



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RIO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**DISPERSIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 PROVENIENTE
DEL NUEVO PUERTO DE VERACRUZ HACIA ZONAS ALEDAÑAS Y SUS
EFECTOS POTENCIALES**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. SELENE DEL CARMEN RETA PAVÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. ITZEL GALAVIZ

ASESORES

DRA. CINTHYA SOSA VILLALOBOS

MTRA. IRMA ANGÉLICA GONZALES

SEPTIEMBRE 2022

BOCA DEL RIO, VERACRUZ, MÉXICO



Instituto Tecnológico de Boca del Río
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Boca del Río, Ver 26 de agosto del 2022

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**SELENE DEL CARMEN RETA PAVÓN
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

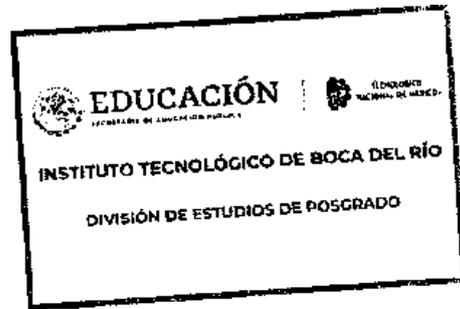
De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la **TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO**, desarrollada por usted cuyo título es:

**“DISPERSIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 PROVENIENTE DEL NUEVO
PUERTO DE VERACRUZ HACIA ZONAS ALEDAÑAS Y SUS EFECTOS POTENCIALES”**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos

**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 dir01_bdelrio@tecnm.mx | technm.mx | bdelrio.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón
Ricardo Flores
VIRREY DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: A-01102-220620

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 26 del mes de agosto de 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

“DISPERSIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 PROVENIENTE DEL NUEVO PUERTO DE VERACRUZ HACIA ZONAS ALEDAÑAS Y SUS EFECTOS POTENCIALES”

Que presenta el (la) alumno(a):

SELENE DEL CARMEN RETA PAVÓN

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA

Director

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

Co-Director

DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS

Asesor

M.C. IRMA ANGÉLICA GARCÍA GONZÁLEZ

Asesor





“2020, Año del Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Boca del Río, Veracruz, 12/agosto/2022

Asunto: **CESION DE DERECHOS Y NO PLAGIO**

**H. CONSEJO DE POSGRADO
PROGRAMA DE POSGRADO MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
PRESENTE**

En la Ciudad de Veracruz, Veracruz a los **12** días del mes **agosto** del año **2022**. El que suscribe **Selene del Carmen Reta Pavón** por mi propio derecho y en calidad de autor de la tesis titulada: **“DISPERSIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 PROVENIENTE DEL NUEVO PUERTO DE VERACRUZ HACIA ZONAS ALEDAÑAS Y SUS EFECTOS POTENCIALES”** (en lo sucesivo la “TESIS”) manifiesto que cedo a título gratuito la totalidad de los derechos patrimoniales de autor que sobre ella me corresponden, a favor del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo el “TecNM”). Lo anterior en términos de los antecedentes y consideraciones siguientes:

- I. Que la presente cesión de derechos de la “TESIS” se transfiera en virtud de lo estipulado en los establecido en los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, sin reservarme acción legal de ningún tipo.
- II. Manifiesto bajo protesta de decir verdad, que la “TESIS” es original, inédita y propia, no existiendo impedimento de ninguna naturaleza para la cesión de derechos que se está haciendo, respondiendo además por cualquier acción de reivindicación, plagio u otra clase de reclamación que al respecto pudiera sobrevenir.
- III. Que la titularidad de derechos de autor de la “TESIS” en términos del artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor (reproducción, en todas sus modalidades, transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de explotación que de la “TESIS” se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer, son propiedad única y exclusiva del “TecNM”, adquiriendo el derecho de reproducción en todas sus modalidades, el derecho de transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de uso que de la “TESIS” se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer. La cesión de derechos se realiza con carácter permanente e irrevocable.
- IV. El TecNM podrá exhibir la “TESIS” a través de cualquier medio, en cualquier parte del mundo, incluso ser modificada, comprendida, traducida y de cualquier forma explotada en su totalidad o parcialidad.
- V. Que no he otorgado, ni otorgaré por ningún motivo, consentimiento alguno para la utilización de la “TESIS” por cualquier medio y su materialización en productos o servicios de cualquier naturaleza, a favor de ninguna persona física o moral, distinta a el “TecNM”.
- VI. Estoy enterado del contenido y alcance legal de la presente cesión de derechos, firmando al final del presente documento para su certificación.





“2020, Año del Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Señalo como correo electrónico para recibir futuras notificaciones: **m209900088@bdelrio.tecnm.mx**.

Agradeciendo de antemano sus atenciones, le envío un cordial saludo

ATENTAMENTE

Selené del Carmen Reta Pavón

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE DE POSGRADO

c.c.p. Archivo



DEDICATORIAS

Dedico este trabajo primeramente a Dios por brindarme el don del entendimiento y de la ciencia para seguir aprendiendo sobre su creación y a mis papás por brindarme su apoyo durante este camino y siempre creer en mí.

También dedico este trabajo a todas las personas que me inspiraron a seguirme preparando, a no rendirme, a dar lo mejor de mí y me enseñaron que las cosas que realmente valen la pena requieren de un gran sacrificio y esfuerzo.

Chio, Omar, Marlene, Karime, Paty y Brenda. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

Al Tecnológico Nacional de México por sus aportes a la ciencia y seguir formando a los profesionistas de México.

A mis papás, porque en ellos encuentro la motivación que me impulsa a lograr mis metas incluso en los momentos más difíciles. Gracias por apoyarme en todos mis proyectos.

A Chio, por siempre llenarme de la alegría que ofrece la vida, por animarme a nunca rendirme y a ver el lado positivo de las cosas.

A mi comité, por su valioso conocimiento que brindaron a este trabajo y su acertada dirección para concluir este proyecto.

RESUMEN

El monitoreo de la calidad del aire, es una actividad considerada indispensable y de gran importancia tanto para el sector público como el privado. Por lo tanto, es importante conocer los niveles de los contaminantes criterio en el aire y observar si éstos están dentro de los límites considerados no dañinos para la población. Desde los años 50's, el material particulado es un indicador utilizado para conocer la calidad del aire en zonas urbanas. El muestreo se llevó a cabo durante la temporada de secas utilizando un sensor fotométrico para medir material particulado y una estación meteorológica Davis para medir los factores climáticos asociados a este estudio. Se realizaron dos repeticiones diarias durante 60 días. Se utilizó la NOM-025-SSA1-2014 para identificar el riesgo de la exposición prolongada a PM_{2.5} y PM₁₀. La presencia de material particulado en suspensión tiene una relación con los factores climáticos y con los eventos meteorológicos reportados en la zona. Los valores promedio registrados fueron de 43.1 µg/m³ para PM_{2.5}. El valor más bajo fue de 12.7 µg/m³. El valor máximo fue de 66.2 µg/m³. Así mismo, para PM₁₀ el valor promedio fue de 74.1 µg/m³. El valor mínimo fue de 20.1 µg/m³ y el valor máximo 112.8 µg/m³. Además, se identificó un nivel de riesgo a la salud alto del 47 %, asociado al PM_{2.5} y 55 % asociado al PM₁₀ durante el periodo de muestreo. Se concluyó que el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} proveniente del Nuevo Puerto de Veracruz se dispersó hacia la zona sur-oeste de la ciudad. Se identificó mayor dispersión durante las tardes. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar la dispersión de material particulado proveniente del Nuevo Puerto de Veracruz hacia zonas aledañas y sus efectos potenciales en la salud.

PALABRAS CLAVE: calidad del aire, material particulado, monitoreo ambiental, zona portuaria

ABSTRACT

Air quality monitoring is a task considered essential and of great importance for both the public and private sectors. Therefore, it is important to know the levels of criteria pollutants in the air and compare if they are within the limits considered not harmful to the population. Since the 1950s, particulate matter has been an indicator used to determine air quality in urban areas. Sampling was carried out during the dry season using a photometric sensor to measure particulate matter and a Davis weather station to measure climatic factors associated with this study. There were two daily repetitions for 60 days. The presence of suspended particulate matter is related to climatic factors and meteorological events reported in the area. The average values recorded were $43.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2.5}. The lowest value was $12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum was $66.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Likewise, for PM₁₀ the average was $74.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The minimum value was $20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the maximum value $112.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In addition, a high level of health risk was identified, 47 % associated with PM_{2.5} and 55 % associated with PM₁₀ during the sampling period. It was concluded that the PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter from the New Port of Veracruz was dispersed towards the southwest area of the city. Greater dispersion was identified during the afternoons and windy days. Therefore, the aim of this work was to analyze the dispersion of particulate matter from the New Port of Veracruz towards surrounding areas and its health potential effects.

KEYWORDS: Air quality, particulate matter, environmental monitoring, docklands.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	13
2.1 Teorías científicas.....	13
2.1.1. Ley de Stoke.....	13
2.2. Contaminación del aire.....	14
2.3. Material particulado.....	17
2.3.1. Características del material particulado.....	18
2.4. Sistemas costeros.....	22
2.4.1. Elementos climáticos.....	23
2.4.2. Impactos de la navegación marítima comercial.....	25
2.5. Estándares permitidos.....	27
2.6. Panorama actual en México.....	28
2.7. Dispersión de contaminantes atmosféricos.....	31
2.7.1. Estabilidad atmosférica.....	32
2.7.2. Modelos de dispersión atmosférica.....	34
2.8. Calidad del aire y salud humana.....	36
2.8.1. Deposición de partículas en el sistema respiratorio.....	36
2.8.2. Riesgos en la salud asociados al material particulado.....	40
3. MARCO REFERENCIAL.....	43
3.1. Lugar de estudio. Puerto de Veracruz.....	43
3.2. Antecedentes.....	46
3.3. Frontera del conocimiento.....	48
4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	51
4.1. Situación Problemática.....	51
4.2. Delimitación del problema.....	53
4.3. Planteamiento del problema.....	54
4.4. Pregunta de investigación.....	54
4.5. Justificación de la investigación.....	54
5. HIPÓTESIS.....	56
5.1. General.....	56
5.2. Particulares.....	56
6. OBJETIVOS.....	57
6.1. General.....	57
6.2. Particulares.....	57
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
8. RESULTADOS.....	64
9. DISCUSIÓN.....	78
10. CONCLUSIONES.....	80
11. RECOMENDACIONES.....	81
12. LITERATURA CITADA.....	83
13. ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Principales contaminantes atmosféricos y sus características. Modificada de Ballester (2005).....	16
<i>Tabla 2.</i> Granulometría de las partículas suspendidas. Fuente: (EPA, 2007)	19
<i>Tabla 3.</i> Componentes mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas suspendidas. Modificada de INECC, 2020.....	21
<i>Tabla 4.</i> Estándares permitidos de contaminantes criterio.	28
<i>Tabla 5.</i> Normas Oficiales Mexicanas que rigen las concentraciones máximas permisibles. Fuente: SEMARNAT, 2020.	30
<i>Tabla 6.</i> Valores límite para PM2.5 y PM10 según la NOM-025-SSA1-2014.	30
<i>Tabla 7.</i> Calidad del aire para valores de PM10.....	31
<i>Tabla 8.</i> Calidad del aire para valores de PM2.5.....	31
<i>Tabla 9.</i> Esquema de estabilidad atmosférica de Pasquill y Gifford.	33
<i>Tabla 10.</i> Correlación para estimar la estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford.	33
<i>Tabla 11.</i> Estimación de emisiones en el Nuevo Puerto de Veracruz.	61
<i>Tabla 12.</i> Descripción de las variables utilizadas en el comando de MATLAB.....	62
<i>Tabla 13.</i> Caracterización de los sitios considerados para el muestreo.	64
<i>Tabla 14.</i> Resultados del PM para los eventos climáticos durante el periodo de muestreo.	66
<i>Tabla 15.</i> Distancia aproximada del asentamiento del contaminante. Obtenido de la modelación gaussiana en MATLAB.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contribución de emisiones de GEI por sector (SEMARNAT, 2022)	29
Figura 2. Principales mecanismos de deposición de partículas atmosféricas en las vías respiratorias. Fuente: Pérez-Balán, 2013.....	38
Figura 3. Regiones del sistema respiratorio. Fuente: Pérez-Balán, 2013.....	40
Figura 4. Localización del municipio de Veracruz.	44
Figura 5. Proyecto del Nuevo Puerto de Veracruz. Fuente: (APIVER, 2020)	45

