2021, 21).

El diámetro aerodinámico es conocido como un parámetro importante que describe el comportamiento de las partículas en la atmósfera, también determina su capacidad de penetración y retención en diferentes zonas de respiración. Mientras que las partículas con un diámetro de hasta 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) penetran en el tracto respiratorio y se depositan fácilmente, las partículas con un diámetro de hasta 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) causan daños locales en las paredes del tracto respiratorio y también a nivel sistémico, dañando el tejido pulmonar. y por su posible entrada al torrente sanguíneo.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de México 2016 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se emiten 889,745 y 602,553 toneladas anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente, donde las fuentes de área son el principal origen de la emisión (combustión agrícola y doméstica de biomasa e incendios forestales) con un 68 % en  $PM_{10}$  y 65 %  $PM_{2.5}$ , seguida de las fuentes fijas (22 y 21 %) y las fuentes móviles (10 y 14 %, para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente). (NOM-025-SSA1-2021, 21)

## **Óxidos de carbono**

De acuerdo con el Inventario Nacional de emisiones de México 2016 (SEMARNAT, 2019), considerando las emisiones de monóxido de carbono (CO) se emiten 8,242,497.35 toneladas anuales, donde las fuentes móviles son la principal fuente de emisión de CO con 63.40%, seguida de las fuentes de área con 33.09% y las fuentes fijas con 3.51%. (NOM-021-SSA1-2021, 21)

El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el monóxido de carbono (CO) son los dos componentes que forman los óxidos de carbono. Generalmente, el  $CO_2$  no se considera un contaminante del aire porque es una parte natural de la atmósfera y desempeña un papel importante en el efecto invernadero. Sin embargo, actualmente existe una gran preocupación por las crecientes emisiones de este gas como producto de la combustión, que repercute negativamente en el equilibrio térmico. (Porta, 2018). Por otro lado, el CO es un contaminante que proviene principalmente de la combustión incompleta de cualquier tipo de combustible. También se produce en cantidades notablemente grandes a partir de muchas fuentes naturales, como gases volcánicos, incendios forestales y la oxidación del metano en el medio ambiente. Los vehículos con motor de combustión interna son una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono en las zonas urbanas. Estufas, calderas, calentadores de fuego directo y otros aparatos de combustión también son fuentes importantes de dióxido de carbono, tanto en exteriores como en interiores. (Porta, 2018)

### **4.3.- Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente**

Los contaminantes atmosféricos se asocian con diferentes daños a la salud humana y la magnitud de los efectos va a depender de:

- Las concentraciones existentes en el aire.
- Propiedades físicas y químicas de los contaminantes.
- Dosis que llegue a inhalarse.
- Tiempo de exposición y la frecuencia con que se someta.
- Características poblacionales (nivel socioeconómico, nutrición y genética)

Existen estudios tanto experimentales como epidemiológicos en humanos, que han señalado la exposición a contaminantes en el aire ambiente está asociada con un gran espectro de efectos adversos (agudos y crónicos), afectando la calidad de vida de la población general y de grupos vulnerables, principalmente los niños, mujeres en gestación y adultos mayores, sobre todo si padecen de enfermedades degenerativas.

Dentro de los efectos agudos, se reporta un incremento en las tasas de morbilidad, principalmente en afectaciones respiratorias, disminución de la función pulmonar, respuesta inmunológica alterada o vulnerabilidad a infecciones respiratorias y presencia de cuadros asmáticos. Es destacable el aumento en las tasas de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. (COFEPRIS, 2023).

#### **Compuestos de nitrógeno**

##### **Efectos a corto plazo**

La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (US EPA) llevó a cabo una evaluación científica integrada de los efectos del NO<sub>x</sub> en la salud y concluyó que existe una relación causal entre la exposición a corto plazo al NO<sub>2</sub> y los efectos respiratorios en las exacerbaciones del asma y sus consecuencias, reflejadas en el aumento de hospitalizaciones y situaciones de emergencia.

## **Efectos a largo plazo**

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado que los síntomas de la bronquitis en los niños aumentan con la exposición prolongada, así como el desarrollo de asma en niños y adultos, el deterioro del desarrollo de las funciones respiratorias, principalmente en los pulmones, ya que se asocia a la concentración de NO<sub>2</sub> a largo plazo. (NOM-023-SSA1-2021, 2020)

## **Compuestos de azufre**

Debido a las propiedades redox del SO<sub>2</sub>, se estima que el 95% es absorbido en las vías respiratorias superiores, donde forma iones sulfito o bisulfito al entrar en contacto con el agua del ambiente, formando una solución ácida, lo que produce respuestas moleculares y celulares, las cuales a través de mecanismos en los que interviene el estrés oxidante y la inflamación causan el incremento en la secreción de moco y bronco constricción, la inflamación del sistema respiratorio provoca tos, secreción mucosa y agravamiento del asma y la bronquitis crónica; asimismo, aumenta la propensión de las personas a contraer infecciones del sistema respiratorio. (NOM-022-SSA1-2019, 19)

Hay evidencia de que el SO<sub>2</sub> también afecta al sistema cardiovascular, aumentando las hospitalizaciones por infarto de miocardio y enfermedades coronarias y las muertes por cáncer de pulmón. En 2016, se descubrió que por cada 10 ppb, el riesgo aumentaba un 14%. (NOM-022-SSA1-2019, 19) (COFEPRIS, Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios , 2023)

## Partículas

Como se ha mencionado, los efectos que se presentan por la exposición a partículas en un tiempo de lapso corto pueden desde afectaciones respiratorias e incluso afectar las actividades cotidianas. Una exposición prolongada se considera crónica y se relaciona con el aumento en la probabilidad de sufrir muerte prematura por el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias como lo es el cáncer de pulmón, padecimientos en el sistema nervioso central y disfunciones renales. Estos efectos adversos son consecuencia de los mecanismos de toxicidad subyacentes relacionados con la respuesta inflamatoria y el estrés oxidante que inducen. (NOM-025-SSA1-2021, 21)

Las partículas que son más dañinas para la salud son las que tienen de diámetro 10 micrómetros, o menos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), ya estas que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones, bronquios y demás vasos respiratorios.

Hay una relación muy significativa entre la exposición a altas concentraciones de finas partículas ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y una mayor mortalidad diaria y a largo plazo. De lo contrario, a medida que disminuye la concentración de partículas pequeñas y finas, la mortalidad asociada a ellas también disminuye, permaneciendo constantes los demás factores. De esta manera, los encargados de tomar las decisiones pueden hacer predicciones sobre la mejora en la salud pública que podría esperarse de la reducción de la contaminación del aire por partículas. Siempre existen riesgos para la salud, aunque las emisiones de partículas son bajas, no se ha identificado ningún espectro por debajo del cual no se conozcan riesgos para la salud. (COFEPRIS, Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios , 2023)

## **Óxidos de carbono**

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, producto de la combustión incompleta de material que contiene carbono, como gasolina, gas natural, petróleo, carbón, tabaco y otros materiales orgánicos.

El CO tiene una fuerte capacidad de unirse a la hemoglobina y su inhalación produce hipoxia en el ser humano, que es un estado de deficiencia de oxígeno en las células y los tejidos, lo que compromete su función. Esto puede suceder, aunque el flujo sanguíneo sea normal y puede llevar a complicaciones fisiológicas graves, algunas potencialmente mortales. Estudios epidemiológicos han documentado ampliamente una asociación entre la exposición a corto plazo a CO y el incremento de riesgo en la mortalidad por causas cardiovasculares. (NOM-021-SSA1-2021, 21)

## **4.4 Regulación de la calidad del aire en México**

### **Normativa para la calidad del aire**

Las acciones que se llevan a cabo para proteger la salud, los gobiernos del mundo buscan controlar los niveles de contaminantes atmosféricos utilizando diversas herramientas normativas. Entre estas se encuentran las normas de calidad del aire, que establecen las concentraciones aceptables para la población en términos de los riesgos que los contaminantes representan para la salud. Dichas normas definen las concentraciones aceptables durante diferentes periodos de exposición, ya que en algunos casos se considera una concentración menor, pero durante un tiempo de exposición mayor, también representa un riesgo para la población. La Secretaría de Salud en México es el órgano responsable de evaluar los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes. (NOM-022-SSA1-2019, 19)

Para disminuir las repercusiones de la contaminación atmosférica sobre la salud pública es necesario reducir las fuentes principales de contaminación, en particular la combustión ineficiente de combustibles fósiles para el transporte y la generación

de electricidad, así como mejorar la eficiencia energética de los edificios y las fábricas. (COFEPRIS, Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios , 2023)

La siguiente tabla resume los indicadores con los que se evalúa el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) de salud con respecto a cada uno de los contaminantes.

<b>Contaminante</b>	<b>Dato base de evaluación</b>	<b>Valor máximo permisible (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>) *</b>	<b>Norma Oficial Mexicana</b>
NO <sub>2</sub>	1 hora	200	NOM-023-SSA1-2021
	Anual	40	
SO <sub>2</sub>	24 horas	104.8	NOM-022-SSA1-2019
PM <sub>10</sub>	24 horas	70	NOM-025-SSA1-2021
	Anual	36	
PM <sub>2.5</sub>	24 horas	41	NOM-025-SSA1-2021
	Anual	10	
CO	1 hora	30, 000	NOM-021-SSA1-2021
	8 horas	10, 000	

*Tabla 1.- Normativa aplicable para la calidad del aire en México.*

\* $\mu\text{g}/\text{m}^3$  Microgramos sobre metro cúbico.

En la tabla anterior se muestra el tipo de contaminante, el dato base de evaluación o tiempo de exposición, los valores máximos permisibles y la norma aplicable a cada uno de estos contaminantes atmosféricos.

Posteriormente se realizará un caso ejemplo, donde los resultados de la modelación se compararán con las normas de calidad del aire para los contaminantes requeridos.

## **Instituciones gubernamentales**

En este contexto, las instituciones gubernamentales juegan un papel crucial en la supervisión, regulación y gestión de la industria eléctrica y la calidad del aire. En México, varias instituciones públicas están involucradas en este proceso, cada una con su propia misión y responsabilidades específicas.

### **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**

El INEGI, es una institución mexicana que desempeña un papel central en la recopilación y difusión de información estadística y geográfica. Esta institución tiene la responsabilidad de proporcionar datos precisos y actualizados sobre diversos aspectos de la sociedad mexicana. El INEGI recopila información vital para la toma de decisiones gubernamentales y la formulación de políticas públicas. (INEGI, 2023)

### **Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)**

El PRODESEN es una iniciativa clave en México que establece las directrices y estrategias para el desarrollo y la expansión del sistema eléctrico del país. PRODESEN es fundamental para garantizar la seguridad energética y la disponibilidad de electricidad en todo México. Además, juega un papel importante en la promoción de fuentes de energía más limpias y en la reducción de emisiones contaminantes en el sector eléctrico. (PRODESEN, 2023-2037)

### **Secretaría de Energía (SENER)**

La SENER es el órgano gubernamental encargado de la formulación y ejecución de políticas relacionadas con el sector energético en México. SENER desempeña un papel esencial en la promoción de la eficiencia energética y el desarrollo sostenible, lo que incluye la supervisión de la generación de energía eléctrica. (SENER, 2021)

### **Comisión Reguladora de Energía (CRE)**

La CRE es la entidad encargada de regular y supervisar la industria eléctrica en México. Entre sus responsabilidades se encuentra la emisión de permisos y concesiones para la generación de electricidad, así como la supervisión de las prácticas de mercado y la promoción de la competencia en el sector. (CRE, 2021)

### **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)**

La SEMARNAT es la entidad gubernamental encargada de la protección y preservación del medio ambiente en México. SEMARNAT desarrolla políticas y programas destinados a mitigar los impactos ambientales de diversas actividades humanas, incluyendo la generación de energía eléctrica. La SEMARNAT establece normativas y estándares ambientales que deben cumplirse para garantizar la calidad del aire y la protección de la salud pública. (SEMARNAT, 2023)

### **Comisión Federal de Electricidad (CFE)**

La CFE es una empresa productiva del estado que opera en el sector eléctrico. La CFE es una de las principales compañías de generación y distribución de electricidad en México. Como entidad líder en la generación de energía eléctrica, la CFE tiene un papel crítico en la implementación de tecnologías más limpias y en la reducción de emisiones contaminantes en sus instalaciones. (CFE, 2023)

Estas instituciones, colaboran en la supervisión y regulación del sector eléctrico y la calidad del aire en México. Su participación es esencial para garantizar que la generación de energía eléctrica se realice de manera sostenible y que se minimicen los impactos adversos en la calidad del aire y la salud pública.

Un método para evaluar los posibles impactos a la calidad del aire es aquel que tiene como herramienta principal a los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes atmosféricos, estos permiten hacer una estimación de la concentración de un contaminante en la atmosfera utilizando ecuaciones algebraicas y diferenciales para describir los aspectos físicos y químicos del proceso.

En el capítulo 5 “Dispersión de contaminantes en la atmósfera” se describe el modelo de difusión turbulenta, el cual es el punto de partida para el desarrollo matemático de las ecuaciones que componen los modelos de dispersión de contaminantes, también se describe la distribución normal y sus principales características hasta llegar al modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes atmosféricos el cual se tomara como modelo principal de desarrollo del presente trabajo.

## 5.- Dispersión de contaminantes en la atmósfera

La dispersión de contaminantes en la atmósfera es un tema de creciente importancia en la actualidad debido al aumento en la actividad industrial y energética a nivel global. La liberación de contaminantes atmosféricos por parte de fuentes antropogénicas, como centrales eléctricas, refinerías y procesos industriales, ha generado preocupaciones significativas en relación con la calidad del aire y sus impactos en la salud humana y el medio ambiente.

La evaluación de la calidad del aire es esencial para comprender los riesgos asociados con la emisión de contaminantes atmosféricos. Los modelos de dispersión se han convertido en una herramienta esencial para la investigación de la contaminación atmosférica y la planificación urbana e industrial. Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, la modelación permite conocer, entre otras cosas, cómo la concentración de una sustancia de interés cambia a lo largo del tiempo y el espacio, identificada como contaminante, con el objetivo de predecir y analizar la calidad del aire, de esta manera, colaborando en las decisiones de política y planificación relacionadas con la gestión, a través del desarrollo de planes, programas, proyectos y estándares de emisiones o calidad del aire. (Hanna, 2019.)

La dispersión en la atmósfera de los efluentes que proceden de respiraderos y chimeneas depende de muchos factores correlacionados, como pueden ser la naturaleza física y química de los efluentes, las características meteorológicas del ambiente, la ubicación de la chimenea y la naturaleza del terreno.

Los efluentes de las chimeneas pueden consistir en gases solos, o gases y partículas. Si las partículas son de un diámetro de 20  $\mu\text{m}$  o menores, tienen una velocidad de sedimentación tan baja que se mueven esencialmente igual que el gas en el que están sumergidas.

Para alcanzar la máxima dispersión, los efluentes deberán salir de la chimenea con suficiente cantidad de movimiento y capacidad de flotación, a fin de que continúe su ascenso luego de la salida. Cuando el viento no tiene una velocidad suficiente, las

<sup>1</sup>plumas de baja densidad tienden a alcanzar grandes elevaciones, con las consecuentes bajas concentraciones cerca del nivel del suelo.

La alta velocidad del viento aumenta la acción diluyente de la atmósfera originando más bajas concentraciones a nivel del suelo, en la dirección del viento con respecto a la chimenea. El ascenso de las plumas de alta temperatura la causa casi en su totalidad la flotación debida a la más alta temperatura de los gases, cuando la pluma se desvía en el viento, se diluye a lo largo de su eje de dispersión proporcional a la velocidad promedio del viento, a la altura de la pluma, de manera que se reduce la capacidad de flotación. En el aire estratificado, la flotación de la pluma se disipa como resultado de la estabilidad de la atmósfera circundante, que se caracteriza por el gradiente de temperatura. Cuando existen condiciones neutrales en la atmosfera, la pluma se difunde por turbulencia, cuya intensidad es una función de la rugosidad del terreno, la altura y la velocidad del viento. (Warner, 1992)

### **Clasificación de los modelos de dispersión**

Existen numerosas clasificaciones de los modelos; en función de su aplicación, del método de resolución de las ecuaciones, de la escala espacial, etc. Una clasificación ampliamente utilizada, es aquella que diferencia la herramienta con la que se representan los mecanismos de emisión-dispersión. Si bien existen modelos basados en experimentos de laboratorio que han permitido identificar algunos mecanismos del transporte de contaminantes atmosféricos, el problema global solo ha sido abordado por los modelos matemáticos. Por esta razón se presenta una diferencia entre los modelos físicos y los modelos matemáticos.

Las principales clasificaciones se presentan a continuación.

---

<sup>1</sup> Corriente de aire identificable, con una temperatura o composición diferente a la de su ambiente.

## **Modo de enfocar el problema**

**Orientados al receptor**, son los que intentan de reconstruir la contribución de cada foco emisor a cada foco receptor considerado, de forma general sin tener en cuenta los patrones de dispersión que siguen los contaminantes. (Garcés & Haza, 2015)

**Orientados al foco emisor**, también conocidos como modelos de dispersión atmosférica, tratan de definir la distribución de una sustancia química o partícula, que se emite a la atmósfera con base en la representación matemática de los diferentes fenómenos de transporte que puede experimentar dicha sustancia. (Garcés & Haza, 2015)

## **Escala espacial**

**Regionales o nacionales**, son utilizados para el estudio del transporte y la dispersión de contaminantes a grandes distancias (de 100 a 1500 km). Generalmente, utilizan datos meteorológicos históricos. (Garcés & Haza, 2015)

**Locales**, evalúan la convección y dispersión de los contaminantes emitidos en distancias relativamente pequeñas (de 1 a 100 km). Por su alcance, estos fenómenos se circunscriben casi exclusivamente a la capa límite planetaria. Requieren de una descripción meteorológica detallada de la zona de aplicación.

## **Dominio y resolución temporal**

**Climatológicos**, utilizan patrones meteorológicos históricos para obtener valores medios de concentraciones de inmisión, estacionales o anuales.

**Mediano plazo**, se establecen para períodos de tiempo de unos días a unas semanas. Pueden combinar datos históricos con predicciones meteorológicas al fin de obtener una descripción aproximada de la dinámica atmosférica en ese período. Se obtienen medias diarias. (Garcés & Haza, 2015)

**Episódicos**, se utilizan para el estudio de la dispersión en condiciones anómalas de unas horas a unos días. Requieren de una descripción y un análisis exhaustivo del evento y de los patrones meteorológicos, para obtener valores de inmisión (generalmente horarios).

**Simulación en tiempo real**, intenta aplicar un modelo de tipo episódico alimentado con predicciones meteorológicas a corto plazo, o con medidas recibidas en tiempo real. Requiere de un compromiso entre la complejidad del modelo y su tiempo de respuesta. Generalmente, son modelos locales.

## **Método de resolución**

### **Modelos analíticos**

Se caracterizan por ser una solución analítica de las ecuaciones que gobiernan la dispersión de contaminantes, lo cual es posible debido a las numerosas simplificaciones que se consideran al plantear el problema. Son útiles para obtener una primera aproximación al problema. Dentro de estos modelos se encuentran dos más reconocidos, a continuación, se describen.

**Modelos de caja,** Este modelo es el más sencillo y trata la zona de estudio como un sistema cerrado en el que se mueven los contaminantes por impulso del viento. Son modelos mecánicos que suelen incorporar un módulo químico para simular la transformación de los contaminantes.

**Modelo Gaussiano,** Este modelo es el más utilizado. Considera que la pluma emitida sigue una distribución gaussiana perpendicular al movimiento colectivo principal. De este modo se pretende simular la dispersión de los contaminantes en la dirección del viento dominante.

### **Modelos numéricos**

Estos modelos se caracterizan por abordar la solución de las ecuaciones gobernantes de una manera aproximada, mediante métodos numéricos tales como diferencias finitas, elementos finitos, etc. A comparación con los modelos anteriores, requieren de datos de entrada más complejos y por lo tanto requieren de un análisis más exhaustivo, lo que se traduce en la participación de un experto en el tema. Existen dos tipos principales de este tipo de modelo los cuales se describen a continuación.

**Modelos Euleriano,** estos modelos utilizan un sistema de referencia absoluto y tratan de estimar la dispersión a este sistema mediante soluciones de integración numérica.

**Modelos Lagrangianos,** en este modelo se tienen dos sistemas de coordenadas para el cálculo del desplazamiento de contaminantes; el primero es el absoluto, referido a las coordenadas del foco emisor, en el que se calcula la traslación media de los elementos de contaminante considerado; otro sistema es el relativo, el cual está referido a un punto representativo de la traslación media de la pluma, para obtener una mejor descripción de la dispersión debido a la turbulencia. (Porta, 2018)

Se profundizará en la descripción de un modelo presentado anteriormente, los modelos Gaussianos, es necesario contar con un conocimiento previo en cuanto a calidad del aire para el desarrollo de los parámetros.

## 5.2 Modelo de difusión turbulenta

El modelo de difusión turbulenta está basado en el enfoque más completo de la teoría de transporte, que implica a su vez el concepto de “longitud de mezclado”. Esto constituye el punto inicial en el desarrollo del modelo para la dispersión en la atmosfera. La ecuación básica de este modelo es muy compleja, por lo que se hacen suposiciones de poca importancia, se presenta como:

$$\frac{dC}{dt} = k_{xx} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + k_{yy} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + k_{zz} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (8.1)$$

Donde  $C$  es la concentración,  $t$  es el tiempo, y las magnitudes  $K_{ii}$  son los coeficientes de difusión turbulenta en la dirección de los tres ejes de coordenadas. Esta ecuación se conoce como la ecuación de *difusión de Fick*. Aunque se trate de una forma simplificada es de difícil aplicación, por tanto, se hacen las siguientes suposiciones adicionales:

- La concentración del contaminante emana de una fuente puntual y continua.
- El proceso es de estado estacionario, por tanto,  $\frac{dC}{dt} = 0$
- Se escoge la principal dirección del transporte debido al viento, para que se vaya a lo largo del eje  $x$ .
- Se selecciona la velocidad del viento ( $u$ ), para que sea constante en cualquier punto del sistema de coordenadas  $x, y, z$ .
- El transporte de contaminantes debido al viento en la dirección  $x$  predomina sobre la difusión descendente, esto es,  $u \left( \frac{dC}{dx} \right) \gg k_{xx} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$ .

Con estas suposiciones la ecuación de difusión de Fick se reduce a

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = k_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (8.2)$$

Donde  $k_{yy} \neq k_{zz}$ . La solución para la ecuación (8.2) debe cumplir con las siguientes condiciones de frontera:

- $C \rightarrow \infty$ , cuando  $x \rightarrow 0$  (Gran concentración en la fuente puntual)

- $C \rightarrow 0$ , cuando  $x, y, z \rightarrow \infty$  (Concentración es cero a una gran distancia de la fuente)
- $k_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \rightarrow 0$  cuando  $z \rightarrow 0$  (No hay difusión en la superficie)
- $\int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty u C(x, y, z) dy dz = Q, x > 0$  (La tasa de transporte del contaminante en la dirección del viento es constante e igual a la tasa de emisión  $Q$  del contaminante en la fuente)

### 5.3 La distribución Gaussiana o normal

A pesar de que son posibles varios enfoques del problema, generalmente se necesitan cierto número de suposiciones simplificadoras en cualquier caso a fin de obtener una solución de mejor manejo. Debido a esto resulta que todas las teorías tienden a llegar a la misma función de distribución para la concentración del contaminante, una función de distribución Gaussiana. Para comprender este tipo de función de distribución en el contexto de contaminación del aire, es conveniente revisar las características generales de la distribución Gaussiana.

Se dice que una variable  $x$  está normalmente distribuida si la función de la densidad  $f(x)$  satisface la relación

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} e^{\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (8.3)$$

Donde  $\mu$  es cualquier número real y  $\sigma$  es cualquier número real con un valor mayor a cero. La magnitud  $\sigma$  se conoce como la desviación normal. El valor de  $f(x)$  es la altura vertical sobre el eje horizontal. El valor de  $\mu$  establece la situación del valor máximo de  $f(x)$  sobre el eje  $x$ , y la curva es simétrica con respecto a la posición de  $\mu$ . Cuando  $\mu = 0$ , la curva es simétrica alrededor del eje  $x = 0$ . Por lo tanto, se desplaza simplemente la posición de la curva de distribución total con respecto a  $x = 0$ .

La función de distribución Gaussiana de la ecuación (8.3) está en una forma normalizada. Esto es el área bajo la curva tiene un valor igual a la unidad. La función de  $\sigma$  es el de ensanchar o estrechar la forma de la curva, pero manteniendo siempre un área unitaria bajo la curva. La desviación normal,  $\sigma$  es una medida de la posición del punto de inflexión a cada lado de la curva, cuando  $\sigma$  aumenta, como se muestra en el caso de  $\sigma_2$  versus  $\sigma_1$  centradas en  $x = 0$ , en la Figura 8, el valor máximo de  $f(x)$  disminuye, pero  $f(x)$  mantiene un valor significativo sobre un rango más amplio alrededor del eje mayor. Esta condición es necesaria si el área de ambas curvas centradas para  $x = 0$  ha de ser la misma. En general, más del 68% del área bajo la curva esta entre  $+\sigma$  y  $-\sigma$ , y más del 95% está entre  $\pm 2\sigma$ .

Este aumento en la amplitud de la función de distribución, según aumenta  $\sigma$  tiene un importante significado físico en la dispersión de contaminantes.

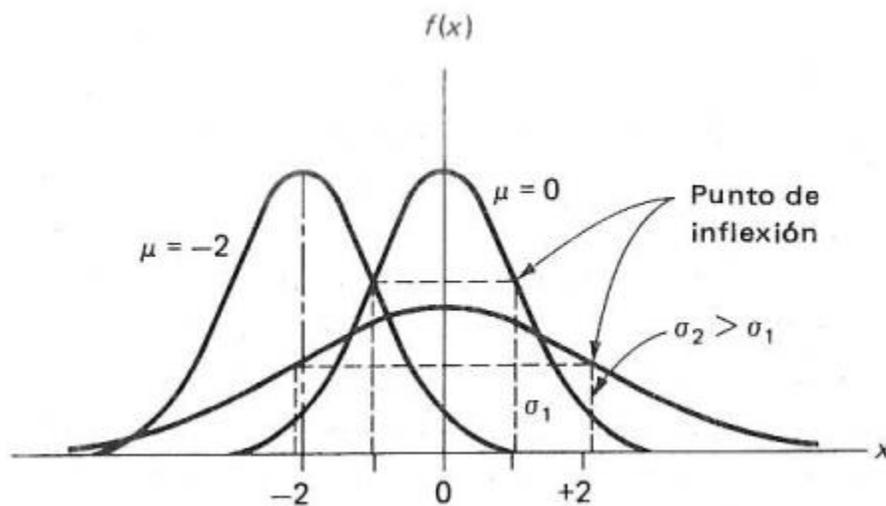


Figura 9.- Función de distribución Gaussiana para diferentes valores de  $\mu$  y  $\sigma$ . (Warner, 1992)

Es importante recordar el papel de  $\mu$  y  $\sigma$  en la determinación y posición general de la función de distribución Gaussiana, según se desarrollan las ecuaciones de la dispersión atmosférica para las diversas situaciones. En general, estas ecuaciones de dispersión tomarán el formato de una doble distribución Gaussiana en dos direcciones coordenadas, como  $y$  y  $z$ , es el producto de las distribuciones Gaussianas sencillas en cada una de las direcciones coordenadas, por tanto.

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{\left[-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (8.4)$$

Donde  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\mu_y$  y  $\mu_z$  tienen esencialmente la misma interpretación que el caso de la distribución Gaussiana simple. Esta ecuación (8.4) será necesaria para comparación en los siguientes puntos. (Warner, 1992)

## 5.4 Modelo Gaussiano de dispersión

La finalidad de un modelo matemático de la dispersión atmosférica es simular el comportamiento de los contaminantes emitidos desde fuentes que se encuentran a nivel del terreno o a una altura tal como la de una chimenea. Para fuentes localizadas en un punto, como en el caso de una chimenea, el aspecto general de la pluma se podría representar por el esquema que se observa en la Figura 8. Aunque la pluma tiene su origen a una altura  $h$  de la chimenea, se eleva una altura adicional, representado con  $\Delta h$ , debido a la flotabilidad de los gases calientes y al impulso de los gases que salen verticalmente de la chimenea a una velocidad  $V_s$ . Por lo tanto, la pluma aparece como si se originara en una fuente puntual a una altura equivalente de la chimenea,  $H = h + \Delta h$ .

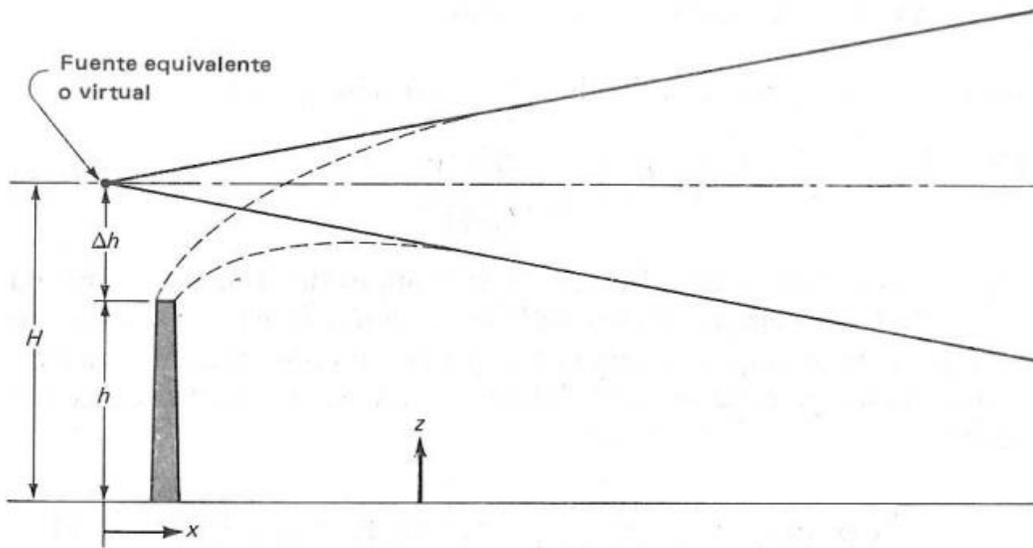


Figura 10.- Esquema de modelo de dispersión con una fuente equivalente a una altura efectiva  $H$ , de la chimenea (Warner, 1992)

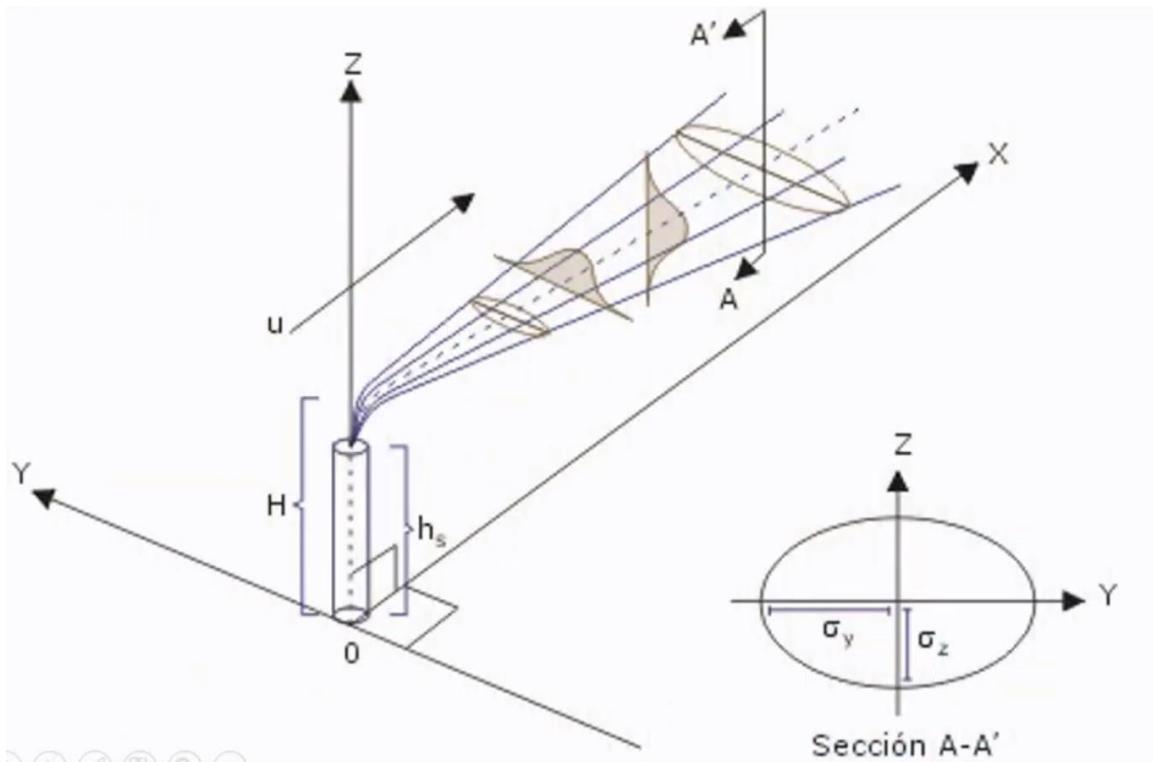


Figura 11.- Esquema de componentes para un modelo de dispersión Gaussiano.

Este modelo se basa en la difusión de la masa del contaminante en las direcciones  $y$  y  $z$  cuando un elemento fluido es arrastrado en la dirección  $x$  con una velocidad del viento  $u$ . Para este modelo es necesario realizar varias suposiciones las cuales son:

- Estado estacionario.
- La difusión de masa es despreciable en el eje  $x$ .
- La velocidad del viento  $u$  se considera constante, debido a que las variaciones de esta en los tres ejes son muy pequeñas.
- La dispersión turbulenta es mucho menos que el transporte convectivo.
- Contaminante no reactivo.
- Los coeficientes de dispersión transversal y vertical son constantes.
- El flujo es paralelo al terreno, que es considerado plano.

Es común no considerar la distancia desde la fuente equivalente o virtual hasta la posición actual de la chimenea, por lo tanto, la fuente puntual parece estar situada en  $x = 0$  y una altura  $H$ .

Una representación adecuada del perfil de la concentración a favor del viento está dada por la siguiente ecuación.

$$C = k_x^{-1} e^{-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right) \frac{u}{4x}} \quad (8.5)$$

Donde  $K$  es una constante arbitraria cuyo valor está determinado por las condiciones de frontera del problema atmosférico específico. (Warner, 1992)

### Fuente puntual a nivel del suelo

Para una fuente puntual individual, la expresión apropiada para  $K$  es

$$K = \frac{Q}{2\pi(D_y D_z)^{1/2}} \quad (8.6)$$

Donde  $Q$  es la fuerza de la fuente de emisión (la masa emitida por unidad de tiempo). Al sustituir la ecuación (8.6) en la ecuación (8.5), se encuentra que la concentración

de un contaminante emitido de una fuente puntual a nivel del suelo está representada por la expresión

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi(D_y D_z)^{1/2}} e^{-\left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z}\right) \frac{u}{4x}} \quad (8.7)$$

Esta ecuación tiene el formato de la distribución Gaussiana doble, según se expresa por la ecuación (8.4), para una fuente a nivel del suelo la máxima concentración en las direcciones  $y$  y  $z$  deberá tener lugar a lo largo de la línea central a nivel del suelo, los valores de  $\mu_y$  y  $\mu_z$  en la ecuación (8.4) serán cero para esta situación física. Por lo tanto, la ecuación (8.4) se reduce a la siguiente forma.