Figura 6. Área de operaciones del Nuevo Puerto de Veracruz.....	45
Figura 7. Captura de pantalla de la plataforma en línea del SINAICA, mostrando las estaciones del estado de Veracruz. Tomada en noviembre del 2021.	50
Figura 8. Esquema de la situación problemática por planos.	53
Figura 9. Estación meteorológica DAVIS ® en el sitio de muestreo.	59
Figura 10. Consola de la estación DAVIS ® utilizada en el muestreo.	59
Figura 11. Pantalla del instrumento de medición de PM fotométrico.	60
Figura 12. Localización de los sitios de monitoreo.	65
Figura 13. Gráfica marginal de PM2.5 durante los 60 días de muestreo.	67
Figura 14. Gráfica marginal de PM10 durante los 60 días de muestreo.	67
Figura 15. Concentraciones acumuladas de PM2.5 y PM10 en los sitios A, B y D.....	68
Figura 16. Concentraciones de PM2.5 y PM10 del sitio D "La Pinera"	68
Figura 17. Concentraciones de PM2.5 por sitio de muestreo.	69
Figura 18. Concentraciones de PM10 por sitio de muestreo.	69
Figura 19. Dispersión de PM2.5 durante la canícula. Resolución de 100 m.....	70
Figura 20. Dispersión de PM10 durante la canícula. Resolución de 100 m.....	70
Figura 21. Dispersión de PM2.5 durante la primera vaguada. Resolución de 100 m.	70
Figura 22. Dispersión de PM10 durante la primera vaguada. Resolución de 100 m.	71
Figura 23. Dispersión de PM2.5 durante el huracán "Grace". Resolución de 100 m.	71
Figura 24. Dispersión de PM10 durante el huracán "Grace". Resolución de 100 m.	71
Figura 25. Dispersión de PM2.5 durante la primera Onda Tropical. Resolución de 100 m.	72
Figura 26. Dispersión de PM10 durante la primera Onda Tropical. Resolución de 100 m.72	72
Figura 27. Dispersión de PM2.5 durante la segunda vaguada. Resolución de 100 m.....	72
Figura 28. Dispersión de PM10 durante la segunda vaguada. Resolución de 100 m.....	73
Figura 29. Dispersión de PM2.5 durante el Frente Frio núm. 1. Resolución de 100 m.	73
Figura 30. Dispersión de PM10 durante el Frente Frio núm. 1. Resolución de 100 m.....	73

Figura 31. Dispersión de PM2.5 durante la segunda Onda Tropical. Resolución de 100 m.	74
Figura 32. Dispersión de PM10 durante la segunda Onda Tropical. Resolución de 100 m.	74
Figura 33. Dispersión de PM2.5 durante el PM2.5 Frente Frio núm. 2. Resolución de 100 m.	75
Figura 34. Dispersión de PM10 durante el Frente Frio núm. Resolución de 100 m.	75
Figura 35. Concentraciones de PM2.5 durante el periodo de muestreo.	76
Figura 36. Concentraciones de PM10 durante el periodo de muestreo.	76
Figura 37. Nivel de riesgo asociado a PM2.5.	77
Figura 38. Nivel de riesgo asociado a PM10.	77

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la dispersión de contaminantes es una herramienta para conocer el alcance de la contaminación atmosférica en un área específica. A nivel nacional, las grandes metrópolis, como la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, cuentan con un monitoreo en tiempo real de la calidad del aire. En la ciudad de Veracruz poco se conoce de la existencia de un monitoreo adecuado a pesar de toda la actividad productiva para mantener a sus habitantes. Según la Secretaría de Energía (SEMARNAT, 2022), las actividades antropogénicas que más contaminan el aire son la generación de energía, el transporte y la agricultura. En dicho reporte se presenta un estimado de 748 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO_2eq) emitidas en México en 2010, siendo el décimo tercer país con mayor volumen de emisiones de este tipo.

Hoy en día, México cuenta con instrumentos legales para enfrentar el Cambio Climático (CC) y la contaminación atmosférica. Entre ellos se encuentra la Ley General de Cambio Climático (LGCC), la cual proporciona herramientas para la regulación parcial, planeación, evaluación y vigilancia (INECC, 2019). También se cuenta con Normas Oficiales Mexicanas (NOM) como la NOM-025-SSA1-2014 que establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y describe los criterios para su evaluación (SEMARNAT, 2020).

Por otra parte, existen problemas en la salud pública relacionados con una mala calidad del aire, siendo los grupos más vulnerables niños, mujeres embarazadas, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Salazar et al., 2016). Así mismo, se han reportado estudios que demuestran que altos niveles de contaminantes atmosféricos aumentan entre 4 y 8 % el riesgo de contraer cáncer de pulmón (Pope et al., 2002). Igualmente, se describen efectos como la disminución de la función pulmonar, agravamiento del asma, toxicidad sistémica, mal desarrollo del tejido cerebral y problemas renales (Ballester, 2005). Por su parte, el material particulado (PM) se encuentra entre las sustancias contaminantes que más atentan contra la salud, junto con el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), plomo (Pb) y ozono (O_3) (Vallejo et al., 2003).

Según la Administración Oceánica y Atmosférica Estadounidense (NOAA, por sus siglas en inglés), la navegación marítima comercial es responsable de un tercio de las emisiones del sector del transporte (Kibler et al., 2015). Los mismos autores mencionaron que esto corresponde a más de 900 000 toneladas de partículas contaminantes al año y son causantes de cerca de 60 mil muertes anuales.

Aunado a lo anterior, gran parte de las ciudades o comunidades portuarias tienen una mala calidad del aire, esto se debe principalmente a las emisiones diarias de gases contaminantes de los motores de los barcos y buques mercantes. Por otra parte, los puertos tienen una gran importancia económica. Éstos contribuyen al desarrollo de la región, creación de empleos y mejoras en la productividad y competitividad a nivel internacional. México cuenta con un total de 117 puertos, posicionándose entre los diez países con mayor actividad marítima de América Latina (SCT, 2019). Actualmente el Puerto de Veracruz se encuentra entre los puertos más transitales a nivel nacional. Durante más de 300 años, ha sido un centro impulsor de mercados que ejerce funciones de embarque y procesamiento. También ha sido centro de comunicación hacia el interior y exterior del país y sede de operaciones financieras (Gómez-Barquín, 2019). En 2013 se inició la construcción del Nuevo Puerto de Veracruz para poder recibir barcos de mayor eslora y una mayor cantidad de mercancías (Portuaria, 2020).

Con el crecimiento poblacional, existe un aumento en el tráfico portuario y, así mismo, crece la necesidad de optimizar y ampliar las instalaciones del recinto portuario. En julio del 2019 entró en operación la terminal de contenedores del Nuevo Puerto de Veracruz (Gómez-Barquín, 2019).

Barcos más grandes emiten mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera. Los motores a diésel de los buques emiten principalmente CO₂, PM y NO₂. Sin embargo, existen otras fuentes contaminantes dentro de un recinto portuario además del transporte marítimo (SCT, 2020). Otra de las fuentes es la generación de energía eléctrica para el alumbrado vial, el acondicionamiento de oficinas, la operación de grúas y el transporte terrestre.

Dentro del recinto portuario de Veracruz, opera la Coordinación de Protección Ambiental (CPA); órgano encargado de la supervisión del cumplimiento de los lineamientos ambientales, por parte de los contratistas y enlace con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (PROFEPA).

Los puertos alrededor del mundo se ven en la necesidad de implementar estrategias ante el CC y la contaminación atmosférica, debido a que sus efectos aceleran el deterioro de la infraestructura generando pérdidas por incidentes y elevando costos de mantenimiento (Salazar et al., 2016). Esto impone nuevos retos a la actividad portuaria.

Por tal motivo, las empresas portuarias alrededor del mundo demandan a las navieras la reducción de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) para acreditarse como socialmente responsables, y lograr metas ambientales internacionales (SEMARNAT, 2016a). Un

monitoreo de la calidad del aire en el Nuevo Puerto de Veracruz representaría una herramienta para el establecimiento de lineamientos actualizados de reducción de emisiones y, de tal manera, mejoraría el estilo de vida de la población.

Al conocer los niveles de concentración y dispersión del PM10 y PM2.5 de acuerdo con la normativa vigente, se pueden tomar acciones de reducción de emisiones y prevenir daños a la población. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue analizar la dispersión de PM proveniente del Nuevo Puerto de Veracruz en las zonas aledañas.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Para el presente trabajo de investigación se contemplaron las siguientes teorías científicas y conceptos.

2.1 Teorías científicas

2.1.1. Ley de Stoke

Las partículas suspendidas pueden tener formas irregulares. Su tamaño puede ser descrito por un equivalente al diámetro aerodinámico, determinándolo por comparación con esferas perfectas que tienen la misma velocidad de asentamiento. Cuando tales partículas alcanzan su velocidad terminal, la fuerza de gravedad se equilibra por una fuerza de rozamiento que se puede estimar. Se utiliza una versión simplificada de la ley de Stoke para aproximarse a la fuerza de rozamiento (Masters y Ela, 2008).

Fuerza gravitacional = - Fuerza de rozamiento

$$mg = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g = 3\pi\eta vd \quad \text{Ecuación 1}$$

Despejando v de la siguiente manera:

$$v = \frac{d^2 \rho g}{18\eta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

m = Masa de la partícula.

g = Aceleración gravitacional = 9.81 m/s^2 .

d = Diámetro de la partícula.

ρ = Densidad de la partícula (g/m^3).

η = Viscosidad del aire = 0.0172 g/m.s .

v = Velocidad de asentamiento (m/s).

2.2. Contaminación del aire

El aire es uno de los recursos naturales más importantes de la Tierra y a diferencia del agua o el suelo, no existen demandas públicas o privadas sobre el mismo. La calidad de este recurso en cualquier ubicación está en función de una compleja interacción entre diversos procesos naturales y antropogénicos (Álcantara y Padilla, 2005; Ferrelli et al., 2016). Además, el aire se mueve a través de la atmósfera vinculando las fuentes de contaminación a los puntos de impacto (Rosales-Castillo et al., 2001).

El aire atmosférico es una mezcla de gases. Está compuesto de nitrógeno en un 78 %, 21 % de oxígeno y de otros gases menos comunes, entre los cuales el argón es el más destacado. De manera natural también se encuentra en la atmósfera CO_2 y vapor de agua (De la Cruz-Monte de Oca et al., 2011).

El oxígeno en la atmósfera es generado por las plantas por medio del proceso de la fotosíntesis. Por tanto, la atmósfera actual de la Tierra se describe como oxidante, en comparación con la atmósfera reductora rica en hidrógeno que existía antes de que comenzara la vida. El aumento de oxígeno ha hecho que muchos organismos vivos desarrollen defensas antioxidantes (Pérez-Balán, 2013).

Los gases que contiene la atmósfera, en concentraciones distintas a las normales, son dañinos para los seres humanos, los animales y las plantas. Estos incluyen el O_3 , el SO_2 , el NO_2 , el CO y compuestos orgánicos volátiles (COV) (Pérez-Balán, 2013). Algunos de estos COV, como el benceno y el butadieno, son considerados carcinógenos (Figueroa et al., 2016). Estos gases en concentraciones anormales y potencialmente tóxicos son denominados contaminantes del aire.

Además de gases, la atmósfera contiene partículas sólidas y líquidas, cuyo tamaño puede variar desde unos cuantos nanómetros hasta 0.5 milímetros (ESMAP, 2010a). Las partículas más pequeñas que $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) permanecen en el aire por largos periodos de tiempo y forman un aerosol moderadamente estable. Las partículas de mayor tamaño, como las PM_{10} , permanecen un menor tiempo en la atmósfera, debido a su peso se sedimentan a mayor velocidad (Hernández et al., 2017).

La presencia de estas partículas en la atmósfera es una de las características más notorias de contaminación del aire, puesto que la luz se dispersa al chocar con éstas, ocasionando a la atmósfera un aspecto opaco de niebla (Pérez-Balán, 2013). La dispersión de la luz tiene

efectos directos en el clima al alterarse la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie de la tierra (Pérez-Balán, 2013). Tras su emisión a la atmósfera, se produce la extracción del contaminante por vía seca o húmeda; este proceso se llama deposición atmosférica y se define como la masa total de contaminante transferida desde la atmósfera a la superficie en un área y periodo determinados (Mihelcic y Zimmerman, 2012; Arrieta, 2016).

Considerando lo anterior y de acuerdo con Ballester (2005), se considera la contaminación del aire como la presencia de sustancias ajenas a la atmósfera en concentraciones y tiempo determinados, como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden alterar las condiciones naturales de ésta.

Por lo tanto, los contaminantes atmosféricos son los fenómenos físicos, sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, que modifican el estado natural del ambiente, los recursos naturales y la salud humana (Jiménez y Pulgarín, 2010).

Varios autores, entre ellos Delgado (2001) y Valencia (2011), clasificaron los contaminantes como primarios y secundarios de acuerdo a su origen. Los primarios son aquellos emitidos directamente a la atmósfera, tales como: óxidos de azufre (SO_x), CO, óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos, CO₂ y aerosoles. El PM de origen primario incluye la sal de los océanos, cenizas, productos de la erosión, desechos de incendios forestales, polen y las semillas de plantas (Delgado, 2001).

Los contaminantes secundarios no son emitidos directamente desde la fuente, sino que son causados por la interacción o reacciones químicas entre dos o más contaminantes primarios (Tami, 2013). El transporte de estas partículas se debe al movimiento del aire en la atmósfera, lo cual provoca que éstas interactúen entre sí, provocando cambios en sus diámetros y composición (Delgado, 2001). Entre los principales contaminantes secundarios se encuentran el O₃, formado a partir de la reacción de productos de la combustión, y la lluvia ácida, formada de la interacción del SO₂ u NO_x con la humedad atmosférica (Morantes, 2016). En la Tabla 1 se muestran los principales contaminantes atmosféricos.

Por otra parte, las emisiones son la cantidad de contaminante que una fuente emite al aire, usualmente durante una cantidad fija de tiempo; por tal motivo, las tasas de emisión se expresan en unidades de masa por tiempo (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Tabla 1. Principales contaminantes atmosféricos y sus características. Modificada de Ballester (2005)

Contaminante	Formación	Estado físico	Fuentes
PM, humos negros	Primaria y secundaria	Sólido, líquido	Vehículos Procesos industriales Humo de tabaco
SO ₂	Primaria	Gas	Procesos industriales Vehículos
NO ₂	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos Estufas y calderas
CO	Primaria	Gas	Vehículos Industria Humo de tabaco Estufas y calderas
Plomo	Primaria	Sólido	Vehículos Industria
O ₃	Secundaria	Gas	Foto-oxidación de NO ₂

Las unidades de tasa de emisión utilizadas dependen de la fuente, el contaminante y el problema de interés. Las unidades más comunes son g/s, kg/día y toneladas/año. Estas pueden ser altamente variables. La cantidad de material emitido de una misma fuente puede variar con el tiempo, así como la composición del contaminante debido a las condiciones de operación (Soto-Coloballes, 2017). Las emisiones de contaminantes atmosféricos representan un gran riesgo para la población. Directamente ocasionan efectos sobre la salud (Londoño et al., 2011) e indirectamente se relacionan con el CC y el incremento de la magnitud y frecuencia de fenómenos meteorológicos (Ballester, Tenías y Pérez-Hoyos, 1999).

Castro y Escobar (2006) describieron métodos disponibles para clasificar las emisiones del aire:

- Por contaminante específico. Los impactos son determinados para un contaminante en particular.
- Por tipo de fuente. Las fuentes pueden ser puntuales o difusas.
- Por tipo de liberación. Esto incluye procesos naturales, emisiones permitidas, emisiones fugitivas y emisiones accidentales.

Además, para cuantificar la magnitud de las emisiones de contaminantes de aire se utilizan cuatro métodos según Vijay et al. (2004):

- Medición directa.
- Enfoque de balance de masa.
- Modelado de proceso.
- Modelado por factor de emisión.

El método de clasificación más utilizado es por el tipo de fuente de emisión. Estas se clasifican en fijas y móviles. De igual manera, las fuentes fijas se clasifican como fuentes fijas puntuales y dispersas (Aránguez et al., 1999). Las puntuales son grandes focos de emisión en su mayoría instalaciones industriales, servicios públicos o grandes fuentes comerciales. Las dispersas se definen como foco de emisión que se esparcen en un área y suelen ser bastante numerosos o difusos para ser tratados aisladamente (Aránguez et al., 1999; Arrieta, 2016).

La mejor manera de identificar las principales fuentes de contaminación dentro de una zona de estudio es por medio de un inventario de emisiones. Este debe abarcar todas las fuentes presentes en la zona definida y debe suministrar la localización, magnitud, frecuencia, duración y contribución relativa de ellas (Arrieta, 2016).

En México, con respecto a la industria, se debe hacer una medición directa por norma. El equipo de monitoreo debe considerarse como parte de las operaciones de la empresa, con sensores montados permanentemente en las chimeneas o fuentes puntuales (SEMARNAT, 2020). Este es el caso del monitoreo continuo de emisiones.

Otro método empleado es el balance de masa. Se utiliza para determinar indirectamente la tasa de emisión de algunas fuentes. En su forma más básica, esta medición indirecta es una herramienta de contabilización sencilla pero eficaz para el monitoreo de contaminantes. Además, es la manera más fácil para identificar la existencia de emisiones fugitivas o accidentales (Mendoza y García, 2009).

2.3. Material particulado

El material particulado (PM) se define como el conjunto o mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas, con características físicas y químicas, las cuales se encuentran suspendidas en la atmósfera (Arrieta, 2016). El PM constituye un componente indispensable para determinar la calidad del aire de un sitio. Lo anterior es debido a los impactos adversos que ocasionan sobre la salud humana, la deposición ácida, la visibilidad urbana y su atribución en los cambios del clima a escala regional y global (Montecinos,

2008). El tipo y magnitud de los impactos causados por las partículas dependerán de la distribución de su tamaño, composición química, concentración, tiempo de acumulación y exposición.

Como se mencionó anteriormente, estas partículas se distinguen de las moléculas de un gas por su habilidad de causar dispersión de la luz visible y, por tanto, interferir en su transmisión (Pérez-Balán, 2013). Una consecuencia de la presencia de altas concentraciones de aerosoles de estas partículas es la neblina atmosférica (Delgado, 2001; Matus, 2017).

Hoy en día, la combustión para la generación de electricidad, el transporte y los procesos industriales, son los mayores emisores de partículas finas alrededor del mundo. Cada uno emite cerca de un tercio de la emisión total global (Arciniégas, 2012). Arrieta (2016) consideró que las actividades antropogénicas son las principales fuentes de emisión de PM. No obstante, sobresalta que los factores meteorológicos y topográficos, contribuyen a que varíe de manera irregular en la atmósfera el comportamiento del PM_{2.5} y PM₁₀.

Las partículas que se generan directamente de una fuente se conocen como partículas primarias. Las fuentes de las partículas primarias incluyen los sitios de construcción, los campos agrícolas y ganaderos, los caminos no pavimentados y procesos de combustión. En algunos casos, estas partículas se originan por medio de fuerzas que muelen o desgastan los materiales sólidos convirtiéndolos en partículas tan pequeñas como para estar suspendidas en el aire (Pérez-Balán, 2013; Soto-Coloballes, 2017).

Las partículas que se forman de las reacciones en la atmósfera son las partículas secundarias. Estas partículas en suspensión se componen de elementos químicos y biológicos, tales como metales, sales, materiales carbonosos, COV, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas (Arciniégas, 2012).

2.3.1. Características del material particulado

Las partículas en suspensión son de tamaño, forma y composición variada. Su identificación se clasifica con respecto al diámetro aerodinámico, es decir; el diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento (Arciniégas, 2012). De acuerdo con su diámetro aerodinámico, estas partículas se clasifican en menores o iguales a 10 µm (PM₁₀), en menores o iguales a 2.5 µm (PM_{2.5}) y menores o iguales a 0.1 µm (PM_{0.1}) (SEMARNAT, 2014).

Otra categoría empleada para la clasificación es la denominada partículas suspendidas totales (PST) e incluye a todas las partículas con diámetros menores a 100 μm (Herrera-Murillo et al., 2009). Las partículas PM10 y PM2.5 son consideradas una fracción de las PST.

El diámetro de la partícula puede ser determinado geoméricamente, por microscopia óptica o electrónica; por un barrido de luz o por su comportamiento (Delgado, 2001; Peña y Ramírez, 2016; Soto-Coloballes, 2017). Como se mencionó previamente, no todas las partículas tienen forma esférica; por este motivo se utiliza el concepto de diámetro aerodinámico (DA). El DA se define como al diámetro equivalente de una esfera con el mismo comportamiento físico (Pérez-Balán, 2013). Es decir, de una partícula esférica que posee una velocidad de sedimentación similar a la partícula en cuestión, pero con una densidad igual a 1 g/cm^3 (Herrera-Murillo et al., 2009).

La composición química y el tamaño de partícula son características propias del foco emisor. Son un parámetro importante para caracterizar su comportamiento en la atmósfera y, por ende; la concentración a la que puede estar expuesta la población (PC, 2018). De igual manera, determinan la capacidad de penetración y retención en diversas regiones de las vías respiratorias. La denominación de las partículas incluidas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, ya sea en ciencias atmosféricas o en epidemiología y calidad del aire (Pérez-Balán, 2013). Véase Tabla 2.

Tabla 2. Granulometría de las partículas suspendidas. Fuente: (EPA, 2007)

Denominación	DA de la partícula	Proceso de formación
Partículas ultra finas PM0.1	<0.1 μm	<ul style="list-style-type: none"> • Nucleación de gases atmosféricos • Condensación de gases
Partículas finas PM2.5	<2.5 μm	<ul style="list-style-type: none"> • Condensación de gases • Coagulación de partículas pequeñas • Evaporación de neblina y gotas de agua
Partículas gruesas PM10	<10 μm	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos mecánicos (prensado, molienda, abrasión, rompimiento de sólidos/gotas) • Evaporación de aerosoles • Suspensión de polvos

El nivel de penetración del PM a diferentes profundidades del sistema respiratorio depende directamente de su granulometría. Las partículas más pequeñas son respirables en mayor porcentaje (Cruz et al., 2017). Las PM2,5 son 100 % respirables, sin embargo, las partículas

menores a 0,5 μm pueden penetrar los mecanismos de defensa del sistema respiratorio y depositarse en los alvéolos pulmonares (Hernández-Cadena et al., 2007).

Los tiempos de residencia de las partículas en la atmósfera, también dependen de su tamaño. Las PM_{2.5} pueden tener tiempos de residencia de semanas y podrían ser transportadas a miles de kilómetros. Mientras que las PM₁₀ tienen tiempos de residencia de minutos a horas y pueden ser transportadas hasta unos pocos centenares de kilómetros (Préndez et al., 2007).

Las características químicas del PM son igual de diversas que sus características físicas. Su composición depende principalmente de la fuente emisora y de su mecanismo de formación. Vergara y García (2013) describieron que el PM de una región costera está compuesto principalmente de cloruro de sodio proveniente de la sal marina, por otro lado, las partículas de origen geológico están formadas por óxidos de hierro, calcio, sílice y aluminio.

Las partículas provenientes de las fuentes móviles de combustión de gasolina son una mezcla de carbón orgánico, carbón elemental, hidrocarburos pesados y trazas de metales y sulfatos. Las proporciones de estos compuestos varían según la temperatura, los sistemas de inyección del combustible, el catalizador, entre otros (Langella et al., 2016; Cruz et al., 2017). Anteriormente, también se encontraban partículas de plomo debido al aditivo que se le agregaba a la gasolina y al diésel; sin embargo, este aditivo ha sido eliminado. El carbón elemental contribuye con alrededor del 70 al 80 % de las emisiones por combustión. En porcentaje le continúan los sulfatos, entre 20 y 25 %, originados por el aceite lubricante (Cruz et al., 2017).

Dependiendo del tipo de partículas y de su fuente de emisión, en el PM se encuentran compuestos mayoritarios y minoritarios (INECC, 2020) como lo describe la Tabla 3.

El término de metales pesados se utiliza como una clasificación general que incluye metales y metaloides pertenecientes a los grupos del IIA al VIA de la Tabla Periódica (Pérez-Balán, 2013). Se usa a menudo para cubrir una amplia gama de elementos metálicos con masas atómicas que varían de 63 a 201 uma (Vilardell, 2010; Cruz et al., 2017). Este término incluye elementos semimetálicos o metaloides como el boro, arsénico, selenio y telurio. Los metales pueden existir en su forma elemental o como iones disueltos en agua en forma de vapor (De la Cruz-Monte de Oca et al., 2011). Forman sales o minerales en rocas, arenas y polvos y, del mismo modo, una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos

(Pérez-Balán, 2013). Las concentraciones y distribuciones del tamaño de los metales traza se rigen por la naturaleza de las emisiones a la atmósfera como lo son las tasas de deposición húmeda y seca, el estado de las nubes, el intercambio de aire en la atmósfera y transformaciones químicas (Manzur et al., 2013; Pérez-Balán, 2013).

Tabla 3. Componentes mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas suspendidas. Modificada de INECC, 2020.

Compuestos del PM		Descripción
Componentes mayoritarios	Sulfatos	Como contaminante primario derivado de la sal de los mares y de materia mineral, como el yeso; o como contaminante secundario proveniente de la oxidación del SO ₂
	Nitratos	Su forma más común es como NH ₄ NO ₃ . También pueden estar presentes como NaNO ₃ .
	Amonio	Los compuestos más comunes presentes en las partículas son el sulfato de amonio ((NH ₄) ₂ SO ₄) y el nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃).
	Sodio y Cloro	Provenientes de la sal marina.
	Carbón elemental	Conformado principalmente por carbón hollín como producto de la combustión de combustibles fósiles y de biomasa.
	Carbón orgánico	Comprende compuestos orgánicos primarios, derivados de fuentes móviles o industriales, y secundarios, derivados de la oxidación de COV.
	Componentes minerales	Provenientes del material de suelo y roca ricos en aluminio, sílice, hierro y calcio. Son consecuencia de efectos de la fuerza del viento, de construcción y demolición.
	Agua	Existen compuestos como las sales que captan agua de la atmósfera y se convierten en gotas líquidas.
Componentes minoritarios	Elementos traza	Destacan metales pesados de procesos metalúrgicos y de combustión como el plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso.
	Compuestos orgánicos traza	Son compuestos orgánicos individuales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los aldehídos, los ácidos carboxílicos y las cetonas.

Los metales traza se dividen en dos categorías:

- Elementos naturales. Son propios de la corteza terrestre y provienen principalmente de la meteorización de las rocas y la erosión del suelo.
- Elementos antropogénicos. Procedentes de la combustión, fábricas y otras fuentes ocasionadas directamente por el hombre.

La comprensión de la concentración de metales en las partículas atmosféricas permite un mejor estudio de los procesos de transporte, los efectos de la meteorología y las fuentes emisoras (Pérez-Balán, 2013). Por tanto, es de suma importancia para el análisis de las consecuencias sobre la salud humana.