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\left[\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]}$$

Se considera conveniente reorganizar la ecuación (8.7) en una forma similar a la expresión anterior. Estableciendo las siguientes definiciones a fin de efectuar dicha transformación:

$$\sigma_y^2 \equiv \frac{2D_y x}{u} \quad \sigma_z^2 \equiv \frac{2D_z x}{u} \quad (8.8)$$

La sustitución de estas dos definiciones en la ecuación (8.7) lleva a la relación para la concentración a favor del viento desde una fuente puntual a nivel del suelo:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad (8.9)$$

Cuando se reordena la ecuación (8.9) de manera que el lado izquierdo sea igual a  $Cu/2Q$ , el lado derecho tendrá entonces el idéntico formato de la  $f(x, z)$  y es del tipo Gaussian doble.

Las unidades para la concentración gaseosa  $C$  se determinan por las unidades utilizadas para expresar las magnitudes  $Q$ ,  $u$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Generalmente las unidades de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  están dadas en metros ( $m$ ),  $u$  en metros por segundo ( $m/s$ ). Si se desea el

valor de la  $C$  en microgramos por metro cubico ( $\mu g/m^3$ ), la tasa de emisión  $Q$  deberá estar expresada en microgramos por segundo ( $\mu g/s$ ). (Warner, 1992)

### Fuente puntual a la altura $H$ por encima del suelo, con reflexión

Para la emisión de una chimenea con una altura efectiva  $H$ , es necesario alterar el término exponencial que contiene  $z^2$  en la ecuación (8.7). Al realizar una serie de consideraciones se tiene que, para una fuente de emisión en un punto elevado, *sin reflexión*, el valor  $C$  será.

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad (8.10)$$

La restricción “sin reflexión” es sumamente importante. La ecuación anterior constituye una expresión adecuada para la concentración en la dirección del viento, hasta llegar a un punto en la dirección  $x$  donde sea significativa la concentración a nivel del suelo ( $z = 0$ ). Tendrá lugar una apreciable “reflexión” del contaminante gaseoso, al difundirse regresivamente en la atmosfera desde el nivel del terreno.

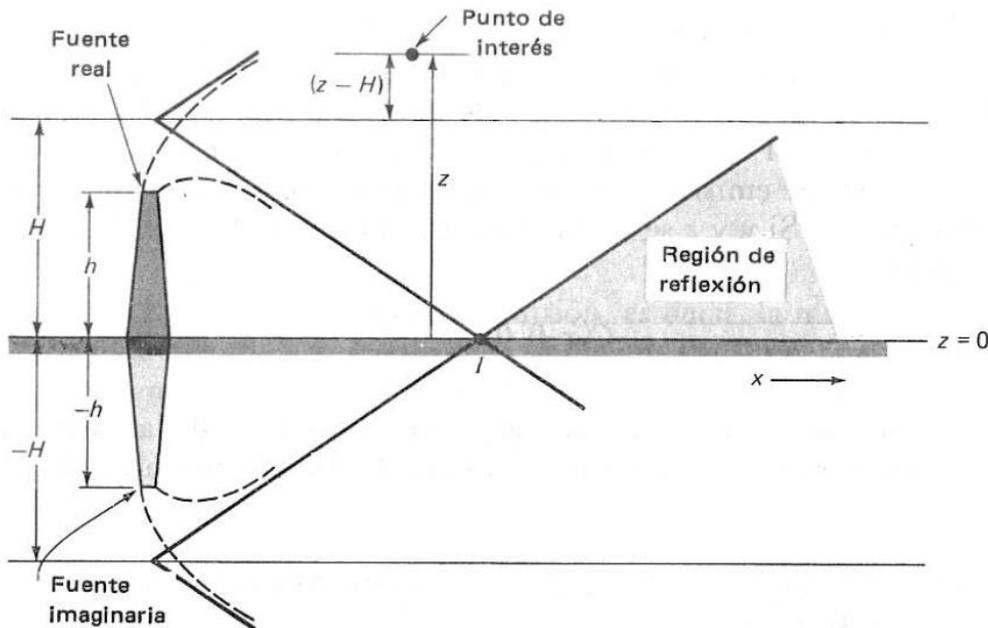


Figura 12.- Uso de una fuente imaginaria para describir la reflexión gaseosa en la superficie terrestre.

(Warner, 1992)

Para tener en cuenta la reflexión regresiva de un contaminante a la atmosfera, una vez que haya llegado al terreno, tomando como referencia la Figura 11, se puede observar que la reflexión a cierta distancia  $x$  es matemáticamente equivalente a tener en  $-H$  una imagen espejo de la fuente. El área sombreada más lejana a la posición  $I$  en la Figura indica la región de la atmosfera en donde la concentración incrementará sobre la suministrada comúnmente por la fuente  $H$ . Esta concentración aumentada se determina matemáticamente por superposición lineal de dos curvas de concentración de tipo Gaussiana, una centrada en  $H$  y la otra en  $-H$ . Esto es equivalente a sumar dos ecuaciones como la ecuación (8.10), con la diferencia que una de las ecuaciones contiene el termino  $(z + H)$ , en vez del termino  $(z - H)$ . Teniendo como resultado que la ecuación para la concentración de una fuente elevada con reflexión tenga la forma.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left[ e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (8.11)$$

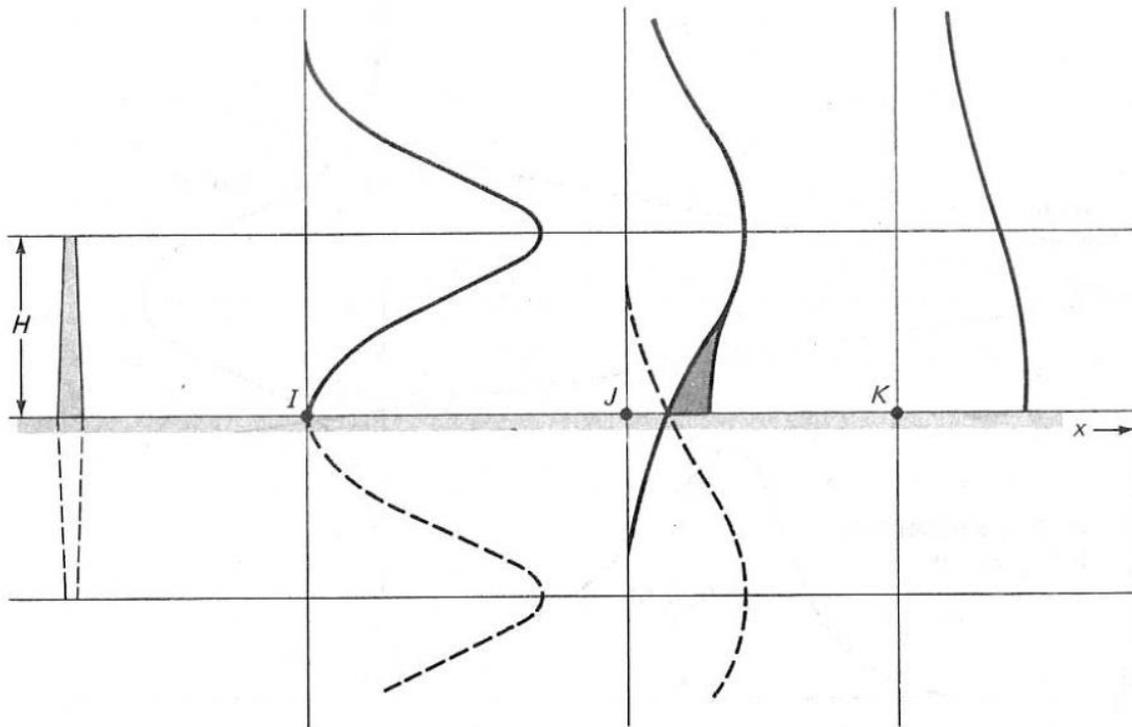


Figura 13.- Efecto de la reflexión del suelo sobre la concentración de contaminantes en la dirección del viento. (Warner, 1992)

El efecto de la reflexión del suelo sobre la concentración de contaminantes por encima del nivel del suelo se muestra en la Figura 12. En la posición *I* las dos curvas de tipo Gaussiano no pronostican ninguna superposición de la concentración, pero en las posiciones a favor del viento desde *I*, la superposición resultara significativa y aumentara con *x*. En la posición *J* en la dirección del viento la superposición es apreciable, al añadir aquella porción de la curva inferior que se extiende por encima del nivel del terreno ( $z = 0$ ) a la curva superior, se encuentra que la curva de concentración superior se altera por la adición del área sombreada. A cierta distancia *K* alejada de *J* en dirección del viento, la contribución de la parte sombreada debido a la reflexión podrá llevar al perfil mostrado en *K* de la Figura 12. Debido a esto se concluye que el efecto de la reflexión a nivel del suelo resulta en aumento de la concentración a nivel del suelo, en una cantidad muy por encima de la que se calcularía sin reflexión.

Cuando se considera reflexión a nivel del terreno se debe modificar la ecuación (8.11) para representar la concentración a nivel del suelo, considerando  $z = 0$ , se obtiene la siguiente ecuación.

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}} e^{\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (8.12)$$

Si se desea la concentración a nivel del suelo y en la línea central, el último término exponencial será igual a uno.

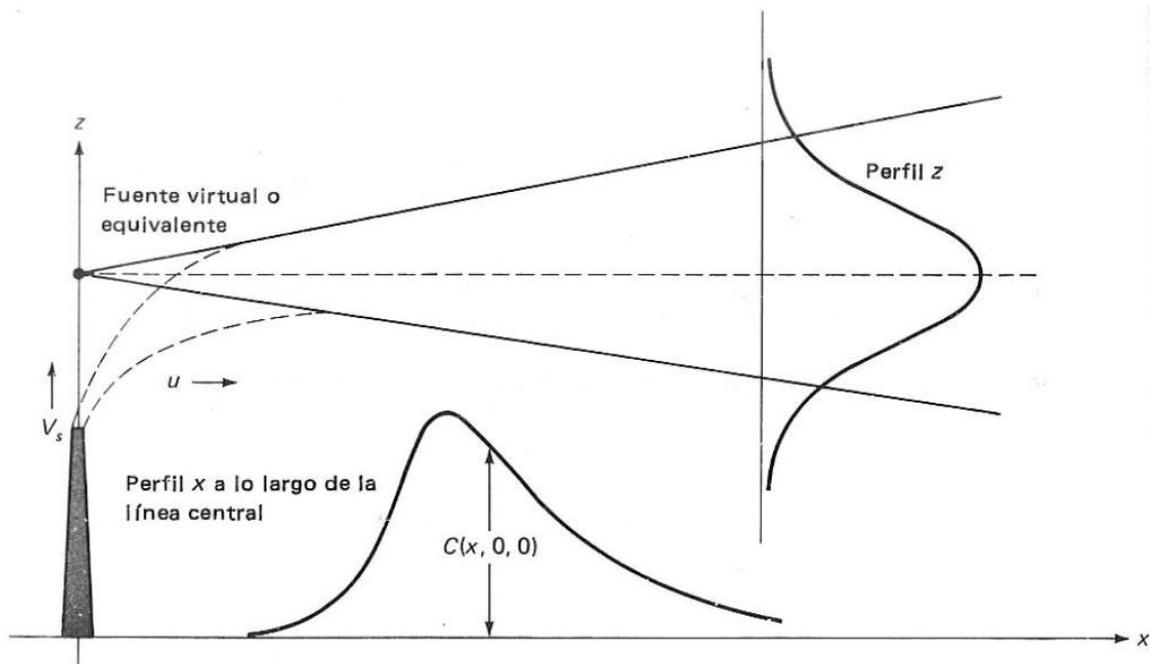


Figura 14.- Perfil de concentración a lo largo de la línea central, en la dirección  $x$  y dirección  $z$ . (Warner, 1992)

Un perfil de concentración en la dirección  $z$  y un perfil en la dirección  $x$  a lo largo de la línea central y a nivel del suelo, se encontraría superpuesto en un esquema de proceso de difusión de una chimenea elevada en la Figura 13. Notando que la distribución en la dirección  $z$  está centrada en la altura efectiva  $H$  de la chimenea. Además, la concentración a lo largo de la línea central y en la dirección del viento, se hace mínima para un cierto valor de  $x$  para luego disminuir con el aumento en los valores de  $x$ . De igual forma será válido un perfil similar al de la dirección  $z$ , pero en la dirección  $y$ .

Las ecuaciones descritas en este capítulo son las bases para desarrollar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, sin embargo, al igual que el desarrollo de las ecuaciones, el modelado de la calidad del aire cuenta con varios enfoques o consideraciones antes de poder realizar una modelación de calidad del aire. En el capítulo 6 se describen los modelos existentes, así como el enfoque que estos pueden llegar a tomar para una aplicación en específico.

## **6.- Modelado de la calidad del aire**

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmosfera. Basados en datos meteorológicos e información de la fuente de emisión como tasas de emisión, altura de chimenea, velocidad de salida de los gases, temperatura de salida de los gases, entre otros. Estos modelos están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten a la atmosfera y, en algunos casos, los contaminantes secundarios que se forman como resultados de reacciones químicas complejas en la atmosfera. Estos modelos son importantes para los sistemas de gestión de calidad del aire ya que son ampliamente utilizados por agencias encargadas de controlar la contaminación del aire para identificar las fuentes que contribuyen a los problemas de calidad del aire y ayudar en el diseño de estrategias para reducir los contaminantes nocivos de la atmosfera. (Massolo, 2022)

Se pueden utilizar los modelos de calidad del aire durante el proceso de obtención de permisos para verificar que una nueva fuente de emisión no exceda la normativa de calidad del aire ambiente o, si es necesario, determinar los requisitos de control adicionales para la emisión de contaminantes. (EPA, Managing Air Quality - Air Quality Modeling, 2023)

Los modelos de calidad del aire más utilizados son los modelos fotoquímicos, de receptores y de dispersión.

### **Modelado fotoquímico de la calidad del aire**

Los modelos fotoquímicos de calidad del aire se han convertido en herramientas reconocidas y utilizadas habitualmente para el análisis reglamentario y demostración del cumplimiento evaluar la efectividad de las estrategias de control.

Los modelos fotoquímicos son modelos a gran escala que simulan los cambios en las concentraciones de contaminantes en la atmósfera utilizando una serie de ecuaciones matemáticas que describen los procesos químicos y físicos de la atmósfera. Estos modelos se aplican en múltiples escalas espaciales desde local, regional, nacional y global.

En la evaluación de la calidad del aire se utilizan dos tipos de modelos fotoquímicos en las evaluaciones para la calidad del aire ambiente: el modelo de trayectoria Lagrangiano que emplea un marco de referencia en movimiento y el modelo de cuadrícula Euleriano que utiliza un sistema de coordenadas fijo con respecto a la tierra. Anteriormente los modeladores que utilizaban el modelado fotoquímico adoptaron el enfoque Lagrangiano para simular la formación de contaminantes debido a la simplicidad computacional, la desventaja del enfoque Lagrangiano, es que los procesos físicos que puede describir son algo incompletos. La mayoría de los modelos fotoquímicos operativos actuales de calidad del aire han adoptado el modelado de rejilla Euleriano tridimensional principalmente debido a su capacidad para caracterizar mejor y más completamente los procesos físicos en la atmósfera y predecir las concentraciones de especies en todo el dominio del modelo. (EPA, Photochemical Air Quality Modeling, 2023)

## **Modelado de receptores de contaminantes del aire**

Los modelos de receptores son procedimientos matemáticos o estadísticos para identificar y cuantificar fuentes de contaminantes del aire en un sitio receptor. A diferencia de los modelos fotoquímicos y de difusión de la calidad del aire, los modelos de receptores no utilizan emisiones contaminantes, datos meteorológicos o mecanismos de transformación química para estimar las contribuciones de las fuentes a las concentraciones de los receptores.

Los modelos de receptores utilizan las características químicas y físicas de gases y partículas medidas en la fuente y en el receptor para identificar la presencia y

cuantificar las contribuciones de la fuente a las concentraciones del receptor. Por lo tanto, estos modelos son un complemento a otros modelos de calidad del aire y se utilizan como parte de planes de implementación para identificar fuentes que contribuyen a los problemas de calidad del aire.

Para el desarrollo de este modelado de receptores la EPA desarrollo dos modelos:

### **Modelo de Balance de Masa Química (CMB por sus siglas en inglés)**

Utiliza perfiles de fuente de emisión y datos ambientales específicos para cuantificar las contribuciones de la fuente. Las contribuciones se cuantifican a partir de tipos de fuentes químicas distintas y no de emisores individuales. El CMB no puede distinguir entre fuentes con propiedades físicas y químicas similares.