Como se mencionó anteriormente, la evidencia epidemiológica de los efectos del PM en la salud está muy relacionada con el DA; sin embargo, también está relacionada con la composición química del mismo (Cruz et al., 2017). Los componentes geológicos muestran una relación nula o casi nula con efectos ligados a la salud. Otros estudios han identificado a marcadores ácidos como el ion hidrogeno, sulfatos y nitratos como componentes especialmente dañinos. Especialmente los sulfatos han mostrado estar relacionados con efectos pulmonares adversos. Por su parte, la toxicidad del ion nitrato es atribuible a la oxidación de la hemoglobina (Rosales-Castillo et al., 2001; Pérez-Balán, 2013). Se abordará más a fondo las consecuencias en la salud asociados a una mala calidad del aire en el apartado 2.8.

2.4. Sistemas costeros

Silva et al. (2014, p. 11) conceptualizaron la zona costera como *“la franja en la cual el medio marino y el terrestre se constituyen en un sistema cuyos elementos interactúan entre sí”*. La dimensión de la zona costera tiene una gran variabilidad debido a las influencias temporales y espaciales y a los diversos conceptos que se tienen de la tierra y el océano. Generalmente estos límites se definen por el propósito, ya sea científico, administrativo, político o de manejo.

Para el enfoque de este trabajo, se hace referencia a la zona costera como la zona de transición entre el ambiente marino y terrestre. En la mayor parte del litoral mexicano se presentan costas bajas arenosas o playas. Sus rasgos geomorfológicos distintivos son las playas, islas de barrera y deltas. También se encuentran costas mixtas, como bahías con playas limitadas por puntas rocosas. Las primeras son más frecuentes en la costa del Golfo de México y Pacífico Sur, mientras que las costas mixtas ocurren con mayor frecuencia en el Pacífico Central (Silva et al., 2014). Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en México, existen un total de 151 municipios con frente de costa. En el estado de Veracruz, en el municipio con el mismo nombre se ubica el Nuevo Puerto de Veracruz.

Las ubicaciones costeras son propensas a procesos adicionales de transporte de contaminantes atmosféricos creados por la interfaz tierra-mar (Aguilar, 2014; SEMARNAT, 2016b). El estado del tiempo a una escala regional interviene en estos procesos y, por lo tanto, en la calidad del aire de los sistemas costeros urbanos.

2.4.1. Elementos climáticos

La atmósfera terrestre está conformada por diversas capas: Tropósfera, Estratósfera, Mesosfera, Termósfera y Exósfera. Las dos primeras más cercanas a la superficie son las de mayor interés para este estudio. La tropósfera se extiende unos 10 a 15 km desde la superficie y es una capa turbulenta de la atmósfera debido al calentamiento de la superficie y los procesos de enfriamiento del alba y la puesta del sol (Cuevas, 2019). En esta capa se emite la contaminación de actividades humanas y naturales. Una vez que un contaminante atmosférico se ha liberado en la tropósfera, se lleva a cabo el proceso de transporte y transformación del mismo (Masters y Ela, 2008).

A una altitud de 15 a 50 km, se encuentra la estratósfera. Esta capa recibe una radiación más intensa que la tropósfera. La radiación ultravioleta crea reacciones fotoquímicas como la conversión de oxígeno molecular (O_2) a ozono estratosférico (O_3). En esta capa se encuentra la capa de ozono. El ozono atrapa naturalmente el calor, por lo que la temperatura de la estratosfera se incrementa con la altitud. (Herrera-Murillo et al., 2009).

La interacción de masas de aire caliente y frío cerca de la superficie terrestre generan los sistemas de baja y alta presión (Vega de Kuyper y Ramírez, 2014). Los cambios a corto plazo en las propiedades de la tropósfera son llamados temperie, tiempo o estados del tiempo. Se le considera también como cuánta humedad, temperatura y movilidad tiene el aire en el momento de la observación (Rivas, 2018). Cabe mencionar que el clima es la temperie promedio de una región. Las corrientes oceánicas y derivas superficiales, como las corrientes de aire, redistribuyen el calor y, por lo tanto, influyen directamente en el clima (Vega de Kuyper y Ramírez, 2014; Lim, 2017).

El clima comprende un conjunto de condiciones atmosféricas. El estado de la atmósfera en un periodo específico se determina gracias a las características de sus elementos, los cuales se denominan elementos climáticos (Herrera-Murillo et al., 2009; Rivas, 2018). Los elementos climáticos son: temperatura, humedad, precipitaciones, presión atmosférica y viento.

Temperatura

Es un indicador del grado de calentamiento del aire. Es el resultado de la forma de transmisión de la radiación solar a la superficie terrestre. Disminuye gradualmente con la altitud. A lo largo del día el gradiente de temperatura tiende a evolucionar. Durante la noche se lleva a cabo una inversión térmica, lo que genera una atmósfera estable y sin mezclado. En la mañana se disuelve la inversión desde las capas más bajas. La atmósfera más inestable se presenta durante la tarde con el sobrecalentamiento de las capas bajas y la ascensión de columnas de aire caliente (Silva et al., 2014).

Humedad

Es el vapor de agua presente en el aire. Este proviene de la evaporación de las masas de agua como océanos, mares, lagos y ríos, de la transpiración y de la exhalación de los organismos. La humedad es mayor a menor altura y más cerca de la costa.

Precipitaciones

Es la caída de agua procedente de las nubes en diferentes formas: lluvia, nieve o granizo.

Presión atmosférica

Es el peso ejercido por la atmósfera sobre la superficie terrestre. A nivel del mar este equivale a 1 kg por cm². A mayor altura del nivel del mar, se ejerce menos presión.

Viento

Es el desplazamiento del aire prácticamente en sentido paralelo a la superficie terrestre y sucede por la diferencia en el calentamiento del aire y la distinta forma de presión atmosférica resultante de ellas.

Estos elementos climáticos recién mencionados, se ven directamente influenciados por los factores climáticos en el sentido temporal y espacial (Rivas, 2018). Los factores más constantes son: latitud, altitud, relieve, cercanía al mar y corrientes marinas.

Latitud

Es la distancia angular de cualquier punto de la Tierra con referencia al Ecuador. Los rayos solares inciden de manera desigual sobre la superficie de la Tierra, de tal manera, se generan las zonas térmicas.

Altitud

Es la distancia vertical del nivel del mar. A mayor altitud existe una disminución considerable del vapor de agua en la atmosfera.

Relieve

Además de la variación vertical de la temperatura por la altitud, la existencia de una zona montañosa influye en la insolación, el desplazamiento de vientos y en las precipitaciones.

Cercanía al mar

La distancia respecto al mar influye principalmente en las variaciones de la temperatura diaria y estacional debido a que el mar actúa como un almacenador de energía.

Corrientes marinas

Las grandes corrientes marinas circulan entre las zonas ecuatoriales y las polares. Éstas distribuyen la energía solar y transportan el calor de la zona ecuatorial hacia los polos y el frío de éstos hacia la misma.

2.4.2. Impactos de la navegación marítima comercial

El CC demanda nuevos modelos de políticas públicas en la agenda del desarrollo mundial. El sector transporte es el responsable del mayor porcentaje de emisiones de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero, y su inclusión dentro de los programas de mitigación es de suma importancia. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) considera que la contribución del transporte a las emisiones a nivel mundial de este gas es del 13 %.

Por otra parte, la Organización Marítima Internacional (OMI) es el organismo de las Naciones Unidas relacionado con la seguridad marítima y la prevención de la contaminación marina procedente de buques (Lim, 2017).

Dentro de un recinto portuario, se identifican fuentes de emisión móviles como las embarcaciones marinas y los transportes terrestres; y fijas, como acondicionamiento de oficinas y plantas de generación de energía eléctrica. Las emisiones marinas provienen sobretodo de los motores de buques, remolcadores y dragas, que operan dentro de la zona portuaria de acuerdo a las tres operaciones de tráfico marítimo que realiza un buque dentro del puerto, como es crucero, maniobra y hotelling (SEMARNAT, 2007).

Las emisiones procedentes de los buques se pueden llegar a dispersar a cientos de kilómetros más allá de las ciudades portuarias y, por lo tanto, contribuir a consecuencias por una mala de calidad del aire en tierra firme, aunque se hayan emitido en el mar (Lim, 2017). Esto provoca la deposición de compuestos de azufre y nitrógeno, que causan la acidificación de los ecosistemas naturales y amenazan la biodiversidad a través de la eutrofización (Vilardell, 2010; González-Cancelas et al., 2013).

Los buques también liberan GEI provenientes de incineradores, instalaciones de refrigeración, sistemas de extinción de incendios y cargas de vapor. El CO₂ es el más emitido con los gases de escape. Un estudio de la OMI estima que el transporte marítimo internacional emitió 1 046 millones de toneladas de CO₂eq en 2017, lo que corresponde al 3.3 % de las emisiones mundiales (Valdés, 2018).

Con el incremento de las rutas de paso, la instalación de nuevos mercados y la situación económica y política, local y mundial, también incrementa el tráfico marítimo. Se prevé un constante aumento en los años venideros, precisamente por ser el modo de transporte más adecuado para gran escala. Se estima que el 80 % del volumen del comercio se mueve por mar (González-Cancelas et al., 2013); es decir, que el transporte marítimo es uno de los sectores más afectados en la lucha contra el aumento de emisiones atmosféricas .

Esta crisis ambiental ha guiado a la creación de normas de emisión estrictas en ciertas partes del mundo y se espera que otras regiones continúen esa política. La estrategia implementada por la Comisión Europea es un gran ejemplo de esta apuesta. Algunas de las contribuciones más significativas son el cambio de combustible pesado a los combustibles con un bajo contenido de azufre, denominados Low Sulphur Fuel Oil (González-Cancelas et al., 2013). Otra implementación consiste en la instalación de equipos de limpieza a bordo, tales como depuradores y filtros de partículas (González-Cancelas et al., 2013).

El consumo de combustible en el transporte marítimo varía de acuerdo con el tamaño del buque, de la velocidad de marcha y de la potencia de la turbina. No todas las zonas urbanas aledañas a un puerto comercial tienen el mismo impacto ambiental a causa del transporte marítimo. Sin embargo, el monitoreo de la calidad del aire muchas veces es situada en segundo plano debido a que la frecuencia de vientos fuertes y la ausencia de cordilleras montañosas contribuyen a la disipación de contaminantes atmosféricos. Un monitoreo deficiente de la emisión de contaminantes en los sistemas costeros, provocan un

incremento desmedido del tráfico marítimo y vehicular, y como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire.

2.5. Estándares permitidos

Alrededor del mundo se han revisado evidencias acerca de la asociación de los niveles de diversos tipos de contaminantes atmosféricos y los efectos en la salud humana. Instituciones como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) coinciden en que el PM está relacionado con muchos casos de mortalidad y morbilidad. Por este motivo, se han delimitado criterios de la calidad del aire fundamentados en la concentración en masa y expresados en promedios anuales o diarios. De esta manera se establecen estándares de calidad del aire en países como México, Brasil y USA y se determina un límite máximo permisible de exposición diaria al PM_{2.5} y al PM₁₀ (Pérez-Balán, 2013).

En Estados Unidos, los límites de concentración son aprobados por el Congreso y se detallan en la Ley de aire limpio. La Ley de aire limpio (CAA) fue aprobada en 1963 y señalaba que había suficiente evidencia científica que liga la contaminación del aire con los impactos en la salud y el medioambiente (EPA, 2007). La USEPA identifica 2 tipos de estándares para la calidad del aire:

- Estándares primarios: para protección de la salud pública, incluyendo la población más sensible (asmáticos, niños y personas de la tercera edad).
- Estándares secundarios: protección del bienestar de la población, incluye disminución de la visibilidad y daño a animales, vegetación e inmuebles.

Esta organización estipula seis contaminantes primarios revisados y actualizados periódicamente, denominados contaminantes criterio. Los estándares actuales se pueden observar en la Tabla 4. Los estándares que enfocan los indicadores de contaminación son denominados Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS) (USEPA, 2016).

El PM, como contaminante criterio, representa un papel importante en el proceso de obtención de un índice de calidad del aire. Particularmente, este contaminante se rige en México por la NOM-025-SSA1-2014, la cual establece los Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{2.5} y PM₁₀ en el aire ambiente y criterios para su evaluación (SEMARNAT, 2014).

Tabla 4. Estándares permitidos de contaminantes criterio.

Contaminante criterio	Primario/ secundario	Tiempo de exposición	Nivel	Indicación
CO ₂	Primario	8 horas	9 ppm	No exceder más de una vez al año
		1 hora	35 ppm	
Plomo	Primario y secundario	Un mes	0.15 µg/m ³	Considerar como promedio mensual. No exceder
NO ₂	Primario	Una hora	100 ppb	No exceder más de una vez diario
	Primario y secundario	Un año	53 ppb	No exceder media anual.
Ozono	Primario y secundario	8 horas	0.07 ppm	No exceder más de una vez diario
PM _{2.5}	Primario	Un año	12 µg/ m ³	No exceder media anual.
	Secundario	Un año	15 µg/ m ³	No exceder media anual.
	Primario y secundario	24 horas	35 µg/ m ³	No exceder media anual.
PM ₁₀	Primario y secundario	24 horas	150 µg/ m ³	No exceder más de una vez al año
SO ₂	Primario	Una hora	75 ppb	No exceder más de una vez diario
	Secundario	3 horas	0.5 ppm	No exceder más de una vez al año

ppm: partes por millón

ppb: partes por billón

µg/m³: microgramos por centímetro cúbico

2.6. Panorama actual en México

Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGEI), las emisiones directas de GEI en México aumentaron a 665 millones de toneladas de CO₂eq, posicionando al país en el lugar 13° de los países con mayor volumen de emisiones de este tipo (SEMARNAT, 2022).

Las emisiones de GEI en 2019 estimadas en unidades de CO₂eq totalizaron 736.6 millones de toneladas. La contribución estimada por sector es la siguiente: Energía 503 817.6 ton; Agricultura 92 184.4 ton; Procesos Industriales 61 226.9 ton; Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura, 46 892.4 ton y Desechos 44 130.8 ton. Se puede observar más desarrollados en la Figura 1.

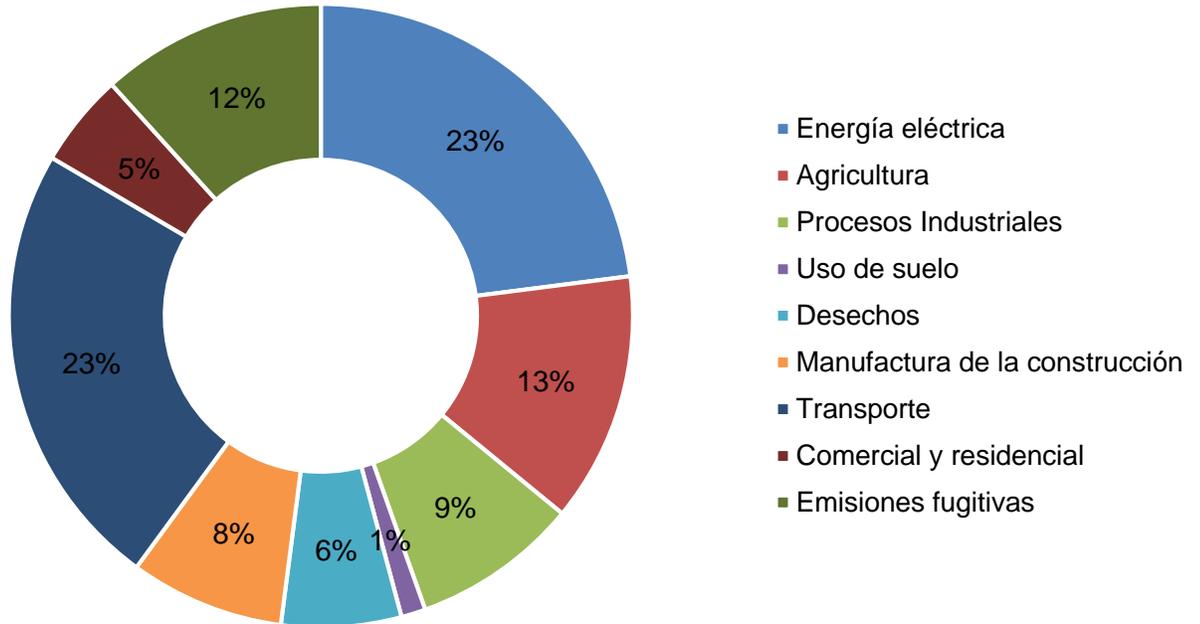


Figura 1. Contribución de emisiones de GEI por sector (SEMARNAT, 2022)

Debido al incremento en las emisiones contaminantes, México se ha comprometido a cumplir objetivos internacionales para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. Entre los más importantes se encuentran el Protocolo de Kyoto y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). En México, la CMNUCC entró en vigor en 2000 y desde entonces se ha logrado el establecimiento de leyes y políticas ambientales. Además, el fomento decisiones de inversión consientes sobre el cuidado del medio ambiente y la creación de mercados de carbono para la reducción de emisiones a menor costo (SEMARNAT, 2016c).

El principal instrumento legal con que cuenta México para enfrentar el CC es la LGCC, la cual se encarga de regular, fomentar y posibilitar la instrumentación de la política nacional de CC e incorpora acciones de adaptación y mitigación. La SEMARNAT (2018) expuso que la LGCC prevé una serie de instrumentos financieros, regulatorios, técnicos, de planeación, evaluación y vigilancia de la política pública de CC. Entre sus instrumentos de planeación destaca la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENECC). Este es el instrumento rector de la política nacional en el mediano y largo plazo para enfrentar los efectos del CC y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.

El objetivo último de la CMNUCC es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel deberá lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al CC, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible (SEMARNAT, 2015). México tiene el quinto lugar a nivel mundial en la implementación de proyectos de desarrollo limpio y de reducción de emisiones, mismos que se han utilizado en las áreas de recuperación de metano y energías renovables (SEMARNAT, 2015).

Los valores límites permisibles en México para la concentración de los contaminantes criterio se estipulan en las NOMs presentadas en la Tabla 5.

Los valores límites estipulados en la NOM-025-SSA1-2014 para PM10 son 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 24 horas de exposición y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual. En el caso de PM2.5, el límite diario es de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el anual de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (SEMARNAT, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 5. Normas Oficiales Mexicanas que rigen las concentraciones máximas permisibles.

Fuente: SEMARNAT, 2020.

Contaminante criterio	NOM vigente
O ₃	NOM-020-SSA1-2014
NO ₂	NOM-023-SSA1-1993
SO ₂	NOM-022-SSA1-2010
CO ₂	NOM-021-SSA1-2020
PM2.5 y PM10	NOM-025-SSA1-2014

Tabla 6. Valores límite para PM2.5 y PM10 según la NOM-025-SSA1-2014.

Contaminante	Periodo promedio	Valor límite
PM10	24 horas	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Un año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM2.5	24 horas	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Un año	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Con la finalidad de contemplar riesgos a la salud de la población, en febrero del 2020, entró en vigor la NOM-172-SEMARNAT-2019: “Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud”. Esta norma determina la calidad del

aire de acuerdo al nivel de riesgo asociado con las concentraciones de los contaminantes criterio. En el caso de PM2.5 y PM10 estos niveles se representan en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Calidad del aire para valores de PM10.

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM10 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	≤ 50
Aceptable	Moderado	>50 y ≤ 75
Mala	Alto	>75 y ≤ 155
muy mala	Muy alto	>155 y ≤ 235
Extremadamente mala	Extremadamente Alto	>235

Tabla 8. Calidad del aire para valores de PM2.5.

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM2.5 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	≤ 25
Aceptable	Moderado	>25 y ≤ 45
Mala	Alto	>45 y ≤ 79
Muy mala	Muy alto	>79 y ≤ 147
Extremadamente mala	Extremadamente alto	>147

Los estándares en materia de la exposición de la población a los contaminantes varían alrededor del mundo. Como se puede observar, en México los niveles permitidos son más altos que los recomendados por la OMS o por la USEPA. La evidencia bibliográfica acumulada indica que los contaminantes atmosféricos son responsables de afectaciones en la salud. Esto es, a la mortalidad general, de la mortalidad infantil, de la mortalidad de mayores de 65 años y de las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y cardíacas (ESMAP, 2010b; Oyarzún, 2010). De allí la importancia de actualizar las NOMs para la protección de la salud por exposición a los contaminantes atmosféricos.

2.7. Dispersión de contaminantes atmosféricos

Las concentraciones de los contaminantes atmosféricos dependen principalmente de las circunstancias de dispersión de la atmósfera. El transporte de estos contaminantes depende del estatus de la atmósfera y de las condiciones meteorológicas, es decir, turbulencias atmosféricas, velocidad y dirección del viento, radiaciones solares, entre otras (Arrieta, 2016).

Los contaminantes en la atmósfera se dispersan de manera similar al agua en un río. En el proceso de dispersión de los contaminantes, éstos suben con el aire caliente y la pluma o penacho se desplaza desde la fuente. Posteriormente el proceso de mezcla y turbulencia producen que la pluma se extienda y se disperse con el viento (Cabrera-Fernández y Torres, 2012).

El transporte de la pluma depende de la velocidad, dirección y altura del viento y del tiempo promediado (Cabrera-Fernández y Torres, 2012). La velocidad y dirección del viento están normalmente medidas a una altura de diez metros sobre el nivel del terreno. La velocidad del viento se mide usando un anemómetro y la dirección usando una veleta.

Diferentes tipos de fenómenos influyen en la acumulación de contaminantes desde zonas próximas a las fuentes de emisión o el transporte de los mismos hacia zonas más o menos alejadas (Morales et al., 2021). La dispersión de los contaminantes aumenta con la velocidad y la turbulencia del viento. Por otra parte, la estabilidad atmosférica dificulta la dispersión y, en consecuencia, contribuye a la acumulación de los mismos cerca de las fuentes emisoras (Montecinos, 2008).

Como se mencionó en el apartado 2.4.1, la temperatura del aire disminuye con la altitud. Las masas de aire más cercanas a la superficie terrestre se calientan y los gases se expanden y disminuyen su peso (Puigcerver y Carrascal, 2008). Al ser más ligeras, ascienden hacia capas más altas; durante su ascensión se enfrían progresivamente provocando una dispersión vertical de los contaminantes (Montecinos, 2008).

Usualmente, las condiciones más turbulentas ocurren cuando la velocidad del viento es de baja a moderada y presenta intensa radiación solar (Cabrera-Fernández y Torres, 2012). Las condiciones atmosféricas sumamente estables ocurren durante las noches claras con poco viento y pueden mantener los contaminantes cerca de la tierra y en las cercanías de la fuente de descarga, produciendo concentraciones altas de contaminantes en la pluma (Cabrera-Fernández y Torres, 2012).

2.7.1. Estabilidad atmosférica

Montoya et al. (2004) conceptualizaron la estabilidad atmosférica como la mezcla en la atmósfera entre aire y un contaminante debido a la generación de turbulencia por fuerzas naturales. En una atmósfera estable, el aire ascendente está a menor temperatura que el circundante.

Durante una inversión térmica, se frena esta dispersión vertical. Los contaminantes se confinan en un tapón térmico de efecto barrera denominado como capa de inversión. Los fenómenos de inversión térmica no provocados por la topografía, se producen sobre todo en invierno, en situaciones anticiclónicas o de altas presiones correspondientes a días soleados y sin nubes (Montoya et al., 2004; Álvarez et al., 2017). Las inversiones térmicas son el caso más frecuente de estabilidad atmosférica. En ésta, el gradiente de temperatura es positivo; es decir, la temperatura aumenta con respecto a la altura.

El esquema más reconocido y utilizado para cuantificar la estabilidad atmosférica es el propuesto por Pasquill y Gifford (Manzur et al., 2013). Este esquema clasifica la estabilidad ambiente utilizando letras de la A a la G, siendo A la clasificación más inestable y G extremadamente estable. Cada una resume el comportamiento de la mezcla en la atmosfera bajo distintas condiciones.

Tabla 9. Esquema de estabilidad atmosférica de Pasquill y Gifford.

Estabilidad Pasquill-Gifford	Caracterización
G	Extremadamente estable
F	Muy estable
E	Estable
D	Neutral
B O C	Inestable
A	Muy inestable

Las estabilidades de A a C ocurren durante el día con cielo despejado. Las clasificaciones E y F ocurren durante la noche y con poco viento. La estabilidad G acontece durante la noche y sobre algún cuerpo de agua grande. En este sentido, la estabilidad D figura una estabilidad neutral y ocurre con mayor frecuencia (Santa Cruz, 2000).

Tabla 10. Correlación para estimar la estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford.

Velocidad del viento (m/s)	Radiación solar intensa	Radiación solar moderada	Muy poca radiación solar	En la noche. Poca nubosidad	En la noche mayor nubosidad
<2	A	A/B	B	G	G
2 - 3	A/B	B	C	E	F
3 - 4	B	B/C	C	D	E
4 6	C	C/D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

2.7.2. Modelos de dispersión atmosférica

La dispersión de un contaminante en la atmósfera se puede estimar y predecir por medio de un modelo de dispersión. Holmes y Morawska (2006), lo describieron como una herramienta para estimar y calcular la concentración y flujo de una sustancia sobre la atmósfera, respecto a sus fuentes de emisión (Arrieta, 2016).

La modelación permite determinar los resultados o predecir lo que podría ocurrir a un sistema a partir de un conjunto de datos de entrada (Cabrera-Fernández y Torres, 2012). Es una herramienta para innovación y entendimiento de procesos en la naturaleza con base en sus partes observables.

Los modelos de dispersión atmosférica evalúan el cambio de la concentración en el tiempo y el espacio. De esta manera, permite predecir y analizar la calidad del aire y así, colaborar en las decisiones políticas y de gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire (Cabrera-Fernández y Torres, 2012).

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes en su dispersión y transformación en la atmósfera. Prato (2012) explicó que para la modelación se requiere considerar los siguientes fenómenos físicos:

- El movimiento de fluidos gaseosos;
- La transferencia de calor al interior del fluido;
- La transferencia de masa de la salida de la fuente a la atmósfera y a los receptores;
- Los procesos de transformación que ocurren al interior del fluido;
- Los factores externos como la meteorología del lugar; y
- La geografía del lugar y el uso del suelo.

Existen modelos diseñados para situaciones determinadas. Antes de elegir el tipo de modelo adecuado se debe tener en cuenta las variables de entrada y las condiciones que puedan interferir con estos datos (Álvarez et al., 2017). Según Prato (2012), los modelos más utilizados para la dispersión atmosférica son los siguientes:

- Analíticos: Utilizan la ecuación de transporte-difusión después de asumir ciertas hipótesis y condiciones importantes que restringen su marco de aplicación.