### **Factorización de matriz positiva (PMF por sus siglas en inglés)**

Es una técnica de análisis factorial donde la variabilidad subyacente de muchas variables se describe mediante un conjunto más pequeño de factores con el que se relacionan las variables originales. La estructura de la PMF permite el uso máximo de datos disponibles y un mejor tratamiento de los valores faltantes o por debajo del límite de detección. (EPA, Air Pollutant Receptor Modeling, 2022)

### **Modelo de dispersión de la calidad del aire**

El modelado de dispersión utiliza formulaciones matemáticas para caracterizar los procesos atmosféricos que dispersan un contaminante emitido por una fuente. Sobre la base de emisiones y los datos meteorológicos, se puede utilizar un modelo de dispersión para predecir concentraciones en ubicaciones seleccionadas de receptores. Estos modelos de calidad del aire se utilizan para determinar el cumplimiento de los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS por sus siglas en ingles), actualmente estos son los modelos más utilizados para describir la calidad del aire en el mundo. (EPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2023)

No es una tarea sencilla realizar cualquier de los modelos anteriormente descritos, pueden tratarse de trabajos complejos que pueden tardar en realizarse semanas o meses, para el desarrollo de este tipo de modelos los organismos internacionales han desarrollado herramientas tecnológicas que ayuden a resolver de una manera más eficiente los modelos de dispersión de contaminantes. En el capítulo 7 se muestran los distintos softwares que existen en el mercado y las características que ofrece cada uno de ellos, así como los softwares recomendados por la EPA la cual es un organismo referencia a nivel internacional en la protección del medio ambiente.

## **7.- Softwares para el modelado de dispersión de contaminantes**

Los softwares para la simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos son una herramienta computacional que simulan las condiciones físicas y químicas que pueden afectar la forma en la que los compuestos contaminantes se dispersan en la atmosfera, lo que nos permite predecir las concentraciones en diferentes puntos en un área de estudio determinada.

Para realizar los modelos de dispersión atmosférica se utilizan representaciones matemáticas que logran introducir en su fórmula las variables que afectan a la dispersión de contaminantes. Mediante el uso de computadoras, los cálculos se pueden realizar de manera relativamente sencilla, permitiendo hacer una representación de la calidad del aire en el entorno del foco emisor del contaminante.

En el mercado actual existen muchos softwares para la modelar la dispersión de contaminantes. Cuando se va a realizar un modelado de la dispersión de contaminantes es importante asegurarse de utilizar un software avalado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en ingles). Dentro de los softwares avalados por la USEPA se encuentran los

alternativos como son ADAM, CALPUFF e ISC3, y los modelos preferidos donde se encuentran AERMOD, CTDMPPLUS y OCD.

## **Softwares alternativos**

### **Modelo de Dispersión de Evaluación de la Fuerza Aérea (ADAM por sus siglas en inglés)**

Es un modelo de dispersión Gaussiana y de caja modificado que incorpora termodinámica, química, transferencia de calor, carga de aerosoles y efectos de gases densos. Los escenarios de liberación incluyen opciones continuas e instantáneas, de área y puntuales, presurizadas y no presurizadas, líquidas/vapor/bifásicas.

### **Sistema de modelado CALPUFF**

CALPUFF es un modelo de dispersión en estado no estacionario de múltiples capas y especies que simula los efectos de las condiciones meteorológicas que varían en el tiempo y el espacio sobre el transporte, la transformación y la eliminación de la contaminación. CALPUFF se puede aplicar en escalas de decenas a cientos de kilómetros. Incluye logaritmos para efectos a escala de subred, así como efectos de mayor alcance.

### **Complejo de Fuentes Industriales 3 (ISC3 por sus siglas en inglés)**

Es un modelo de pluma Gaussiana de estado estacionario que se puede utilizar para evaluar las concentraciones de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociadas con un complejo industrial. Este modelo puede calcular: sedimentación y deposición seca de partículas, fuentes puntuales, de área, lineales y de volumen; aumento del penacho en función de la distancia a favor del viento; separación de fuentes puntuales y ajuste limitado de terreno. (EPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2023)

## **Softwares recomendados**

### **Modelo complejo de dispersión del terreno más algoritmos para situaciones inestables (CTDMPLUS por sus siglas en inglés)**

Es un modelo de fuente puntual y estado estacionario para aplicaciones en terrenos complejos. El modelo simula la distorsión del flujo y la pluma cerca de características tridimensionales del terreno, pero conserva la simplicidad al aplicar correcciones de distorsión del flujo a distribuciones de contaminantes gaussianos y de terreno plano. (Perry, 1992)

### **Modelo de Dispersión Costa Afuera (OCD por sus siglas en inglés)**

Es un modelo Gaussiano de línea recta desarrollado para determinar el impacto de las emisiones costa afuera provenientes de fuentes puntuales, de área o lineales sobre la calidad del aire de las regiones costeras. El modelo OCD incorpora el transporte y la dispersión de la pluma sobre el agua, así como los cambios que se producen a medida que la pluma cruza la costa. Para correr este software es necesario contar con datos meteorológicos cada hora, tanto de ubicaciones costa afuera como terrestres.

### **Sistema de modelado AERMOD**

El Comité de Mejora del Modelo Regulador (AERMIC) de la Sociedad Meteorológica Estadounidense se formó para introducir conceptos de modelado de última generación en los modelos de calidad del aire de la EPA, a través de AERMIC, se introdujo un sistema de modelado, AERMOD, que incorpora dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, incluido el tratamiento de fuentes superficiales y elevadas, y de terrenos complejos. (EPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2023)

Dado que AERMOD es el software recomendado por la USEPA y aceptado a nivel internacional, se utilizará este software para el desarrollo del presente proyecto, por lo que se profundizará más en el siguiente capítulo.

## **Software de modelado AERMOD**

Este es un modelo probabilístico gaussiano desarrollado por la EPA. El modelo AERMOD permite simular la dispersión de los contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales y por fuentes de área. Hay dos procesadores de datos de entrada que son componentes regulatorios del sistema de modelado AERMOD:

### **Meteorología**

AERMET es un procesador de datos meteorológico que incorpora dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, AERMET procesa datos meteorológicos en sitio y crea dos archivos, un archivo de datos de superficie y un archivo de datos de altitud. Los datos de superficie y altitud en México son proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o por estaciones meteorológicas privadas, estos datos son importantes para los modelos de dispersión de la EPA. Este procesador reformatea los datos para introducirlos en los modelos de dispersión de la calidad del aire.

Adicional a este procesador se proporciona otro programa accesorio que produce resultados gráficos o estadísticos que pueden ayudar en la interpretación y comprensión de los datos de superficie, WRPLOT (Wind Rose PLOT), este software calcula estadísticas de la rosa de los vientos basándose en incrementos de 10 grados, proporcionando un diagrama gráfico de la tendencia de vientos para una mejor interpretación. (EPA, Meteorological Processors and Accessory Programs, 2023)

## **Orografía**

AERMAP es un preprocesador de terreno para AERMOD. AERMAP procesa datos de elevación digitales y crea un archivo adecuado para el uso de control del AERMOD. Este archivo contiene factores de escala de elevación y altura de terreno para cada receptor de estudio en la dispersión de contaminantes. (EPA, Related Model Support Programs, 2023)

## **Condiciones de operación**

Además de los procesadores de datos de meteorología y orografía, son necesarias condiciones de operación y características físicas de los equipos a modelar, como son:

- Tasa de emisión del contaminante a evaluar (g/s).
- Velocidad de salida de los gases incondensables (m/s).
- Temperatura de salida de los gases incondensables (°C).
- Altura de los ductos de venteo (m).
- Diámetro de los ductos de venteo (m).
- Ubicación exacta de los ductos de venteo (UTM).

Ya que AERMOD View es uno de los softwares recomendado y aceptado por la EPA, es una de las principales herramientas utilizadas al momento de realizar un estudio de dispersión. En el capítulo 8 se presenta un caso práctico donde se describe y se muestran los datos mínimos para poder realizar una modelación de la calidad del aire con el uso de este software y la forma en la que se pueden presentar los resultados a la autoridad ambiental.

## 8.- Caso práctico de aplicación del software AERMOD

### Central por modelar

El ejemplo por desarrollar será un caso particular de una Central Termoeléctrica que opera con dos diferentes tipos de unidades, cinco unidades tipo Turbogás y tres unidades tipo Convencionales, separadas unas de otras.

### Centrales Convencionales

Las Centrales Convencionales son aquellas en que el grupo turbogenerador recibe la energía primaria en forma de vapor de agua de alta presión y temperatura, y la convierte en energía mecánica de rotación en la turbina, y en energía eléctrica a través de la acción conjunta del generador. (Ramírez, 2015)

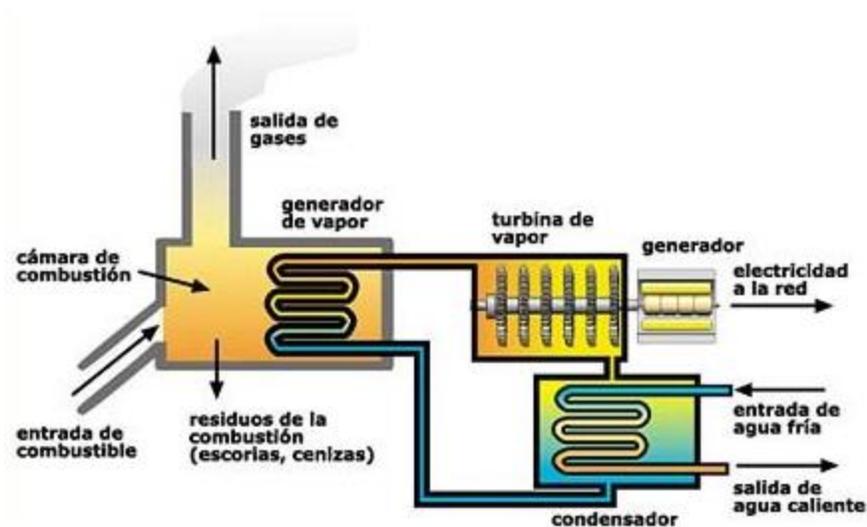


Figura 15.- Funcionamiento de una Central Termoeléctrica Convencional (Ramírez, 2015)

## Centrales Turbogás

La generación de energía eléctrica en las unidades de turbogás se logra aprovechando directamente, en los álabes de la turbina de gas, la energía cinética que resulta de la expansión de aire y gases de la combustión, comprimidos. El principio de funcionamiento de las turbinas de gas se basa, en la compresión de una gran cantidad de flujo de aire. Las turbinas de gas, debido a sus capacidades, tipos, relaciones de compresión, flujos de aire y temperaturas de operación, tienen respuestas y desempeños diferentes ante modificaciones de las condiciones atmosféricas. De forma general presentan un menor desempeño conforme aumenta la temperatura y la altitud; existen diferentes tipos de turbinas dependiendo de su uso, disposición de la cámara de combustión y ejes con los que cuenta. (CENACE, 2022)

Dependiendo del uso las podemos clasificar como:

- Turbina de Gas Aero Derivadas: Proviene del diseño de turbinas utilizadas en la industria de la aviación, pero adaptadas para la producción de energía eléctrica en plantas industriales. Su diseño compacto facilita los procesos de sustitución y mantenimiento, permitiendo que se lleven a cabo inspecciones completas en menores intervalos de tiempo.
- Turbinas de Gas Industriales: El desarrollo de su diseño se ha orientado a la producción de energía eléctrica, aumentando la eficiencia para obtener una mayor cantidad de potencia y largos periodos de operación a carga máxima reduciendo el número de paros y arranques continuos. (CENACE, 2022)

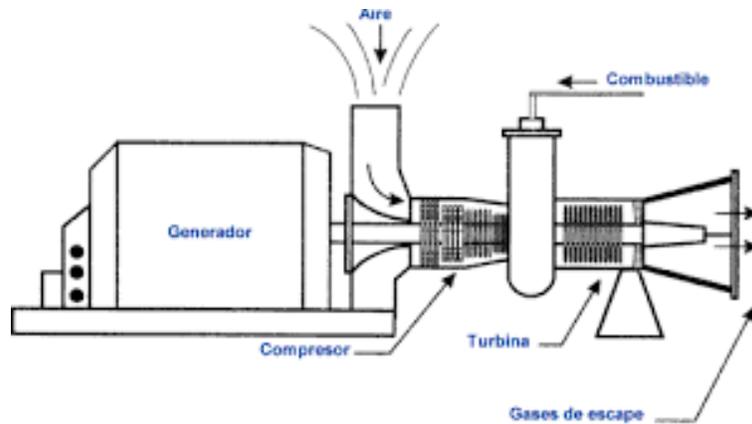


Figura 16.- Funcionamiento de una unidad tipo turbogás (CENACE, 2022)

En el presente caso hipotético se desarrollarán los siguientes escenarios para estimar las posibles zonas a impactar por las emisiones generadas por las diferentes unidades de generación de energía eléctrica de manera espacial y temporal.

- Estimar las concentraciones de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$ , con la operación de la Central Termoeléctrica convencional quemando combustóleo, considerando una malla topográfica cartesiana de 20 x 20 km para determinar los posibles impactos a las poblaciones de las zonas aledañas.
- Estimar las concentraciones de  $\text{NO}_2$  para determinar los posibles impactos a las zonas aledañas, por la operación de las unidades tipo aeroderivadas operando con gas natural, considerando una malla topográfica cartesiana de 20 x 20 km.
- Estimar las concentraciones de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{10}$  para determinar los posibles impactos a las zonas aledañas, por la operación de las unidades tipo aeroderivadas operando con diésel como combustible en un periodo máximo de siete días, considerando una malla topográfica cartesiana de 20 x 20 km.

Es importante señalar que los dos tipos de unidades nunca operarán de forma simultánea.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los tres escenarios propuestos para evaluar los posibles impactos a la calidad del aire en la zona de influencia de la operación de la Central Termoeléctrica.

<b>Generación</b>	<b>Escenario uno</b>	<b>Escenario dos</b>	<b>Escenario tres</b>
<b>Convencional</b>	Operando con Combustóleo	Fuera de operación	Fuera de operación
<b>Aeroderivada</b>	Fuera de operación	Operando con gas natural	Operando con diésel

*Tabla 2.- Escenarios de operación de Central Termoeléctrica.*

### **Área de estudio**

Hipotéticamente la Central Termoeléctrica se ubica en el estado de Campeche en el municipio de Lerma, ubicada a 500 metros del puerto pesquero de Lerma, ubicada en Carretera Costera del Golfo KM 8.5, Lerma Centro, Campeche, Campeche.

Para definir el área de estudio respecto a la calidad del aire, se desarrolló una malla cartesiana como punto central de la ubicación de la Central Termoeléctrica cuyas coordenadas geográficas son 750158.0 m E y 2190398.0 m N en la zona horaria 15 en UTM (Universal Transversal Mercator) con una altura sobre el nivel del mar de cinco metros. La malla cubre una distancia total de 400 kilómetros cuadrados con receptores cada 500 metros. En la siguiente Figura se muestra el área de estudio donde está contemplado el municipio de Lerma y las zonas aledañas a la Central.



*Figura 17.- Área de estudio*

### **Características del relieve**

Para calcular las concentraciones en los receptores ubicados en la zona de estudio considerando las elevaciones, el modelo de dispersión AERMOD, simula una nube como una suma ponderada de concentraciones de dos escenarios extremos:

1. Una nube horizontal en condiciones muy estables.
2. Una columna de seguimiento de elevación que representa las elevaciones variables del área.

Por ello, la modelación del terreno debe contemplar el uso de información con la mejor resolución disponible. Para el caso ejemplo, se utilizó la base de datos del

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el modelo digital de elevación proviene de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de 30m.

Mientras que para la generación de los receptores se calculó con una malla de 40 x 40 km con un espaciado de 0.5 km. En total se consideraron 6,401 receptores para el cálculo de la concentración de contaminantes en la zona de estudio, teniendo como punto de referencia la coordenada UTM de la zona horaria 15, 750158.0 m Este y 2190398.0 m Norte.

En la siguiente tabla se encuentra el número de receptores, mallado y dimensión de la zona de estudio.

<b>Datos</b>	<b>Eje X</b>	<b>Eje Y</b>
Coordenadas centrales (m)	750 158.0	2 190 398.0
Número de receptores	6,401	
Espaciado (m)	500	500
Longitud del radio (m)	20 000	20 000

*Tabla 3.- Número de receptores, mallado y dimensiones de la zona de estudio.*

En la siguiente Figura, se presentan las curvas de nivel del área de estudio, esta información es generada mediante el procesador de terreno AERMAP y es empleado en la estimación de la concentración de contaminantes mediante el software AERMOD.