- Estadísticos: Permiten conocer la concentración de los contaminantes a partir de parámetros meteorológicos y de series históricas de mediciones de contaminación. En este modelo no es necesario tener un inventario de emisiones.
- Numéricos: Las concentraciones se calculan a partir del inventario de emisiones. Para esto, se resuelven ecuaciones diferenciales de caracterización, mediante el método de volúmenes finitos.
- Gaussiano de Dispersión: Son de uso común en problemas de dispersión contaminantes no reactivos de fuentes puntuales como chimeneas industriales. Suponen que la pluma de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss de las concentraciones en torno al eje definido por la dirección del viento.

El modelo Gaussiano de dispersión deduce los niveles de inmisión en un punto del espacio de coordenadas (x,y,z) cuyo origen se fija en la base de la chimenea (Arrieta, 2016). En el caso de PM se emplea una versión de la ecuación que emplea la Ley de Stoke. Quedando de la siguiente manera:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

C= Concentración del contaminante (g/m³)

Q=Caudal de emisión (g/s)

σ=coeficientes de dispersión turbulenta. Dependen de la estabilidad atmosférica.

Lejos de la línea central, la pluma está representada por los coeficientes de dispersión, “x” corresponde a la dirección del viento, “y” corresponde al eje horizontal y “z” al vertical. Los parámetros de dispersión se calculan en función de la distancia y la estabilidad atmosférica.

La sofisticación del modelo a utilizar depende principalmente del nivel de comprensión y entendimiento que se tenga del sistema. En ocasiones, no se comprende completamente el problema, o el sistema no se encuentra bien definido; dando lugar a que el conocimiento y manejo del modelo de simulación sea incompleto.

2.8. Calidad del aire y salud humana

Pérez-Balán (2013) expresó que la exposición humana a la contaminación del aire es tan antigua como la exposición al fuego. La contaminación en interiores fue un problema para los primeros humanos debido al empleo del fuego en espacios pequeños.

La influencia de la contaminación del aire en la salud comenzó a estudiarse intensivamente a inicios del siglo XX. Esto se debió a una serie de eventos de contaminación que causaron estragos significativos en la población. Algunos de estos fueron la niebla en el valle Meuse, Bélgica en 1930, la inversión térmica en Donora, Pensilvania, Estados Unidos en 1948 y la Gran Niebla de Londres, Inglaterra en 1952 (González y Carlsson-Kanyama, 2007).

El PM₁₀ fue considerado como un indicador de riesgo a la salud en la población en general a partir de los años cincuenta; pues se comenzaron a asociar con las emisiones industriales y vehiculares, la quema de carbón y la quema de combustibles fósiles. En la década de los noventa se presentaron una serie de estudios epidemiológicos a corto y largo plazo que demostraron la asociación reveladora entre la exposición a partículas atmosféricas y efectos adversos a la salud (Pérez-Balán, 2013).

Los principales efectos provocados por el PM que se han detectado son padecimientos respiratorios y cardiovasculares, los cuales provocan un incremento de la mortalidad (Pérez Carpio et al., 2015). Estas consecuencias tienen mayor impacto entre grupos de población susceptible como son los niños, las personas con enfermedades cardiovasculares y respiratorias obstructivas crónicas y los adultos mayores (Pope et al., 2002; Onatra et al., 2009; Pérez-Balán, 2013)

2.8.1. Deposición de partículas en el sistema respiratorio

En los seres humanos, la porción posterior de la nariz, laringe, tráquea, bronquios y bronquiólos están revestidos en su interior por una mucosa ciliar. A esta área que recubre tejidos y vías del sistema respiratorio se denomina epitelio pulmonar (Salazar et al., 2016). Este moco es preparado y secretado por las células constituyentes de los tejidos (Cruz et al., 2017).

Como se mencionó en el apartado 2.3, las propiedades físicas intrínsecas de las partículas atmosféricas determinan el nivel de penetración y acumulación de PM en el tracto respiratorio. Tales factores son tamaño, densidad y forma; y dan lugar a su comportamiento aerodinámico. Otros factores que intervienen son la anatomía de las áreas nasal, oral y

faringea, los vellos nasales, la distribución de la mucosa, y la dimensión y geometría de los conductos desde los cornetes hasta el tracto respiratorio (Oyarzún, 2010).

Los mecanismos de acumulación de PM en el sistema respiratorio se ven afectados directamente por la velocidad del flujo y por las propiedades de la partícula. Éstos son: sedimentación, impacto, intercepción y difusión (Figura 2).

Sedimentación

La sedimentación es el mecanismo principal de deposición de partículas mayores a 1 μm . Se ocasiona cuando la velocidad del flujo de aire en el tracto respiratorio es lenta, el tiempo de residencia de la partícula es alta y el diámetro de los ductos son pequeños (Valencia et al., 2011). Las partículas suspendidas en un gas se depositan por la influencia de la fuerza de gravedad. Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a la Ley de Stoke, la velocidad de asentamiento de las partículas es proporcional a la densidad de las partículas por su diámetro al cuadrado.

Impacto

Por efecto de la inercia, cuando el flujo de aire inhalado cambia de dirección, cualquier partícula suspendida continúa la trayectoria previa del flujo. Las partículas al salir del flujo se impactan contra las paredes del epitelio pulmonar. Este impacto de las partículas es la principal forma de deposición en el tracto respiratorio (Pérez-Balán, 2013).

Intercepción

La intercepción ocurre cuando la trayectoria de las partículas se aproxima a las paredes del epitelio de las vías respiratorias. La partícula entra en contacto con las paredes y queda retenida por la mucosa. Es el principal mecanismo de acumulación para las fibras.

Difusión

La difusión es el mecanismo de deposición más común para partículas ultra finas, es decir, menores de 0.5 μm . Se presenta principalmente en el alveolo, donde el flujo de aire es lento (Pérez-Balán, 2013).

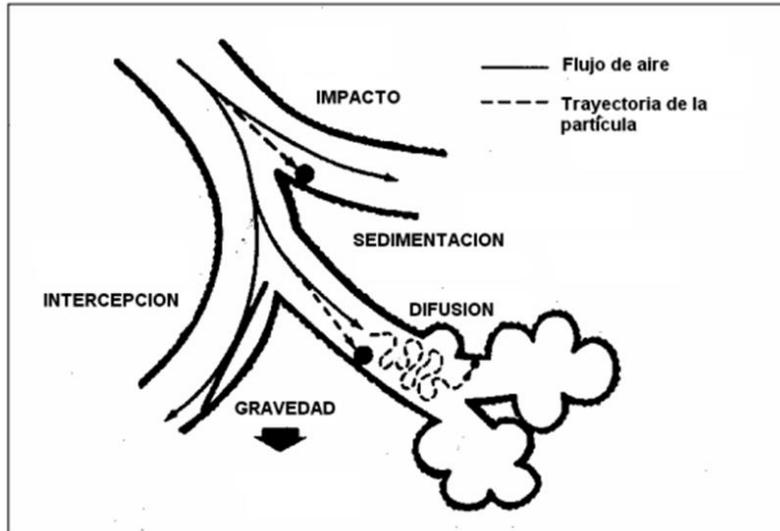


Figura 2. Principales mecanismos de deposición de partículas atmosféricas en las vías respiratorias. Fuente: Pérez-Balán, 2013.

Por otra parte, el sistema respiratorio presenta de manera natural ciertas defensas contra la contaminación del aire, en especial de partículas mayores a $2.5 \mu\text{m}$. De esta manera, el sistema respiratorio trabaja como un filtro cada vez que una persona inhala aire contaminado por partículas. En diversas etapas del sistema se van removiendo ciertas fracciones de tamaño de PM. De igual manera, la piel también protege a los órganos internos de muchos contaminantes.

De acuerdo con Pérez-Balán (2013), el sistema respiratorio se divide en tres regiones para propiciar el estudio de impacto por contaminación del aire. Lo anterior partiendo de la estructura anatómica, la deposición del PM y las propiedades de depuración (Romero-Placeres et al., 2004; Salazar et al., 2016).

Nasofaringe

La región nasofaringe es la vía de entrada del aire al cuerpo y, por lo tanto, es la que tiene el primer contacto con los componentes del aire respirable. Aquí se acondiciona la temperatura y humedad del flujo de aire inhalado. En esta sección es dónde se lleva a cabo la remoción de grandes partículas inhalables, es decir, las mayores a PM₁₀ (Oyarzún, 2010). La conforman nariz, cornetes, epiglotis, faringe y laringe. Las fosas nasales están situadas hacia abajo para que las partículas no se puedan establecer en ellas. Los folículos pilosos de la cavidad nasal constituyen la primera etapa de filtración. El moco en la nariz, la boca y la garganta aumenta la eficacia de eliminación de las partículas más grandes. Después de pasar por la cavidad nasal, el aire inhalado se dirige hacia la faringe y,

posteriormente, a la laringe. Aquí las partículas son sustraídas por su colisión en las paredes mucosas del epitelio (Ballester et al., 1999; Pérez-Balán, 2013).

Traqueobronquial

En la región se traqueobronquial conduce el flujo de aire inhalado desde las vías aéreas superiores de la tráquea hacia los pulmones. Está compuesta por conductos y ramificaciones que van hasta los bronquios y bronquiolos (Pérez-Balán, 2013). El epitelio traqueobronquial está cubierto de cilios y mucosidad. Esta capa mucociliar transporta las partículas entre 2.5 y 10 μm , localizadas en los bronquios y tráquea, hacia la parte posterior de la boca para finalmente ser expulsadas (Pérez Carpio et al., 2015).

Pulmonar

La región pulmonar está conformada por los ductos alveolares y los alveolos. En los alveolos es donde se lleva a cabo el intercambio gaseoso (Salazar et al., 2016). El oxígeno proveniente del aire inhalado atraviesa la delgada membrana alveolar para así disolverse en el plasma sanguíneo. Posteriormente, el oxígeno se difunde hacia los eritrocitos y finalmente a la hemoglobina para poder ser transportada a los tejidos del cuerpo (Pérez-Balán, 2013). Las partículas menores a 2.5 μm pueden estar presentes en esta región. El alveolo está conformado por dos tipos de células epiteliales: las células tipo I que cubren la mayor parte del epitelio respiratorio y constituyen una capa delgada con una superficie lisa y las células tipo II preparan y secretan el PM gracias a unas microvellosidades (Cruz et al., 2017).

Otra de las células principales es el macrófago alveolar. Se encuentra en la superficie alveolar y su función es fagocitar material ajeno para preservar la esterilidad de la cavidad alveolar. Este tipo de células son muy eficientes en la remoción del PM. La función de los macrófagos se ve afectada por la presencia de material aerotransportado en el flujo de aire inhalado (Pérez-Balán, 2013; Cruz et al., 2017).

Como se puede ver, el aire inhalado recorre un largo camino por el sistema respiratorio. El flujo de aire entra con una alta velocidad por la nariz y se modera paulatinamente cuando continua por la cavidad de los conductos de aire (Pérez-Balán, 2013). La corriente cambia de dirección continuamente al adentrarse más al pulmón. Finalmente, en la región pulmonar la velocidad del aire es muy lenta gracias a las bifurcaciones del sistema.

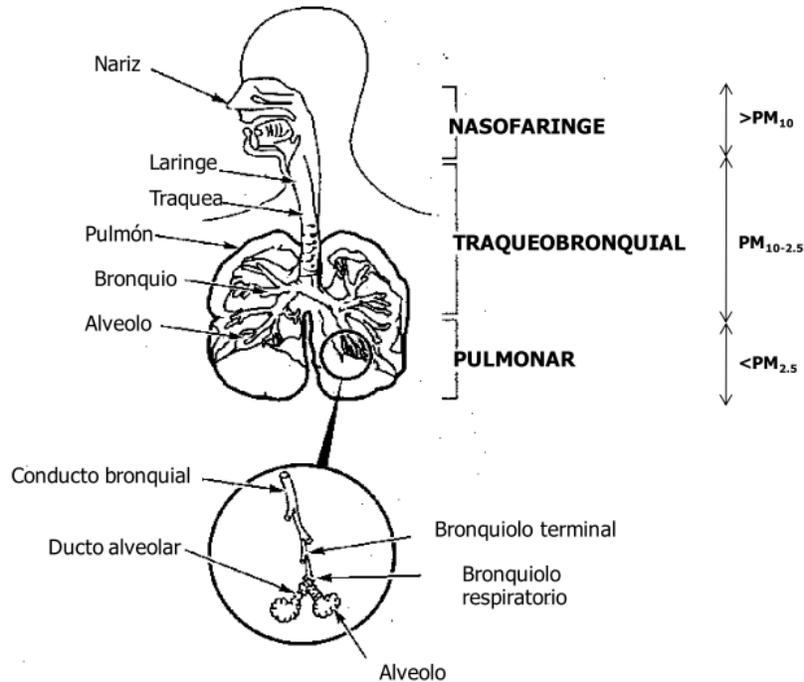


Figura 3. Regiones del sistema respiratorio. Fuente: Pérez-Balán, 2013.

En el ámbito médico, el modelo de acumulación y deposición de partículas en el aparato respiratorio más utilizado es el desarrollado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés). Sirve para identificar las regiones del aparato respiratorio en donde se acumulan las partículas según su DA (Rojano et al., 2013). De acuerdo a este modelo, hasta un 60 % de las partículas con un diámetro menor de $2.5 \mu m$ se retienen y acumulan en la región nasofaríngea. Las partículas menores de $0.5 \mu m$ tienen una retención menor en esta región. En la región traqueobronquial se observa que se acumulan menos del 20 % de las partículas menores a $10 \mu m$. Finalmente en la región pulmonar, las partículas inhaladas con un diámetro menor de $0.1 \mu m$ se acumulan hasta un 40 % (Pérez-Balán, 2013).