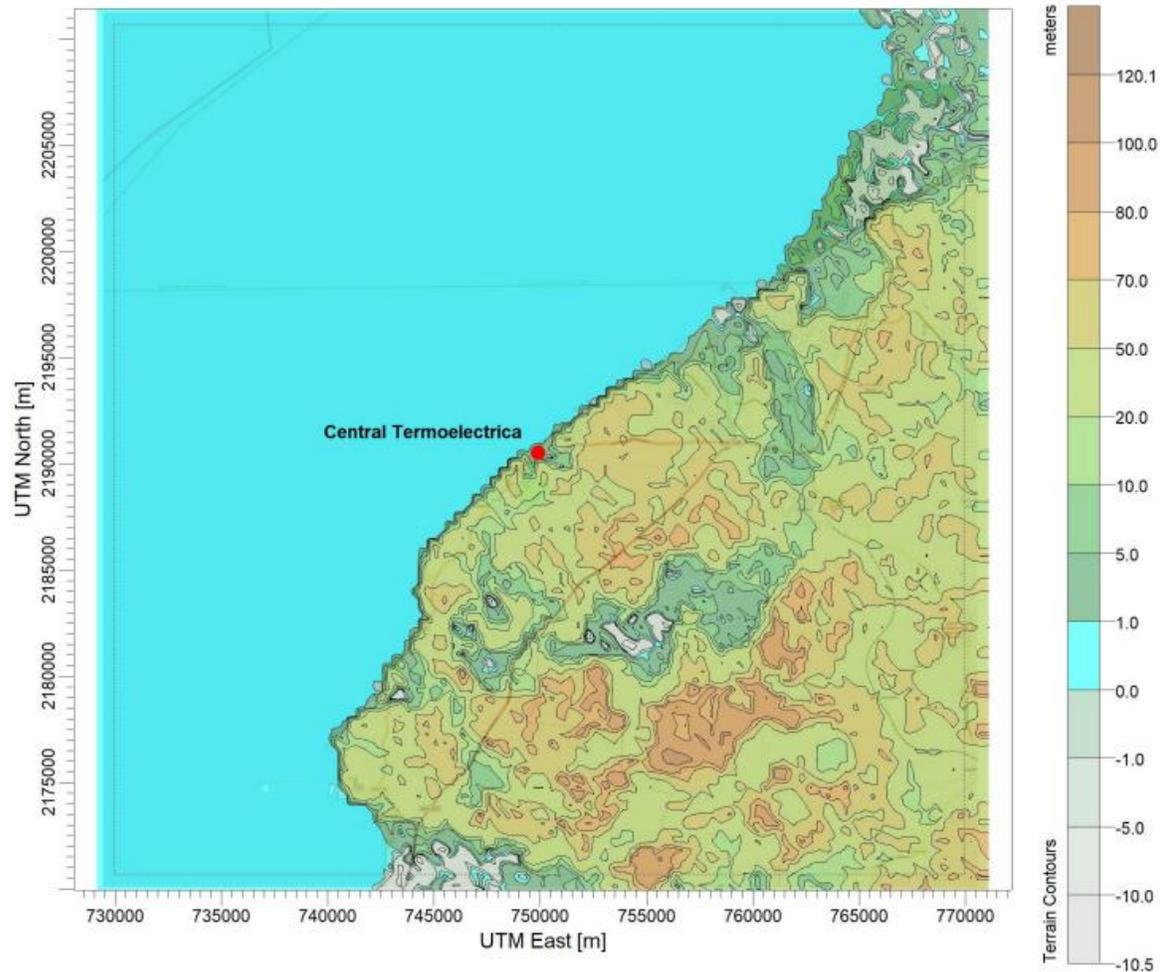


Figura 18.- Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio

### Condiciones de operación

Para el caso hipotético la Central Termoeléctrica contara con una capacidad de generación total de 120 MW, para su proceso de generación de energía eléctrica las unidades convencionales emplean combustóleo como combustible principal. Se considera un consumo total de combustóleo de 14,355.16 m<sup>3</sup>/h, por otro lado, se considera la operación de las unidades tipo turbogas con gas natural como combustible principal con un consumo total de gas natural de 5.714 kg/h y utilizando diésel como combustible de emergencia.

Las emisiones generadas más importantes durante el proceso de combustión de las unidades son los dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas suspendidas menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>). Para la estimación de las posibles zonas a impactar por la operación de las distintas unidades de generación de energía eléctrica se consideran condiciones críticas de operación; esto es el funcionamiento de las unidades al 100% de carga.

En las tablas siguientes se describen las características de operación para todas las unidades de generación, indicando también su geometría.

### **Cálculo de la tasa de emisión**

Las tasas de emisión de los contaminantes generados durante la combustión del gas natural y del combustóleo que se indica en las siguientes tablas fueron calculadas con apoyo de la guía AP-42: *“Recopilación de factores de emisión atmosférica de fuentes fijas”* de la Environmental Protection Agency (EPA).

### **Cálculo de la tasa de emisión para unidades convencionales**

#### **Factor de emisión (FE)**

Los factores de emisión son herramientas disponibles para estimar emisiones de contaminantes. Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de gases liberados a la atmosfera con una actividad y se pueden expresar como tasa de emisión (masa del gas por unidad del tiempo) o dependiendo de las necesidades requeridas se pueden expresar como masa por unidad de energía o volumen emitido de contaminantes. (EPA, 2023)

Unidad uno

Tiempo de operación	h	2 080.65
Consumo anual de combustible	m <sup>3</sup>	14 355.16

*Tabla 4.- Tiempo de operación y consumo de combustible de la unidad convencional uno*

Tasa de emisión para el NOx

$$FE_{NO_x} = 3.84 \frac{kg}{m^3_{combustible}}$$

$$Emisión_{NO_x} = \frac{FE_{NO_x} * consumo de combustible}{tiempo de operación} \frac{kg NO_x}{tiempo}$$

$$Emisión_{NO_x} = \frac{3.84 * 14\ 355.16}{2\ 080.65} = 26.49 \frac{kg NO_x}{h} = 7.36 \frac{g}{s}$$

Tasa de emisión para el SOx

$$FE_{SO_x} = 18.84 \text{ (contenido de azufre)} \frac{kg}{m^3_{combustible}}$$

$$Emisión_{SO_x} = \frac{FE_{SO_x} * consumo de combustible}{tiempo de operación} \frac{kg SO_x}{tiempo}$$

$$Emisión_{SO_x} = \frac{71.59 * 14\ 355.16}{2\ 080.65} = 493.93 \frac{kg SO_x}{h} = 137.20 \frac{g}{s}$$

Tasa de emisión para las PM<sub>10</sub>

$$FE_{PM_{10}} = 0.793 * \text{contenido de azufre} + 0.262 \frac{kg}{m^3_{combustible}}$$

$$Emisión_{PM_{10}} = \frac{FE_{PM_{10}} * consumo de combustible}{tiempo de operación} \frac{kg PM_{10}}{tiempo}$$

$$Emisión_{PM_{10}} = \frac{3.275 * 14\ 355.16}{2\ 080.65} = 22.60 \frac{kg PM_{10}}{h} = 6.28 \frac{g}{s}$$

En la siguiente tabla se muestran las características físicas de las unidades convencionales, así como condiciones de operación y tasas de emisión de los contaminantes a modelar.

	<b>Unidad</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>
<b>Capacidad total</b>	MW	37.5	37.5	37.5
<b>Altura de chimenea</b>	m	24.8	24.8	28.3
<b>Diámetro de chimenea</b>	m	1.83	1.83	2.6
<b>Temperatura de salida de los gases</b>	°C	220	220	170
<b>Velocidad de salida de los gases</b>	m/s	40	40	19
<b>Emisiones de NO<sub>x</sub></b>	g/s	7.36	7.21	10.70
<b>Emisiones de SO<sub>x</sub></b>	g/s	137.2	134.36	135.85
<b>Emisiones de PM<sub>10</sub></b>	g/s	6.28	6.15	6.21

*Tabla 5.- Geometría de las chimeneas y características de las emisiones de los gases de combustión, Unidades Convencionales.*

Para las características físicas, así como las condiciones de operación y tasas de emisión de los contaminantes a modelar se muestran la Tabla 6.

	<b>Unidad</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>	<b>U5</b>
<b>Capacidad total</b>	MW	24	24	24	24	24
<b>Altura de chimenea</b>	m	9	9	9	9	9
<b>Diámetro de chimenea</b>	m	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
<b>Temperatura de salida de los gases</b>	°C	498	498	498	498	498
<b>Velocidad de salida de los gases</b>	m/s	33.28	33.28	33.28	33.28	33.28
<b>Emisiones de NO<sub>2</sub> (GN)</b>	g/s	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36
<b>Emisiones de NO<sub>2</sub> (Diésel)</b>	g/s	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07
<b>Emisiones de CO</b>	g/s	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
<b>Emisiones de PM<sub>10</sub></b>	g/s	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
<b>Emisiones de SO<sub>2</sub></b>	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36

*Tabla 6.- Geometría de la chimenea y características de las emisiones de los gases de combustión*

*Unidades aeroderivadas (Power, 2023).*

## **Meteorología**

Los datos meteorológicos de superficie utilizados en el modelo de dispersión atmosférico fueron obtenidos de la estación meteorológica Campeche (DGE), en el municipio de Campeche, con clave 04038 perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y corresponden al año 2022.

Para el tratamiento de la información meteorológica de superficie y altura de capa de mezclado se utilizó un procesador denominado AERMET con el cual se obtuvieron las temperaturas promedio, frecuencias de ocurrencia de vientos, estabilidad atmosférica y la distribución conjunta de intensidad y dirección del viento por categoría de estabilidad para el periodo de estudio, lo anterior nos permite analizar el movimiento vertical y horizontal del aire el cual es el transporte de las emisiones provenientes de las unidades de generación.

Las variables meteorológicas utilizadas en el modelo de calidad del aire son relevantes debido al efecto que tienen sobre la concentración de contaminantes en los sitios receptores de interés. La información de entrada para los modelos de calidad del aire y de dispersión atmosférica incluyen variables como: tasas de emisión de contaminantes y meteorología prevaleciente en la zona de estudio, las más relevantes son: Velocidad y dirección del viento, turbulencia, temperatura, presión, capa límite planetaria, humedad relativa, nubosidad y radiación solar.

Es importante señalar que, las predicciones de modelaciones atmosféricas de mayor exactitud se obtienen a partir de una información meteorológica confiable. Por lo que en la siguiente sección se dará una breve descripción de las variables meteorológicas más relevantes y la línea base de concentraciones utilizadas para determinar la interacción de la central con el componente aire.

Así mismo, cuando se refiere a la contaminación atmosférica se considera que las principales variables de transporte que influyen en la calidad del aire de una zona son: el transporte convectivo horizontal que depende de las velocidades y direcciones del viento, así como el transporte convectivo vertical que depende de la

estabilidad atmosférica y del fenómeno de la inversión térmica de las capas de la atmosfera.

Para la modelación de la meteorología del sitio, es preciso señalar que el sistema de modelación AERMOD requiere entradas meteorológicas y de terreno, estos se obtienen mediante un preprocesador meteorológico AERMET y un preprocesador de terreno AERMAP.

Los datos meteorológicos considerados en el modelo son la temperatura, punto de rocío, presión atmosférica, radiación solar, velocidad del viento, cubierta total de nubes y cubierta de nubes bajas, la velocidad convectiva y altura de capa de mezclado. El resultado de las modelaciones en AERMET es introducido directamente a AERMOD.

## **Temperatura**

Según los datos meteorológicos del año 2022 obtenidos a partir de la estación meteorológica Campeche (DGE) de la CONAGUA, la temperatura más alta medida del año fue de 36 °C y la temperatura más baja fue de 18 °C, con un promedio de 27 °C durante el mismo período. Las temperaturas promedio mensuales del año se dan en la Figura 24, de la cual se puede observar que las temperaturas promedio más altas se dieron en abril y mayo. Los registros promedio de temperatura mensual más alta y baja del año caso se muestran en la Figura 25. La temperatura más alta de 2022 se midió en mayo y la más baja en enero.

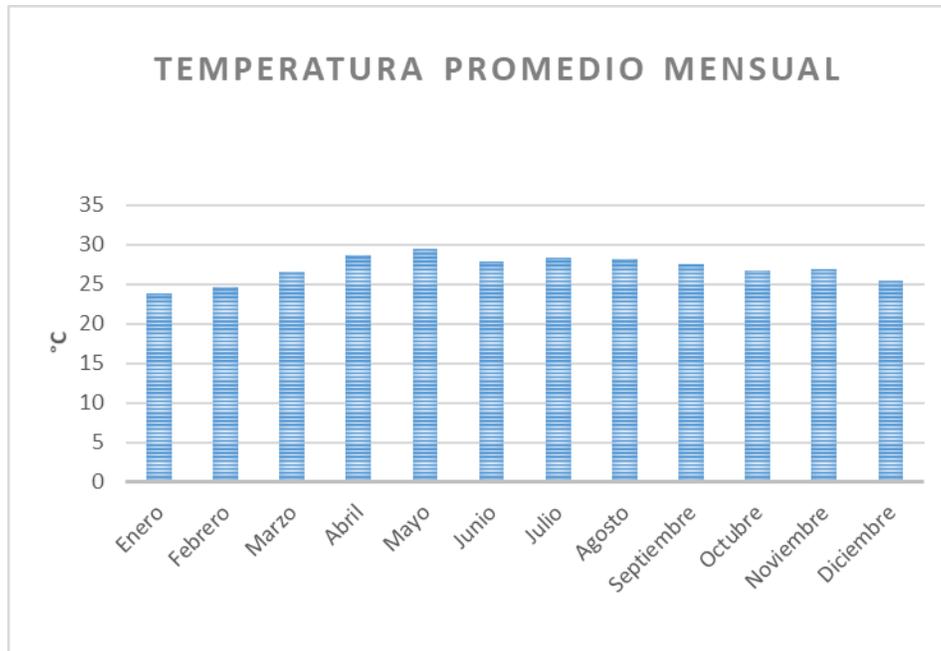


Figura 19.- Temperatura promedio mensual para la zona de estudio, 2022

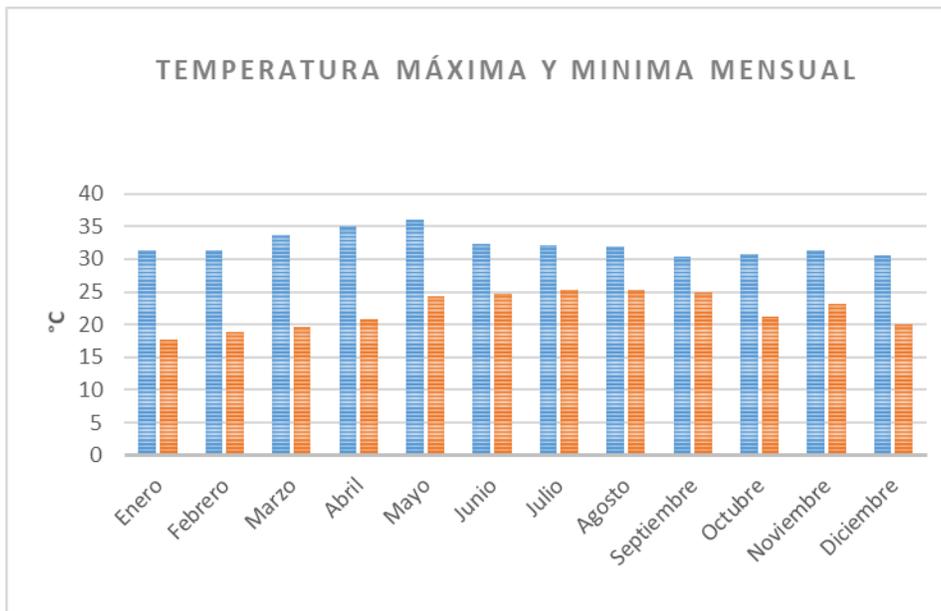


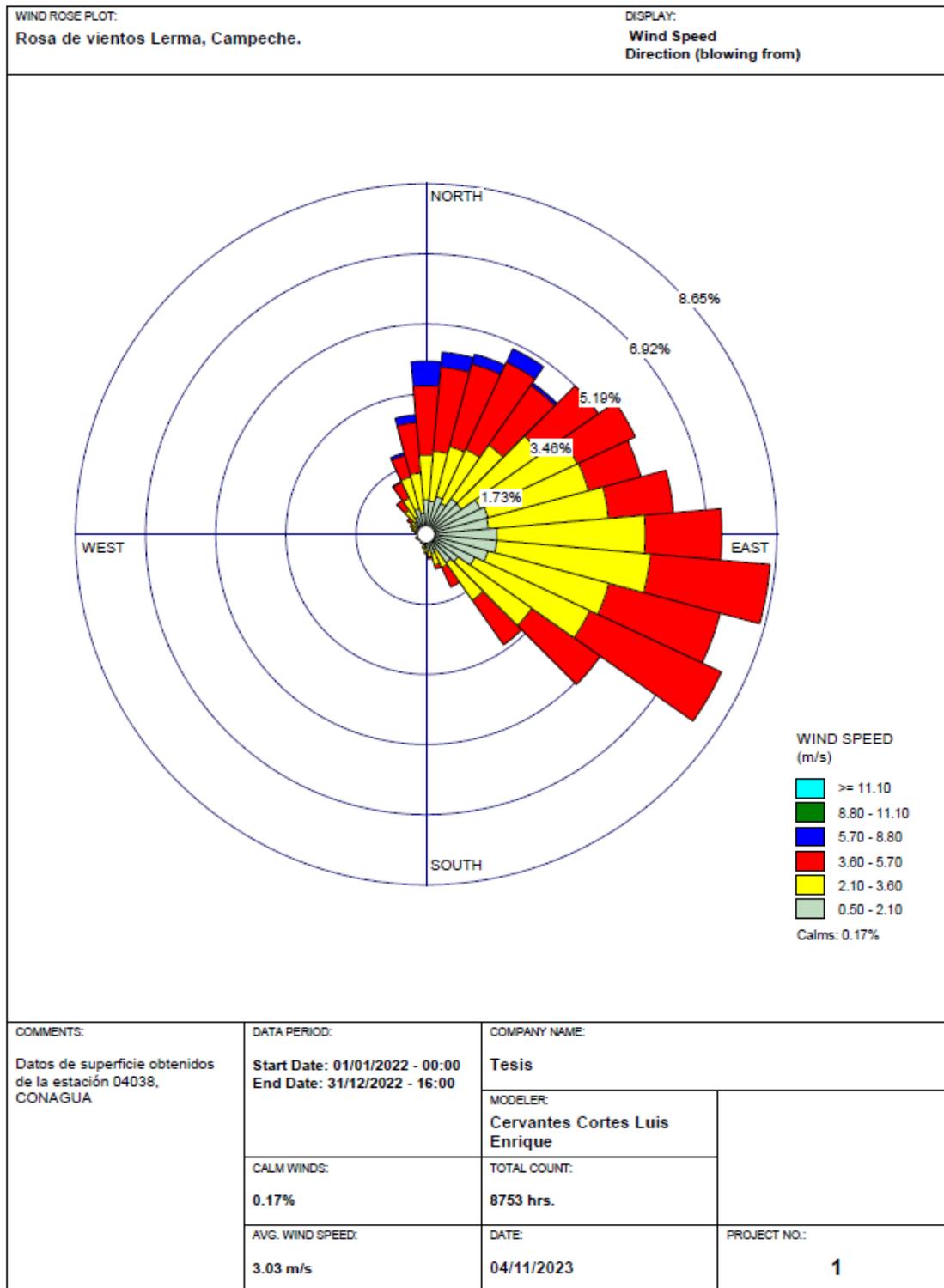
Figura 20.- Temperatura máxima y mínima mensual para la zona de estudio, 2022

## **Movimiento horizontal de los gases**

Una forma conveniente de mostrar la dirección y velocidad del viento es utilizar un gráfico de rosa de los vientos. La estructura de estos gráficos permite observar las direcciones predominantes de los vientos, su frecuencia e intensidad de ocurrencia; Al mismo tiempo, nos brindan la oportunidad de conocer las probables áreas de influencia que la liberación de gases contaminantes puede afectar en la calidad del aire de la zona de estudio.

### **Rosa de vientos**

Con la ayuda de estos diagramas podemos observar las direcciones predominantes del viento, sus frecuencias e intensidades: también pueden usarse para determinar las probables áreas donde de zonas de influencia que pueden ser afectadas por la liberación de gases contaminantes provenientes de la Central de generación de energía eléctrica. La Figura 26 muestra el diagrama de la rosa de vientos anual del área de estudio donde se observa que los vientos siguen un vector diagonal que se dirige hacia los sectores este-sureste. La velocidad media anual en 2022 fue de 3,03 m/s y el 0,17% del viento fue inferior a 1 m/s, es decir. con vientos en calma.



WRPLOT View - Lakes Environmental Software

Figura 21.- Rosa de vientos Lerma, Campeche 2022

## Estabilidad atmosférica

Otro fenómeno meteorológico importante relacionado con la dispersión de la pluma de contaminantes es la estabilidad atmosférica, la cual es una forma de clasificar de manera discreta a los indicadores de la turbulencia atmosférica, asignándole para ellos diferentes categorías de estabilidad que van desde condiciones muy estables hasta condiciones inestables. En el presente ejemplo de estudio la clasificación de estabilidad atmosférica se determinó empleando la metodología de Pasquill, la cual requiere información sobre la velocidad del viento, radiación solar y la fracción de cielo cubierto (nubosidad). Los criterios de Pasquill asignan los siguientes tipos de estabilidad:

- A – muy inestable
- B – inestable
- C – ligeramente inestable
- D – neutra
- E – ligeramente estable
- F – moderadamente estable

	Frecuencia de Estabilidad Atmosférica						
Dirección	A	B	C	D	E	F	Total
N	0	3	16	25	50	29	123
NNE	2	6	10	16	37	11	82
NE	0	0	10	27	53	16	106
ENE	3	5	33	74	81	22	218
E	7	24	101	227	195	57	611
ESE	4	13	59	99	112	30	317
SE	1	13	41	73	74	12	214
SSE	11	22	34	66	125	35	293
S	3	19	27	48	83	23	203
SSW	2	1	38	23	25	7	96
SW	0	2	38	41	30	7	118
WSW	1	15	95	118	104	26	359
W	0	7	49	52	70	15	193
WNW	0	3	10	13	31	7	64
NW	0	3	15	11	10	4	43
NNW	0	7	16	14	34	18	89
Sub Total	34	143	592	927	1114	319	3129
							1263
							0

Tabla 7.- Estabilidad atmosférica de la zona de estudio.

En esta Tabla se observa que la mayor frecuencia de ocurrencia de estabilidad atmosférica corresponde a la categoría de ligeramente estable (E), esta condición se presentó durante 46 días del año seguida de la categoría tipo D, neutra que predominó durante 39 días del año. Lo anterior nos indica que la zona de estudio presenta un comportamiento con tendencias estables, es decir que no se presentan cambios bruscos en la dispersión de la pluma de contaminantes durante el periodo de análisis.

### **Altura de capa de mezclado**

En la troposfera baja se emiten y concentran la mayor cantidad de contaminantes atmosféricos debido a tres aspectos generales:

- 1) La proximidad de la capa de mezclado con la actividad humana.
- 2) Las particularidades fisicoquímicas que delimitan los procesos de transporte, forzando a que los contaminantes atmosféricos se mantengan en la troposfera.
- 3) Las características específicas de los contaminantes atmosféricos, por ejemplo, tiempo de residencia, tamaño (en el caso de partículas suspendidas) o su reactividad con otro compuesto en el aire.

Es importante mencionar la diferencia entre la altura de capa de mezclado y la capa límite planetaria, esta última también conocida como capa límite atmosférica y que se define como la parte de la troposfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre y responde a los forzamientos superficiales en escalas de tiempo de una hora o menos. Por su parte la capa límite planetaria tiene tres componentes principales, la capa de mezcla, la capa residual y la capa estable nocturna, en otras palabras, la altura de capa de mezclado forma parte de la capa límite planetaria, aunque en términos generales estas alturas son estrechamente parecidas.

En cuanto a la dinámica de la capa límite planetaria a lo largo del tiempo, es variable. Un ejemplo de ello es su comportamiento por la noche. La superficie de la Tierra no recibe radiación solar, pero sí emite radiación de onda larga y por tanto a la superficie y al aire en contacto con él, porque las capas inferiores de la atmósfera se enfrían más rápido que el aire en las capas superiores. De esta manera se consigue un aumento de la temperatura con la altura y, por tanto, una capa térmicamente estable en el fondo de la atmósfera, donde el aire con una estratificación estable tiende a suprimir las turbulencias. Durante el día se produce el proceso contrario, pero durante las primeras horas de la mañana, debido al paulatino aumento de la temperatura y las turbulencias atmosféricas, la capa límite planetaria comienza a crecer, lo que provoca que la radiación solar alcance su valor máximo principalmente en días despejados y con escasa nubosidad. (Rodríguez, 2015)

La altura de la capa de mezcla es la altura sobre el suelo donde se produce la mezcla vertical de gases contaminantes en la atmósfera, que cambia diariamente y se obtiene a partir de mediciones por radio sondeo. La altura de la capa de mezclado es el nivel máximo al que puede ascender parte del aire. El aire que se encuentra por debajo de la altura de capa mezcla forma la capa de mezclado, mientras más profunda sea esta capa, mayor será el volumen de aire disponible para la dispersión de los contaminantes.

Cabe mencionar que el área de estudio se encuentra en una zona costera, por lo que es común que se presenten fenómenos de inversión térmica de corta duración, principalmente por las mañanas, esto se debe al rápido calentamiento de la superficie terrestre y la cercanía de la costa, lo que genera un rompimiento acelerado de la inversión térmica, siendo poco probable que los gases se acumulen en la zona aledaña.

## **Descripción del modelo de dispersión**

La Sociedad Meteorológica Americana (AMS) y La Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos de América (EPA) desarrolló el modelo de calidad del aire a escala local AERMOD VIEW en 1991. AERMOD VIEW es un modelo de dispersión Gaussiano el cual incorpora algoritmos del efecto de barreras de los edificios, depósito/decaimiento de partículas, efectos locales de terrenos y un avanzado cálculo de turbulencia. Es importante señalar que AERMOD VIEW puede implementar información meteorológica en la vertical real y estimada.

El modelo utiliza datos producidos por dos preprocesadores, AERMET y AERMAP. AERMET se ocupa de los parámetros meteorológicos y los datos orográficos son generados por AERMAP utilizando un modelo digital de elevación. (Mendoza-Lara, 2021.)

El procesador de datos AERMET proporciona un flujo de datos meteorológicos. En AERMET para proporcionar parámetros meteorológicos de capa límite en el formato correcto para AERMOD VIEW. Estos datos de entrada meteorológica para el preprocesamiento en AERMET pueden observarse o simularse utilizando un modelo meteorológico; esta elección puede hacerse según el objetivo del estudio y la disponibilidad de datos de entrada.

Cabe señalar que AERMOD VIEW es un modelo de dispersión recomendado y sugerido por la EPA para el análisis y estimación de los impactos ambientales por la operación de una fuente fija, a partir del 2006 AERMOD reemplaza al modelo Gaussiano de estado estacionario ISC3.

El proceso general para el sistema de modelación se basa en las siguientes etapas:

1. Validar y procesar datos de entrada (información de emisiones, terreno y meteorología)
2. Preprocesamiento para el modelo AERMAP (receptores y modelación del terreno),
3. Modelación meteorológica,

4. Modelación de dispersión de emisiones, y
5. Post procesamiento.

Para el análisis y generación de las estimaciones de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, es importante señalar dos puntos del modelo:

1. Los datos de salida de AERMOD VIEW son concentraciones promedio que van de 1 a 24 horas.
2. El modelo es apropiado para analizar distancias menores a 50 km desde el origen de la fuente.

### **Requisitos de datos de entrada**

Para ejecutar el modelo AERMOD se requieren de tres tipos básicos de datos de entrada:

- 1) Base de datos con propiedades fisicoquímicas de los gases emitidos por las chimeneas de desfogue.
- 2) Base de datos meteorológicos del área de estudio.
- 3) Base de información topográfica de la zona de estudio.

La información requerida para la elaboración de las bases de datos que utiliza el modelo es la siguiente:

- Tasa de emisión de los contaminantes, se pueden obtener con medición directa, balances de masa y/o factores de emisión, con unidades g/s.
- Velocidad de salida de los gases de combustión, expresada en m/s.
- Temperatura de salida de los gases de combustión, expresados en K.
- Altura de las chimeneas de desfogue, expresada en m.
- Diámetro de las chimeneas de desfogue, expresada en m.
- Velocidad del viento, con unidades m/s.
- Dirección del viento.
- Temperatura ambiente, expresada en K.
- Altura de techo de nube, expresada en m.

- Porcentaje de cielo cubierto (nubosidad), %.
- Altura de capa de mezcla matutina y vespertina, expresada en m.
- Topografía de la zona de estudio en m.

### **Clasificación del medio urbano o rural**

La clasificación del uso de suelo en el área de estudio se basa en los criterios propuestos en la Parte 40 del Código de Regulaciones Federales de EE. UU. (40 CFR Parte 51) para modelos matemáticos de dispersión de contaminantes definidos por la densidad de población y considerando si el ambiente es rural o urbano, para la selección de los coeficientes de difusión al incluirlos en los cálculos de dispersión atmosférica. (EPA, Air Pollutant Receptor Modeling, 2022)

Dado que, en un radio de 3 km tomando como punto central la ubicación de las chimeneas de desfogue de la Central Termoeléctrica Lerma, la densidad de población es menor a los 750 habitantes por kilómetro cuadrado, según los criterios propuestos por la EPA en 40 CFR Parte 50 se decidió realizar la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos considerando un uso de suelo tipo rural.

### **Dominio de cálculo**

El Software AERMOD View considera los siguientes supuestos en la evaluación del impacto en la calidad del aire por la operación de las unidades de generación de energía eléctrica por la quema de combustibles fósiles:

- Las simulaciones efectuadas para cada uno de los escenarios suponen que las fuentes emisoras, siendo las chimeneas de desfogue, operan durante todo el año con toda su capacidad al 100% de carga constante.
- La concentración tiende al infinito cuando la distancia "x" tiende a cero.
- La concentración tiende a cero cuando x, y o z tienden al infinito, la concentración es igual a cero cuando se encuentra a grandes distancias de la fuente de emisión.
- La concentración del contaminante se expulsa desde fuentes puntuales continuas

- El proceso de dispersión se considera que es llevado a cabo en estado estacionario.
- Se escoge la principal dirección del transporte por el viento para orientar el eje de las “x”.
- El transporte del contaminante debido al viento en la dirección “x” predomina sobre la difusión descendente. (EPA, Air Quality Dispersion Modeling, 2023)

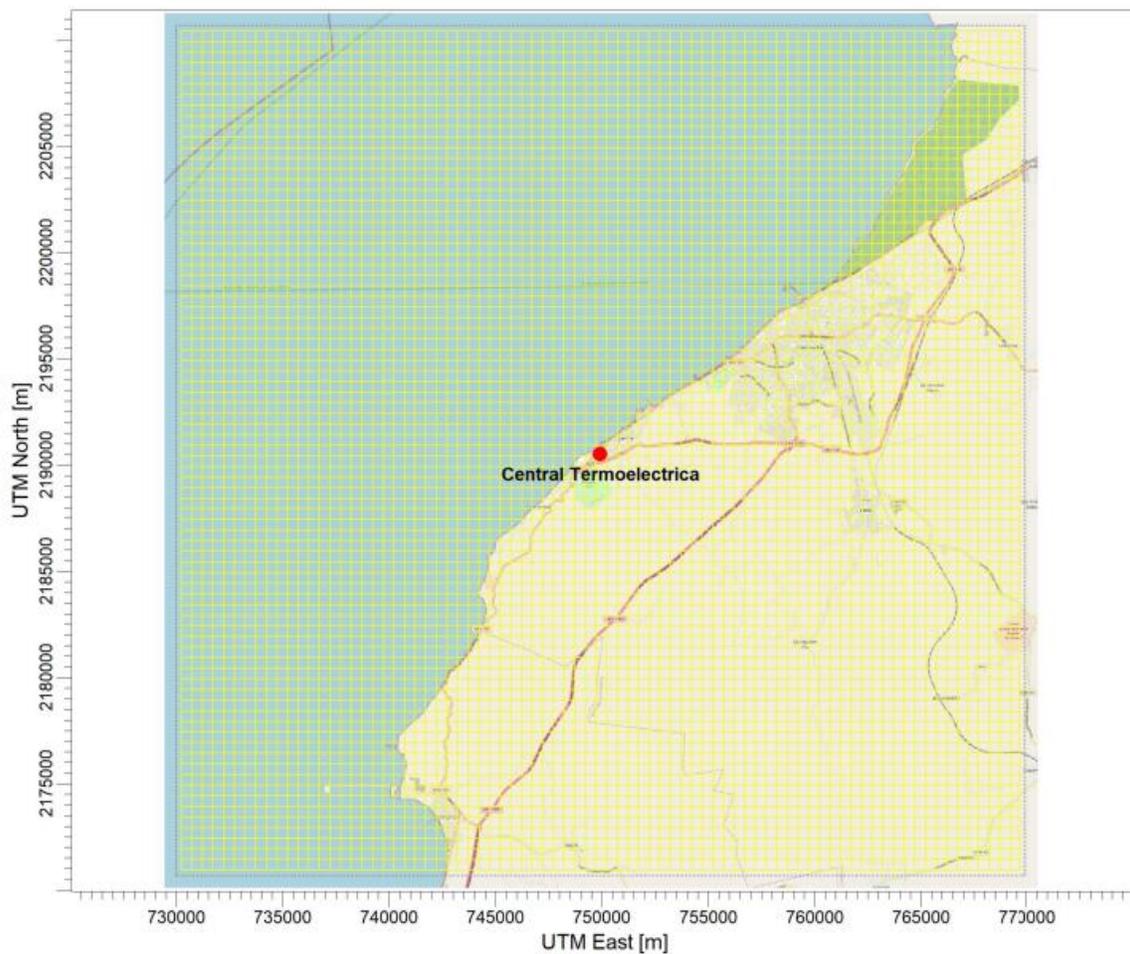


Figura 22.- Área de estudio y malla cartesiana de receptores, 20 x 20 km.

## **Tratamiento de vientos en calma**

Los vientos en calma son vientos variables y muy débiles con velocidades inferiores a 1 m/s (Guía de modelos atmosféricos de la EPA). Este tipo de vientos presenta un problema particular en la aplicación de modelos, debido a que el modelo supone que la concentración del contaminante es inversamente proporcional a la velocidad del viento, por lo que los resultados obtenidos por el modelo al calcular las concentraciones en periodos de calma pueden provocar un error y tender a sobreestimar los valores de concentración reales.

Según las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), en el Manual de Modelos Atmosféricos, y especialmente al aplicar modelos gaussianos, recomienda utilizar 1 m/s para condiciones de calma y viento. la dirección de la hora en la que ocurre el período anterior. Por lo tanto, todos los registros con velocidades inferiores a 1 m/s se eliminan del cálculo estadístico. (CFE, 2023)

## **Evaluación de impacto a la calidad del aire**

El modelo de dispersión AERMOD VIEW genera un archivo con información tabulada de las concentraciones de los contaminantes estimados en los periodos establecidos para cada receptor, el modelo estima hasta diez valores máximos de concentración, de estos valores y par afines de analizar los resultados obtenidos se eligen los cuartos valores máximos, como se recomienda en la parte 40 del Código de Reglamentaciones Federales de los E.U. (40 CFR, parte 51) de acuerdo con el comportamiento asintótico de los resultados.

Es importante señalar que, respecto a los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), estos se consideraron dentro de la ejecución del modelo de dispersión de contaminantes AERMOD VIEW tomando en cuenta la relación de formación del NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub> a partir de la tasa de emisión de los NO<sub>x</sub> por lo que las concentraciones resultantes estimadas por el modelo se reportan solo como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

En las siguientes tablas se muestran los escenarios propuestos para estimar las emisiones de los gases contaminantes generador por la operación de cinco

unidades aeroderivadas, en esta tabla se indican las unidades que se encuentran en servicio por escenario.