2.8.2. Riesgos en la salud asociados al material particulado

Los principales impactos identificados en el sector de salud pública con respecto a la contaminación del aire incluyen el incremento de costos de cuidado de la salud, disminución de la productividad y reducción de la calidad de vida. Entre todos los contaminantes del aire, el PM muestra fuerte evidencia de efectos adversos en la salud. Su interés se debe principalmente a que pueden penetrar profundamente en los pulmones, y algunas pueden incluso entrar hasta el torrente sanguíneo (Arciniégas, 2012; Rojano et al., 2013).

Los efectos de las partículas atmosféricas en la salud de un individuo están asociados a diversos factores como son la masa, tamaño y composición de las partículas que se depositan en las diferentes regiones del tracto respiratorio. La dosis potencial de PM para producir efectos adversos dependerá de la exposición de cada individuo, es decir, la concentración inhalada, la velocidad de ventilación, la actividad física, metabolismo basal, modo de respiración y alteraciones debidas a disfunciones pulmonares (Sánchez et al., 2016).

En el estudio realizado por Pope et al. (2002) para la prevención del cáncer, las partículas finas PM_{2.5} mostraron una relación con la mortalidad causada por enfermedades del aparato circulatorio y por cáncer de pulmón. Cada incremento de 10 µg/m³ en los niveles atmosféricos de partículas finas, se asocia con un aumento entre el 4 y 8 % del riesgo de morir por estas causas.

Las PM₁₀ se depositan principalmente en la región nasofaringe. Contienen principalmente materiales naturales de la superficie terrestre y se originan, sobre todo, por procesos de desintegración de partículas de mayor tamaño. Las PM₁₀ también pueden contener material biológico como polen, esporas, virus o bacterias o provenir de la combustión incompleta de combustibles fósiles (SEMARNAT, 2014). Las PM_{2.5} se depositan sobre todo en la región traqueobronquial y, en algunos casos menos comunes, pueden ingresar hasta los alvéolos (Pope et al., 2002; SEMARNAT, 2014).

Los metales de transición presentes en el PM₁₀ pueden ser especialmente peligrosos, pues generan radicales hidroxilos que producen un daño oxidativo en la hemoglobina (Rojano et al., 2013). Por su parte Vallejo et al. (2003), ciertos metales específicos provocan la liberación de mediadores inflamatorios de las vías respiratorias. Además, la exposición a metales biodisponibles, y no la masa de la partícula, se relaciona con lesiones asociadas al sistema cardiaco.

La mayor defensa del sistema cardiovascular es movilizar células sanguíneas blancas para metabolizar objetos ajenos al sistema. Estas partículas explican la asociación entre los ataques al corazón y las concentraciones PM (Rojano et al., 2013). Al considerar todas las otras variables de riesgo, Pope et al. (2002) observó que el PM incrementado en el aire resulta en más casos de ataques al corazón. Se piensa que la conexión podrían ser las partículas ultra finas. La evidencia preliminar sugiere que dichas partículas alteran directa o indirectamente las propiedades de la sangre, es decir, su viscosidad y composición; provocando así insuficiencias cardiovasculares letales.

Un estudio del Banco Mundial en 2017 calcula que la contaminación del aire en China ocasiona 400 000 a 450 000 muertes prematuras cada año. En comparación, el número de muertes asociado con las enfermedades provocadas por una mala calidad del agua en China se estima en 66 000 al año. La exposición de la salud humana a los PM ha sido investigada extensivamente y asociada con excesos en la morbilidad y mortalidad (Oyarzún, 2010). Una disminución de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de las partículas finas se asocia con un aumento estimado de la esperanza de vida entre 6 y 8 años (Pope et al., 2002).

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Lugar de estudio. Puerto de Veracruz

Durante más de 300 años, el Puerto de Veracruz ha sido un centro impulsor de mercados que ejerce funciones de embarque y procesamiento de mercancías, además funge como centro de comunicaciones y sede de operaciones financieras. Con el crecimiento demográfico, crece el tráfico portuario y, de esta manera, se presenta la necesidad de optimizar las instalaciones del recinto portuario para recibir barcos de mayor eslora y así una mayor cantidad de mercancías.

El proceso legal de la ampliación inició desde 1991. La Coordinación de Protección Ambiental (CPA) de la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER) estudió a fondo las ventajas y desventajas de las opciones de ubicación de la Ampliación del Puerto. El 5 de septiembre del 2013 se ingresó a la SEMARNAT la Manifestación de Impacto Ambiental en su modalidad Regional (MIA-R). Se inició la etapa de construcción ese mismo año y finalmente en julio del 2019 entró en operación el muelle de contenedores de ICAVE (SEMARNAT, 2013).

Actualmente se tienen concluidas las obras de la primera, de dos, fase de construcción. Se pretende que este estudio ayude en un futuro para estimar las emisiones de PM generadas una vez concluida la fase dos de la ampliación proyectada para el 2030, con el propósito de conocer el total de contaminantes emitidos en el puerto en su máxima operación (Gómez-Barquín, 2019).

La MIA-R, establece 92 Medidas de Mitigación condicionadas para poder realizar la obra, con su debido informe documentado de las actividades. A pesar de que la MIA-R fue elaborada para el proceso de construcción, sirve de referencia para este estudio gracias a estas medidas de mitigación que APIVER se comprometió a cumplir.

Según la NOAA (2017), la contaminación atmosférica y el CC imponen nuevos retos a la actividad portuaria. Por un lado, los usuarios demandan reducción en los GEI debido a metas ambientales empresariales internacionales. Por otro lado, la infraestructura portuaria y su funcionamiento se ven afectadas por los efectos del CC generando pérdidas por incidentes y elevando costos de mantenimiento. Por tal motivo, los puertos se adaptan a las condiciones futuras del clima para ser más competitivos en una economía creciente.

El gobierno de México se ha comprometido, desde 2017, a que todos los puertos del país adquieran la certificación de Puertos Verdes, otorgada por el organismo europeo ESPO/EcoPorts. Hasta el momento, los puertos de Ensenada, Lázaro Cárdenas y Puerto Vallarta, cuentan con esta certificación y son de los pocos en toda América (Irizar-López, 2017).

En materia ambiental, actualmente el Puerto de Veracruz cuenta con el Certificado Ambiental ISO 14001:2015, el cual indica que opera adecuadamente como un sistema de gestión ambiental y con el Certificado Industria Limpia el cual forma parte del Programa de Auditoría Ambiental (ASIPONA, 2022).

En la zona predominan climas cálido subhúmedo y cálido húmedo. El valor más bajo de la humedad relativa se presenta en abril con 71.41 % y la más alta en septiembre con un 82.86 %. Se localiza en la Llanura Costera del Golfo Norte y Sur y presenta un tipo de costa baja arenosa (Silva et al., 2014; INEGI, 2019). El estado del tiempo de la ciudad se ve altamente influenciado por la brisa marina y los vientos alisios del norte. Durante verano se registran temperaturas promedio de 32° C mientras que en invierno el promedio es de 24° C. Tiene un promedio de precipitación anual de 1191 mm.

La ciudad de Veracruz tiene aproximadamente 610 000 habitantes, 48 % hombres y 52% mujeres, siendo la ciudad más poblada del estado. Más allá de sus costas se encuentra el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, un área natural protegida considerado el segundo sistema coralino más grande del país. Este parque tiene una extensión de 52 238 hectáreas y se localiza al noreste del recinto portuario.

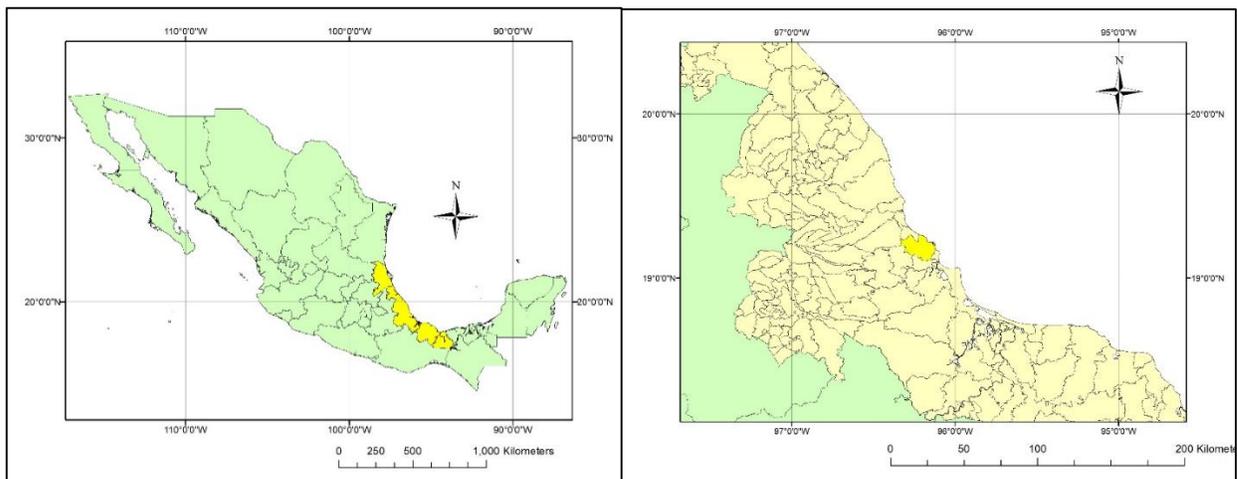


Figura 4. Localización del municipio de Veracruz.

3.2. Antecedentes

El PM es uno de los indicadores más utilizados en la ciencia para determinar la calidad del aire de un área de estudio. En todo el mundo, investigadores utilizan normativas y las herramientas de la USEPA para determinar el nivel de riesgo a la población asociado a este contaminante. En la ciudad de Chihuahua, México, Delgado (2001) determinó que las partículas menores a $0.49\ \mu\text{m}$ representan aproximadamente el 50 % de la masa total del PM durante su estudio. La media aritmética durante un año de muestreo de PM₁₀ fue de $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se basó en la NOM-025-SSA1-1993, para establecer que los niveles de PM₁₀ rebasaban, aunque muy ligeramente, los límites máximos permisibles para aire ambiente.

Por su parte, Figueroa et al. (2016) pusieron a prueba las actualizaciones de 2014 de las normas NOM-025-SSA1-2014 y NOM-020-SSA1-2014, los cuales establecen los valores límites permisibles para las concentraciones de PM₁₀ y O₃ respectivamente. En la ciudad de Guadalajara documentaron los registros de neumonía en la población relacionados a los excedentes de los valores normados de estos contaminantes. Detectaron un aumento de mortalidad por neumonía de un 30 a un 40 %.

En Cuba, Romero-Placeres et al. (2004) estudiaron la relación entre los reportes por enfermedades respiratorias agudas en niños de La Habana y los niveles de contaminación de PM₁₀, CO₂ y SO₂. Los autores concluyen que se registraron 143 470 ingresos de infantes por casos de enfermedades respiratorias agudas; ésto a pesar de que los niveles de estos contaminantes resultaron bajos de acuerdo a la norma. Sin embargo, los valores límites permisibles en Cuba en el 2003 eran mucho más altos que los estipulados por los organismos internacionales actualmente. Este hecho sirve como referencia de la importancia de la actualización en el ámbito de legislación ambiental.

En Perú, Álvarez et al. (2017) determinaron el transporte y dispersión de PM ocasionado por quema de biomasa. Se utilizaron datos del modelo de pronóstico, del Sistema Global de Predicción y del inventario de incendios del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos de América. Determinaron la presencia de PM proveniente de incendios en países vecinos como Brasil y Bolivia y se enfatizó en la importancia del establecimiento de una red de monitoreo de concentraciones de contaminantes.

Así mismo, Rojano et al. (2013) utilizaron un muestreador de alto volumen para medir PST y PM₁₀ y uno de bajo volumen para PM_{2.5} en seis estaciones de monitoreo. Obtuvieron

una buena relación PST/PM10, similar a otras zonas urbanas en Colombia. También en Colombia se llevó a cabo el estudio de Vergara y García (2013). Ellos determinaron la variación espacio-temporal del PST y PM10 proveniente de la actividad portuaria de Santa Marta. Se utilizó la metodología estándar de la USEPA y el modelo Industrial Source Complex Short Term y Offshore Coastal Dispersion. Se concluyó que los niveles rebasaban los permisibles.

Montecinos (2008), en su trabajo comparó diferentes modelos de predicción de distribución espacial de material particulado PM10. Utilizó modelos unidimensionales que suponen una mezcla vertical perfecta y un modelo de difusión vertical. Generalizando una concentración que crece viento abajo y que permanece acotada debido al flujo de deposición.

En su artículo, Arrieta (2016) describió el comportamiento de la fracción respirable de PM10, proveniente de procesos industriales, con respecto a los factores meteorológicos y topográficos. Los escenarios analizados en el estudio involucraron tiempos de exposición diario y anual de PM10, para los cuales se hizo la modelación con el Software AERMOD View ®. El modelo se utilizó para dos zonas topográficas, una zona compleja y una simple. Se empleó información meteorológica horaria de tipo satelital en formato .sam para las zonas modeladas. Los modelos de dispersión de PM10 realizados para las zonas de topografía simple y compleja, dieron como resultado que la dirección y velocidad del viento condiciona la dispersión. Ésta permitió un flujo libre en la dirección predominante del viento para la zona de topografía simple y un flujo turbulento en la zona compleja. Se determinó que los focos de emisión de PM10 en ambos casos son de escala local; presentando un radio crítico de arrastre y deposición de partículas de 200 m aproximadamente.