Generación	Unidad	Escenario 1		
		Gas natural	Combustóleo	Diésel
<b>Aeroderivada</b>	<b>Uno</b>	En Servicio	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Dos</b>	En Servicio	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Tres</b>	En Servicio	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cuatro</b>	En Servicio	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cinco</b>	En Servicio	No Aplica	En Reserva
<b>Convencional</b>	<b>Dos</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Tres</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Cuatro</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica

Generación	Unidad	Escenario 2		
		Gas natural	Combustóleo	Diésel
<b>Aeroderivada</b>	<b>Uno</b>	En Reserva	No Aplica	En Servicio
<b>Aeroderivada</b>	<b>Dos</b>	En Reserva	No Aplica	En Servicio
<b>Aeroderivada</b>	<b>Tres</b>	En Reserva	No Aplica	En Servicio
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cuatro</b>	En Reserva	No Aplica	En Servicio
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cinco</b>	En Reserva	No Aplica	En Servicio
<b>Convencional</b>	<b>Dos</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Tres</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Cuatro</b>	No Aplica	En Reserva	No Aplica

Generación	Unidad	Escenario 3		
		Gas natural	Combustóleo	Diésel
<b>Aeroderivada</b>	<b>Uno</b>	En Reserva	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Dos</b>	En Reserva	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Tres</b>	En Reserva	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cuatro</b>	En Reserva	No Aplica	En Reserva
<b>Aeroderivada</b>	<b>Cinco</b>	En Reserva	No Aplica	En Reserva
<b>Convencional</b>	<b>Dos</b>	No Aplica	En Servicio	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Tres</b>	No Aplica	En Servicio	No Aplica
<b>Convencional</b>	<b>Cuatro</b>	No Aplica	En Servicio	No Aplica

Tabla 8.-Escenarios de operación para las unidades de generación de energía eléctrica.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las modelaciones de cinco unidades de generación eléctrica de tipo aeroderivadas para los escenarios uno y dos, operando con gas natural y diésel respectivamente, además, se realiza la comparación de las emisiones estimadas con el software para la dispersión de contaminantes AERMOD VIEW respecto al Límite Máximo Permissible que se establece en la normativa correspondiente a la calidad del aire para cada uno de los contaminantes.

Contaminante	Combustible	Valor Máximo Estimado ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentración de fondo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Límite Máximo Permissible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Norma de Calidad del Aire	Respecto a la Norma
Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), 1 hora	Gas Natural	23.5	14.2	37.7	200	NOM-023-SSA1-2021	- 81%
	Diésel	42.5		56.7			- 71%
Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ), 24 horas	Gas Natural	0	11.04	11.0	104.8	NOM-022-SSA1-2019	- 89%
	Diésel	4.75		15.79			- 84%
Partículas $\text{PM}_{10}$ , 24 horas	Gas Natural	0	25.8	0	70	NOM-025-SSA1-2021	- 100%
	Diésel	1.81		27.61			- 60%
Monóxido de Carbono, ( $\text{CO}$ ) 8 horas	Gas Natural	2.02	385	400.02	10 000	NOM-021-SSA1-2021	- 95%
	Diésel	0.207		385.20			- 96%

Tabla 9.- Resultado de las modelaciones de dispersión de contaminantes.

## Análisis de resultados para las Unidades tipo Turbogas

De acuerdo con la información mostrada en la tabla anterior las cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas, operando al 100% de carga no representan un impacto significativo a la calidad del aire dentro de la zona de estudio, ya que se cumple con los Límites Máximos Permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas para los contaminantes mostrados.

En las Figuras 28, 29, 30, 31, 32 y 33 se muestran las curvas de isoconcentración para los escenarios uno y dos, realizadas mediante el software AERMOD VIEW.

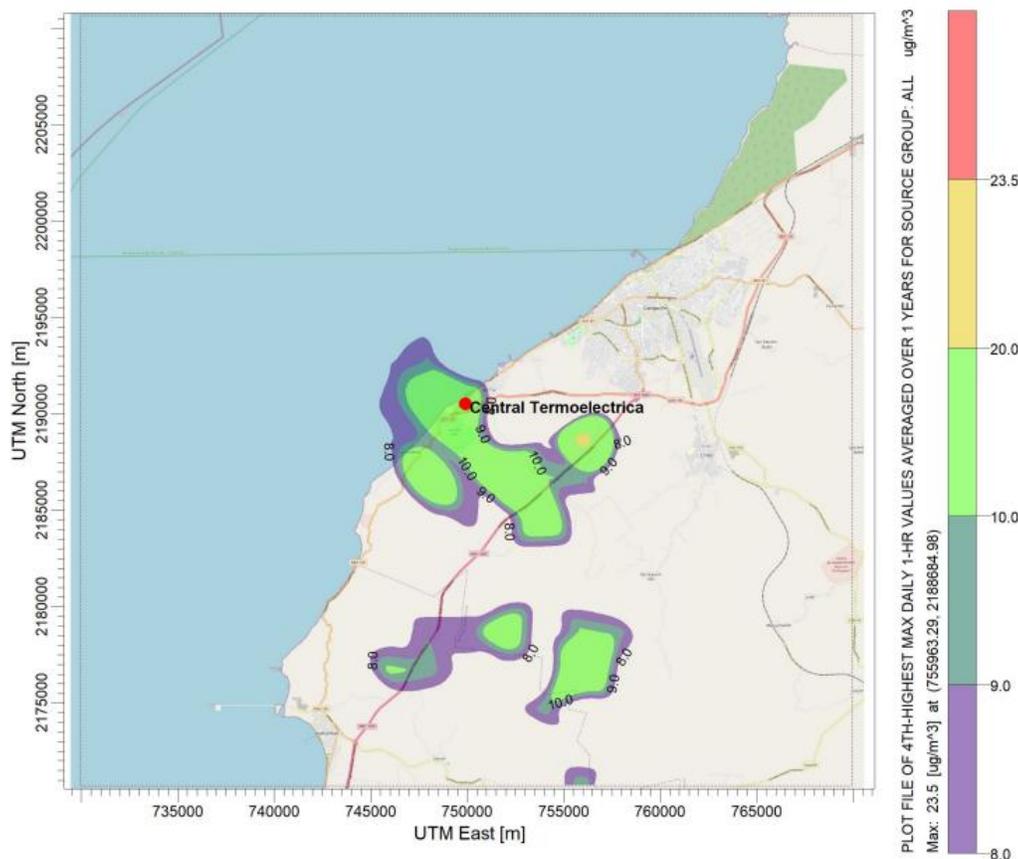


Figura 23.- Curvas de isoconcentración de NO<sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Gas Natural**.

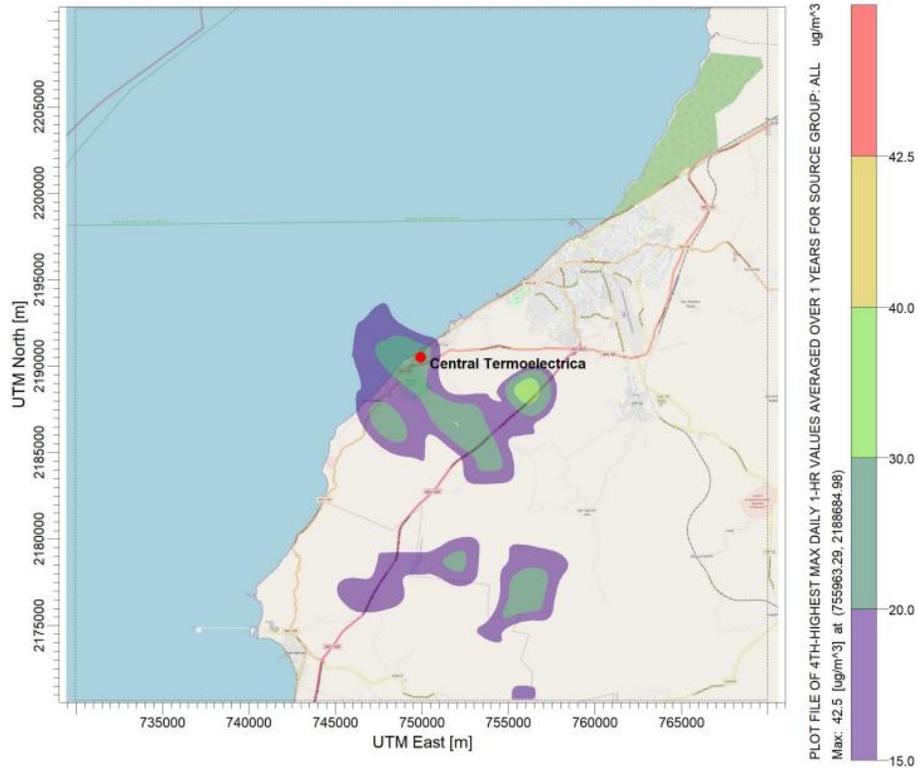


Figura 24.- Curvas de isoconcentración de NO<sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Diésel**.

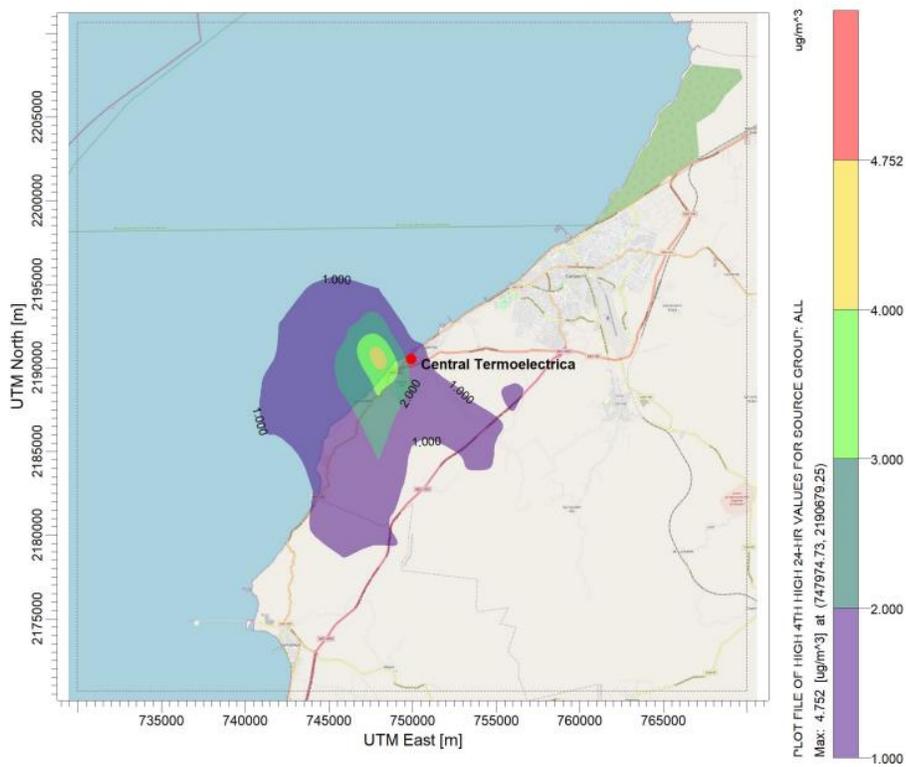


Figura 25.-Curvas de isoconcentración de SO<sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Diésel**.

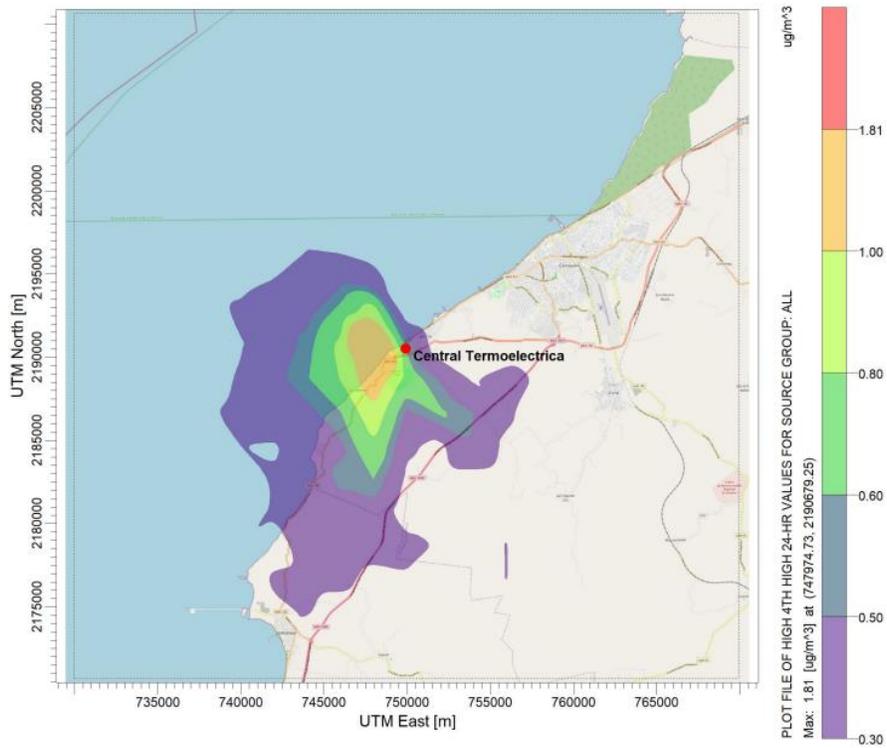


Figura 26.-Curvas de isoconcentración de PM<sub>10</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Diésel**.

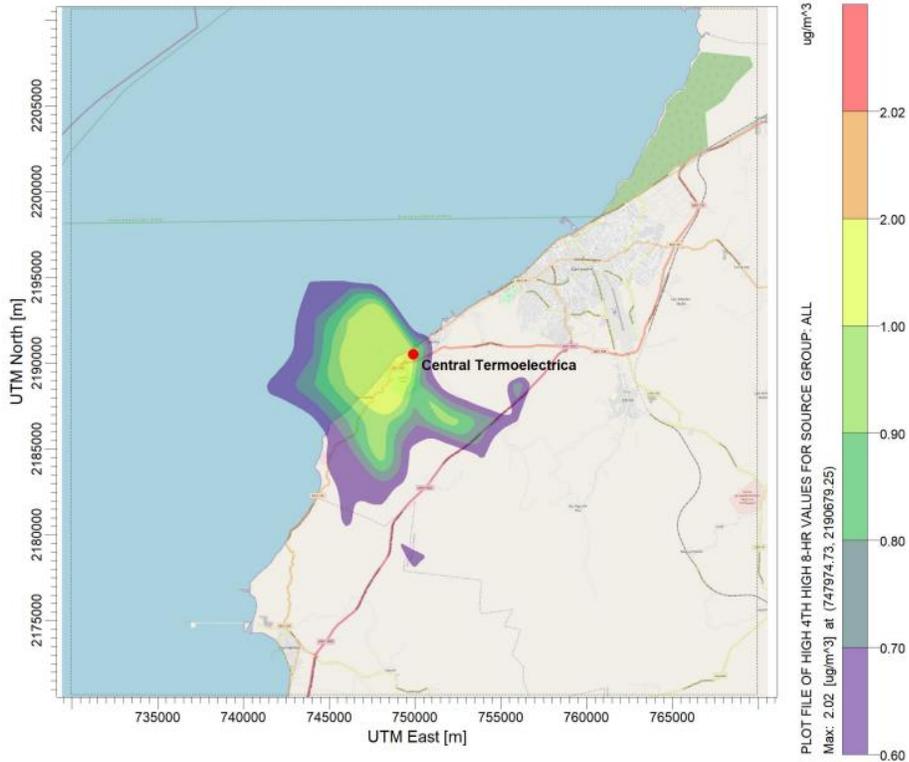


Figura 27.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Gas Natural**.

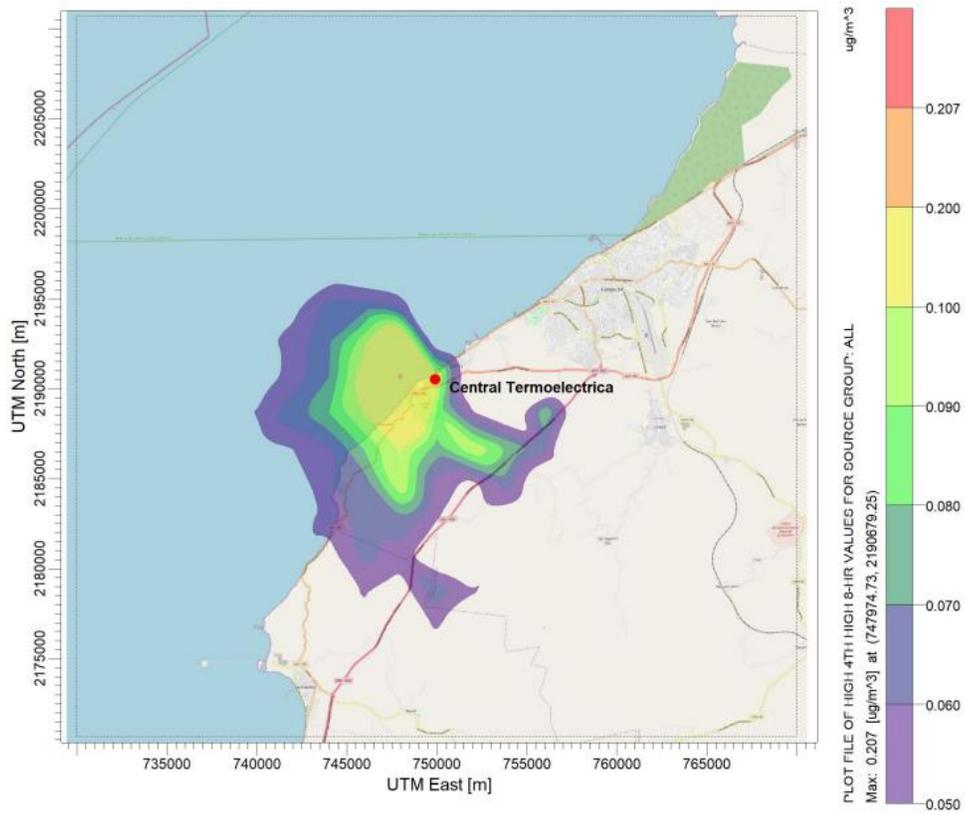


Figura 28.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Diésel**.

### Escenario tres

En la tabla 9 y las Figuras 34, 35, 36 y 37 se muestran los resultados de las modelaciones para unidades convencionales de generación de energía eléctrica, operando con combustóleo y a 100% de carga.

Contaminante	Combustible	Valor Máximo Estimado ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentración de fondo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Total ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Límite Máximo Permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Norma de Calidad del Aire	Respecto a la Norma
Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), 1 hora	Combustóleo	57.3	14.2	71.23	200	NOM-023-SSA1-2021	- 64%
Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ), 24 horas	Combustóleo	73.3	11.04	84.34	104.8	NOM-022-SSA1-2019	- 19%
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ), 8 horas	Combustóleo	17.0	385	402.0	10 000	NOM-021-SSA1-2021	- 96%
Partículas $\text{PM}_{10}$ , 24horas	Combustóleo	35.8	26.485	62.3	70	NOM-025-SSA1-2021	- 11%

Tabla 10.- Resultado de las modelaciones de dispersión de contaminantes.

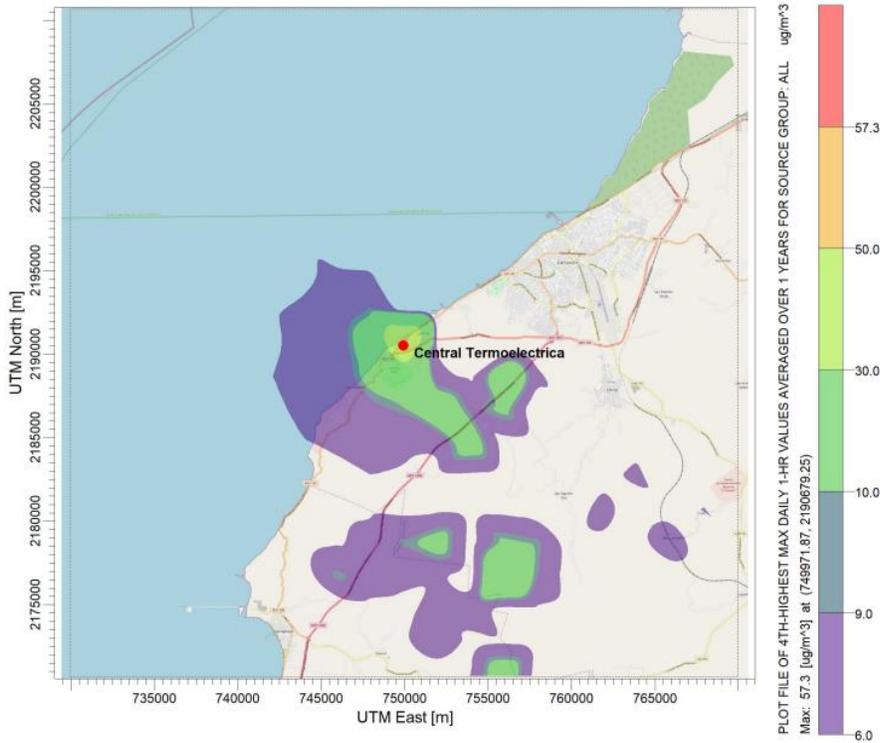


Figura 29.- Curvas de isoconcentración de NO<sub>2</sub> por la operación de tres unidades de generación eléctrica tipo convencionales. Operando con **Combustóleo**.

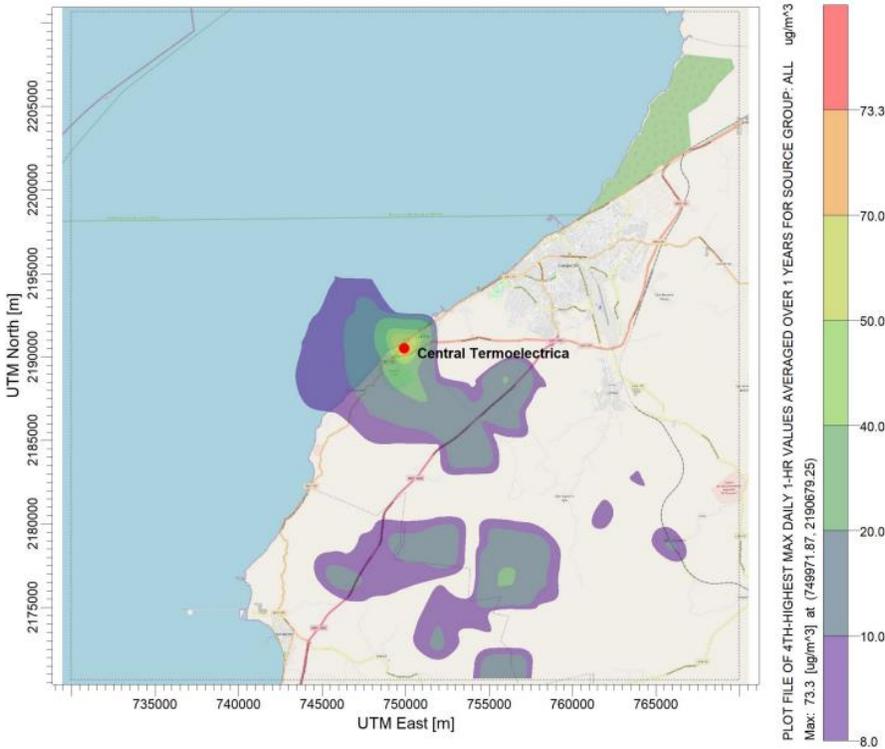


Figura 30.- Curvas de isoconcentración de SO<sub>2</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Combustóleo**.

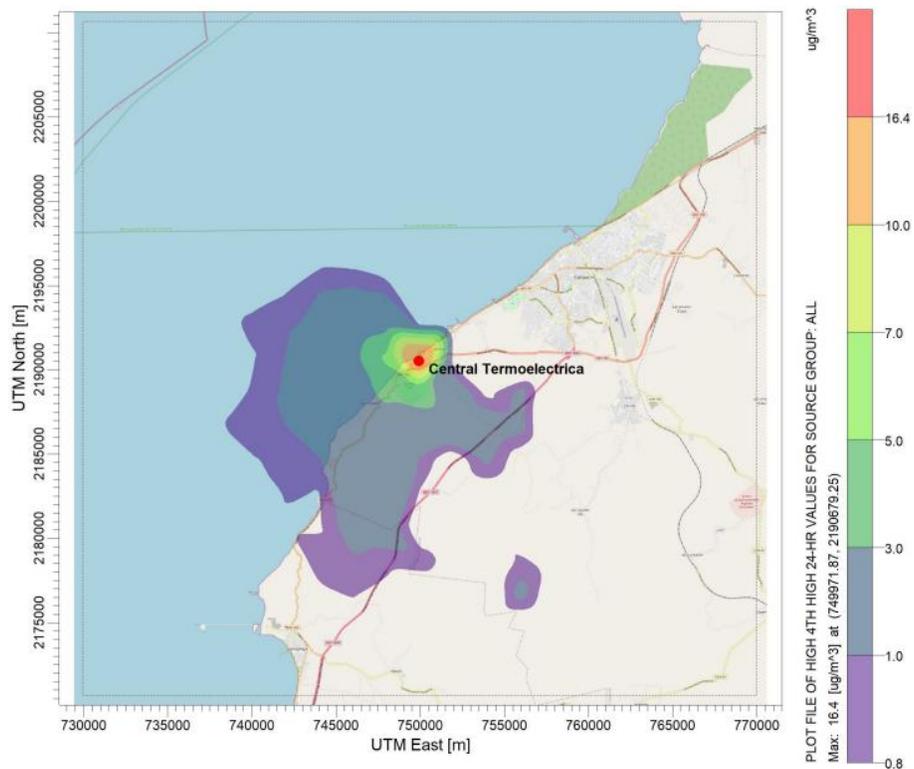


Figura 31.- Curvas de isoconcentración de PM<sub>10</sub> por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Combustóleo**.

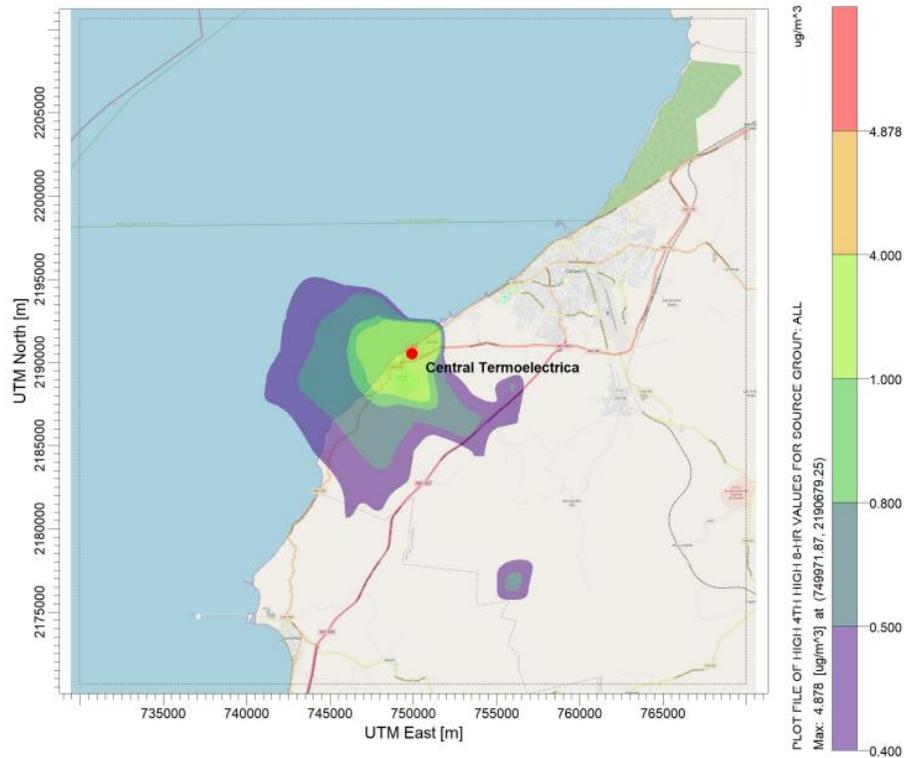


Figura 32.- Curvas de isoconcentración de CO por la operación de cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas. Operando con **Combustóleo**.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante el modelo de dispersión atmosférico en la estimación de las concentraciones de los gases contaminantes considerando las condiciones de operación de cinco unidades tipo Turbogas utilizando gas natural como combustible principal y diésel como combustible de emergencia, así como tres unidades tipo convencionales quemando combustóleo como combustible principal, se tiene que:

- Las concentraciones de gases contaminantes estimadas por el modelo de dispersión dentro del área de estudio se encuentran por debajo de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa en materia de calidad del aire.
- Las concentraciones estimadas por el modelo de dispersión de contaminantes impactan principalmente en lugares despoblados al sureste del punto de referencia. Es importante señalar que en los sitios a impactar no existen asentamientos humanos, ni actividades primarias, secundarias o terciarias que puedan ser afectadas.
- La operación de las cinco unidades tipo aeroderivadas localizadas en el municipio de Lerma no tienen un impacto significativo respecto a las emisiones de gases contaminantes.
- Con la operación de las cinco unidades de generación eléctrica tipo aeroderivadas, empleando gas natural como combustible principal y diésel como combustible de emergencia, se estima que las concentraciones de los gases contaminantes en el municipio de Lerma se encontrarán por debajo de los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normatividad aplicable en calidad del aire

Es recomendable realizar un estudio de dispersión cada año, de esta forma se podrá respaldar que la operación de las unidades de generación de energía eléctrica no impactará de forma significativa en la calidad del aire de la zona aledaña a la ubicación de la central.

## Bibliografía

1. CENACE. (2022). *Centro Nacional de Control de Energía*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenace>
2. CFE. (2023). *Comisión Federal de Electricidad*. Obtenido de <https://www.cfe.mx/Pages/default.aspx>
3. COFEPRIS. (2023). Obtenido de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>
4. COFEPRIS. (2023). *Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios*. Obtenido de Gobierno de México : <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente>
5. CONACYT. (2023). *Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías*. Obtenido de <https://conahcyt.mx/>
6. CRE. (2021). *Comisión Reguladora de Energía*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.cre.gob.mx/>
7. D.J., J. (1999). *Introducción a la Química Atmosférica*. Prensa de la Universidad de Princeton.
8. ECMWF. (s.f.). *Centro Europeo de Pronóstico a Plazo Medio*. Obtenido de <https://www.ecmwf.int/>
9. EPA. (22 de Noviembre de 2022). *Air Pollutant Receptor Modeling*. Obtenido de United States-Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/scram/air-pollutant-receptor-modeling>
10. EPA. (3 de Enero de 2023). *Air Quality Dispersion Modeling*. Obtenido de United States-Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>
11. EPA. (6 de junio de 2023). *Managing Air Quality - Air Quality Modeling*. Obtenido de United States-Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>
12. EPA. (2 de 10 de 2023). *Meteorological Processors and Accessory Programs*. Obtenido de Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/scram/meteorological-processors-and-accessory-programs>
13. EPA. (24 de Febrero de 2023). *Photochemical Air Quality Modeling*. Obtenido de United States-Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/scram/photochemical-air-quality-modeling>

14. EPA. (1 de 10 de 2023). *Related Model Support Programs*. Obtenido de Environmental Protection Agency : <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-related-model-support-programs>
15. Finlayson-Pitts, B. y. (1999). *Química de la atmósfera superior e inferior: teoría, experimentos y aplicaciones*. . Prensa académica.
16. Foster A, K. N. (2011). *Health effects of air quality regulations in Delhi, India*. Atmospheric Environment.
17. Garcés, A., & Haza, U. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado. Vol 3.*, 17.
18. Gryning, S. B. (2007). La influencia de la estabilidad atmosférica en la contaminación del aire en Copenhague. . *Medio ambiente atmosférico.*, 6804-6818.
19. GTAL. (s.f.). *Grupo de Trabajo de Aire Limpio*. Obtenido de <https://www.catf.us/>
20. Hanna, S. y. (2019.). Modelización de dispersión urbana. *Revista de la Asociación de Gestión de Residuos y Aire.*, 353-409.
21. INEGI. (2023). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.inegi.org.mx/>
22. Landín, P. (02 de 11 de 2012). *Centrales de Ciclo Combinado*. Obtenido de Tecnología ESO: <https://pelandintecno.blogspot.com/2012/11/centrales-de-ciclo-combinado.html>
23. LGEEPA. (8 de Mayo de 2023). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Obtenido de Gobierno de la Ciudad de México: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
24. Massolo, L. (2022). Introducción al modelo ambiental. En *Modelos de dispersión y distribución de contaminantes ambientales* . Buenos Aires: UNLP.
25. Mendoza-Lara, O. (2021.). Evaluación del modelo meteorológico WRF para la validación del modelo AERMOD. *Tecnología, ciencia y estudios organizacionales*.
26. México, G. d. (22 de 03 de 2017). *Energía Nuclear*. Obtenido de [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Energia-nuclear.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Energia-nuclear.html)
27. Murcia, U. d. (2020). La atmósfera. *S.A.B.I.O.*, 1-28.
28. NOM-021-SSA1-2021. (25 de 09 de 21). *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0)
29. NOM-022-SSA1-2019. (17 de 06 de 19). *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO2)*. Obtenido de Diario Oficial de la

Federación:

[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0)

30. NOM-023-SSA1-2021. (28 de 09 de 2020). *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación:  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
31. NOM-025-SSA1-2021. (28 de 09 de 21). *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación:  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
32. OMS. (s.f.). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Contaminación del aire y salud.: <https://www.who.int/es/news-room/air-pollution>
33. Perry, S. G. (1992). CTDMPPLUS: A dispersion Modelo for Source near Complex Topography. Part I: Technical Formulations. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, 1-13.
34. Porta, A. (2018). *Calidad del aire: monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
35. Power, M. (2023). *Aero-Derivate Gas Turbines*. Obtenido de FT8 MOBILEPAC: <https://power.mhi.com/products/aerogasturbines/lineup/ft8mp>
36. PRODESEN. (2023-2037). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*. Ciudad de México: Gobierno de México.
37. PRODESEN. (2023-2037). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*. Obtenido de Gobierno de México:  
<https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Prodesen.aspx>
38. Ramírez, F. H. (2015). *Centrales de generación y subestaciones electricas*. Santo Domingo: MSEE.
39. Rodríguez, D. (2015). Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del río. Su relación con condiciones sinópticas. *SciELO Brasil*.
40. Rolf Kehlhofer, B. R. (2009). *Centrales eléctricas de turbinas de vapor y gas de ciclo combinado*. E.U.
41. Seinfeld, J. y. (2016). *Química y física atmosféricas: de la contaminación del aire al cambio climático*. John Wiley.
42. Seinfeld, J. y. (2016). *Química y física atmosféricas: de la contaminación del aire al cambio climático*. SN.
43. Seinfeld, J. y. (2016). *Química y física atmosféricas: de la contaminación del aire al cambio climático*. John Wiley.

44. SEMARNAT. (2023). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat>
45. SENER. (2021). *Secretaría de Energía*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/sener>
46. Turner, D. (2002). *Una revisión del estado de la ciencia del modelado de la calidad del aire. Medio ambiente atmosférico*, 36-38.
47. Turner, D. (2019). *Libro de trabajo de estimaciones de dispersión atmosférica: introducción al modelado de dispersión*. Prensa CRC.
48. USEPA. (2023). *Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>
49. USEPA. (s.f.). *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*. Obtenido de <https://www.epa.gov/>
50. Warner, K. W. (1992). *Contaminación del aire, origen y control*. México: Limusa.
51. Zhang, K. y. (2001). Simulación numérica de flujo turbulento y dispersión de contaminantes en cañones urbanos. . *Medio ambiente atmosférico.*, 27-37.