De la misma manera, De la Cruz-Monte de Oca et al. (2011), Arciniégas (2012) y Prato (2012) aplicaron un modelo de dispersión Gaussiana de contaminantes atmosféricos utilizando el programa AERMOD View ® para estimar las concentraciones de PM10 en sus respectivas investigaciones. Sus lugares de estudio fueron zonas industriales y mineras cerca de grandes regiones urbanizadas en Latinoamérica.

Por su parte, los trabajos realizados por Cabrera-Fernández y Torres (2012) y Manzur et al. (2013) utilizaron el modelo SCREEN3®, igual de tipo gaussiano. Este modelo maneja mayor posibilidad de escenarios tales como cercanía al mar, distintas estabildades atmosféricas o terrenos complejos.

En Colombia, Jiménez y Pulgarín (2010) presentaron al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial el proyecto de la creación de un sistema de monitoreo permanente de calidad del aire en los puertos de dicho país y sus áreas de influencia. Primeramente, crearon un sistema de indicadores de la calidad del aire. En dicho trabajo, los recintos portuarios se clasificaron en puertos monopropósito, con cargas de un solo tipo; y puertos multipropósito, destinados al embarque y desembarque de diferentes tipos de carga. El análisis de calidad del aire consistió en tres etapas básicas:

1. Diagnóstico de las condiciones ambientales afectadas por el puerto. Clasificación de los puertos, Identificación de las actividades portuarias básicas, incluyendo tipos de carga que se manejan; y análisis de registros históricos de impactos ambientales.
2. Identificación de impactos, amenazas y vulnerabilidad. La evaluación de los impactos ambientales requirió la definición de las variables de análisis, las cuales se agruparon, para el caso de la calidad del aire, en cinco categorías: meteorológicas, de contaminación, de exposición, presión y respuesta.
3. Definición de los indicadores requeridos para poner en marcha el Plan de Monitoreo. La selección de indicadores definió cuatro categorías que brindaron las herramientas e información necesaria para la gestión de la calidad del aire.
 - Indicadores de presión: tráfico, emisiones de material particulado, emisiones de gases contaminantes;
 - Indicadores de estado: inmisiones de material particulado, inmisiones de gases contaminantes y emisión de ruido;
 - Indicadores de respuesta: acciones de mitigación, proyectos de investigación y atención a quejas de la comunidad; y
 - Indicadores de exposición: exposición a PM10.

Los investigadores propusieron que el plan de monitoreo debía ser acompañado por la implementación de una red de vigilancia de la calidad del aire en áreas portuarias urbanas y la elaboración de mapas de ruido ambiental. Además, mencionaron que son necesarias investigaciones de campo y la moderación de los fenómenos dinámicos y termodinámicos relacionados para prever los riesgos que de ellas se derivan.

3.3. Frontera del conocimiento

En México existe el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) creado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Es una plataforma

web que permiten recabar, transmitir y publicar la información de calidad del aire. Esta información se genera en las estaciones de monitoreo ubicadas en las diversas entidades federativas que disponen de la infraestructura adecuada para tal tipo de medición. Los datos provienen de Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA) que son manejados por diferentes órdenes de gobierno federal, estatal y municipal. Las mediciones de calidad del aire de los SMCA se pueden consultar en dos diferentes secciones:

- Datos crudos de calidad del aire y de variables meteorológicas en tiempo real.
- Indicadores de calidad del aire. Ésta sección incluye además la visualización y descarga de los datos históricos validados.

Para el cálculo de los indicadores del cumplimiento de las NOM de la calidad del aire, el INECC aplica los procedimientos de prevalidación de los datos crudos en tiempo real que recibe de los SMCA.

La Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz cuenta con un SMCA en el Estado de Veracruz, se compone actualmente de cuatro estaciones automáticas ubicadas en Xalapa, Minatitlán, Poza Rica y Veracruz. Las estaciones de Xalapa y Minatitlán registran datos válidos a partir de agosto del 2013. La estación de Poza Rica comenzó a operar en enero del 2016 y la de Veracruz en 2021. El diseño de las redes de monitoreo de la calidad del aire y la ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico, se realizaron siguiendo los lineamientos y con la asesoría proporcionada por especialistas del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y utilizan los contaminantes criterio estipulados por la USEPA (SEDEMA, 2020).

El SMCA del Estado de Veracruz se rige por la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire y la NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (SEDEMA, 2020)

Según los resultados obtenidos del monitoreo se recomienda tomar las siguientes medidas de acuerdo al Índice Aire y Salud de la NOM-172-SEMARNAT-2019:

- Calidad del aire *Buena*: Se puede realizar cualquier actividad al aire libre;
- Calidad del aire *Regular*: Las personas que son extremadamente susceptibles a la contaminación deben considerar limitar la exposición al aire libre;

- Calidad del aire *Mala*: Los niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como personas que realizan actividad física al aire libre deben limitar la exposición al aire libre;
- Calidad del aire *Muy mala*: Los niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar la exposición al aire libre y el resto de la población debe limitar la exposición al aire libre;
- Calidad del aire *Extremadamente mala*: Toda la población debe evitar la exposición al aire libre; y
- Calidad del aire *Peligrosa*: Suspensión de actividades al aire libre.

Las cuatro estaciones que se mencionaron anteriormente pertenecen al SINAICA. La plataforma digital del SINAICA, sinaica.inecc.gob.mx, permite que la población acceda a la información de las redes de monitoreo, las cuales se actualizan cada hora como se muestra en la Figura 7.

Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA

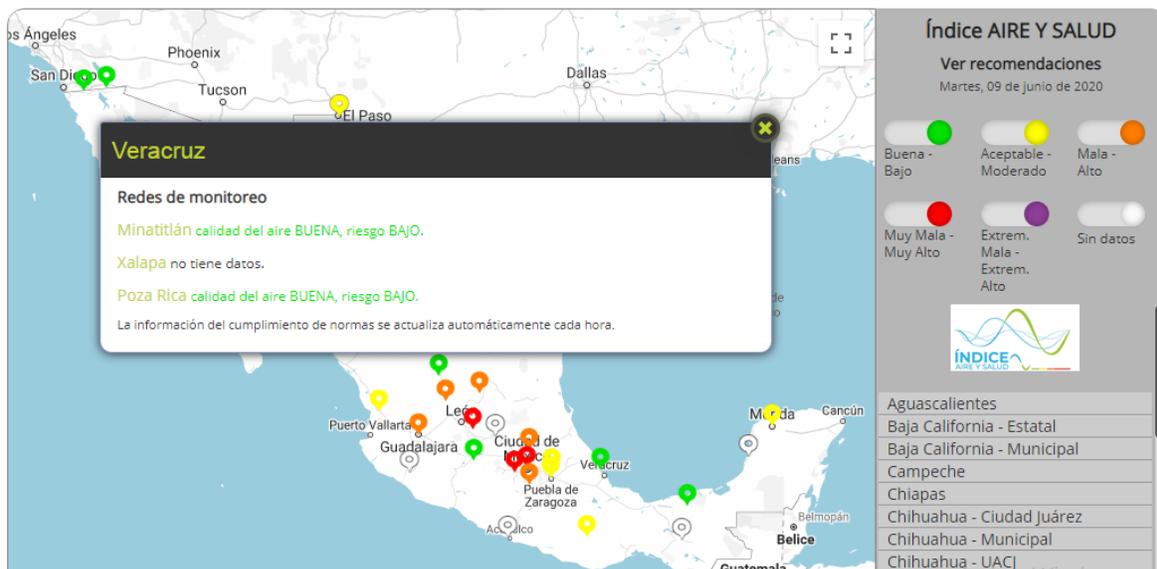


Figura 7. Captura de pantalla de la plataforma en línea del SINAICA, mostrando las estaciones del estado de Veracruz. Tomada en noviembre del 2021.

Tomando en cuenta las estaciones de monitoreo de la SEDEMA, la ciudad de Veracruz carece de un monitoreo continuo de la calidad del aire. La estación más cercana está situada en Xalapa y maneja el Índice Veracruzano de la Calidad del Aire (IVECA) siguiendo

los lineamientos de la NOM-172-SEMARNAT-2019 (Gobierno del Estado de Veracruz, 2020).

En el caso particular del puerto de Veracruz, debido a la carencia de estudios de esta índole en la región, se desconoce la dispersión que pueden tener el material particulado en la zona urbana. Considerando los problemas en la salud mencionados anteriormente, la alta exposición al contaminante presenta un riesgo para la población en las colonias aledañas.

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Situación Problemática

Como se mencionó anteriormente, los contaminantes son emitidos al aire como resultado de las actividades antropogénicas, de causas naturales o de una combinación de éstas. Según INEGI, las emisiones directas de GEI en el país aumentaron a 665 megatoneladas de CO₂eq, posicionando a México en el lugar 13° de los países con mayor volumen de emisiones de este tipo (SEMARNAT, 2022).

La calidad deficiente del aire tiene alcances sociales y económicos importantes. Es la principal causa ambiental de muertes prematuras a nivel mundial. Según la OMS, en 2012 la contaminación del aire fue responsable de 3.7 millones de muertes en el planeta. Cerca del 70 % ocurrió en los países de la región Pacífico occidental y el sureste de Asia; sin embargo, en el continente americano se registraron cerca de 58 mil decesos (WHO, 2019).

En el ámbito nacional, en 2010, el INECC evaluó el impacto sobre el sector salud y económico en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, encontrando que si se respetaran los límites establecidos en la concentración de partículas finas (PM_{2.5}) recomendados por la OMS, se evitarían pérdidas económicas por 45 mil millones de pesos y 2 170 muertes prematuras. Considerando también que la normatividad mexicana establece un límite más alto para las PM_{2.5}, si su concentración se mantuviera por debajo de este límite se evitaría un gasto de 27 mil millones de pesos y alrededor de 1 317 muertes prematuras (CENAPRED, 2001; INECC, 2014).

Además de los efectos sobre la salud, también se han registrado afectaciones en los bosques y ecosistemas acuáticos. Como se vio en el apartado 2.3.1., la composición química del PM determina los efectos que este puede provocar al equilibrio ecosistémico. En altas concentraciones causan una reducción en la visibilidad. Las partículas dispersadas por acción del viento pueden asentarse en la vegetación afectando así su desarrollo. EN

otras ocasiones son depositadas sobre suelo o agua. El PM compuesto de metales pesados puede provocar acidez en lagos y arroyos, erosión del suelo, daños en bosques sensibles y cultivos agrícolas y contribución a la lluvia ácida, atentando así contra la biodiversidad (Puigcerver y Carrascal, 2008).

En cuanto al plano legal, en la última década, México ha implementado nuevas leyes sobre CC y actualizado las ya existentes, basándose en otros organismos internacionales. Sin embargo, es de conocimiento público que la falta de presupuesto ha limitado la supervisión de éstas y por lo tanto su cumplimiento se ve limitado.

Por otra parte, México se ha comprometido a cumplir objetivos internacionales para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. Entre los más importantes se encuentran el Protocolo de Kyoto, en la COP16 y COP18, y la CMNUCC. Los compromisos hechos por el gobierno de México en la COP18 vencieron el 31 de diciembre del 2020, sin embargo, no han surgido nuevas metas, nacionales o internacionales. Esto genera incertidumbre sobre la importancia que tiene el CC para el presente gobierno. México, tenía en 2015 el quinto lugar a nivel mundial en el diseño de proyectos de desarrollo limpio y de reducción de emisiones, mismos que se han implementado en las áreas de recuperación de metano y energías renovables (SEMARNAT, 2015). Actualmente México no tiene registrados nuevos proyectos de esta índole.

En el puerto de Veracruz se requieren nuevos modelos de reducción de emisiones. Progresivamente, con el proyecto de ampliación y los nuevos muelles de carga, se han implementado tecnologías de filtración y captación de PM y otros contaminantes. También se ha exhortado el uso de combustibles con un bajo contenido de azufre. Esto representa un gran avance en el ámbito tecnológico, sin embargo, no todas las concesionarias dentro del puerto las aplican. Por otro lado, la implementación de tecnologías innovadoras genera incertidumbre por parte de los operadores sobre su efectividad y asimilación con la maquinaria en uso. Tal es el caso del uso de biocombustibles. Su empleo ha ido ganando renombre y popularidad muy lentamente debido principalmente a que el mayor temor de los usuarios era el daño que estos combustibles pudieran ocasionar a los motores.

En cuanto al plano socio-económico, los mayores problemas identificados fueron la inestabilidad económica y la fuga de inversión pública y privada que vive el país actualmente. Los proyectos de reducción y mitigación de emisiones contaminantes requieren, en su mayoría, una fuerte inversión inicial y sin el adecuado apoyo económico éstos no pueden llevarse a cabo. Por otra parte, es indispensable el acceso a la información.

Mucha de la tecnología disponible no se aprovecha por la falta de conocimiento del mismo. Es importante instruir a las concesionarias portuarias, y a la población en general, acerca de cómo reducir las emisiones contaminantes en sus actividades y su importancia para prevenir riesgos ambientales futuros.

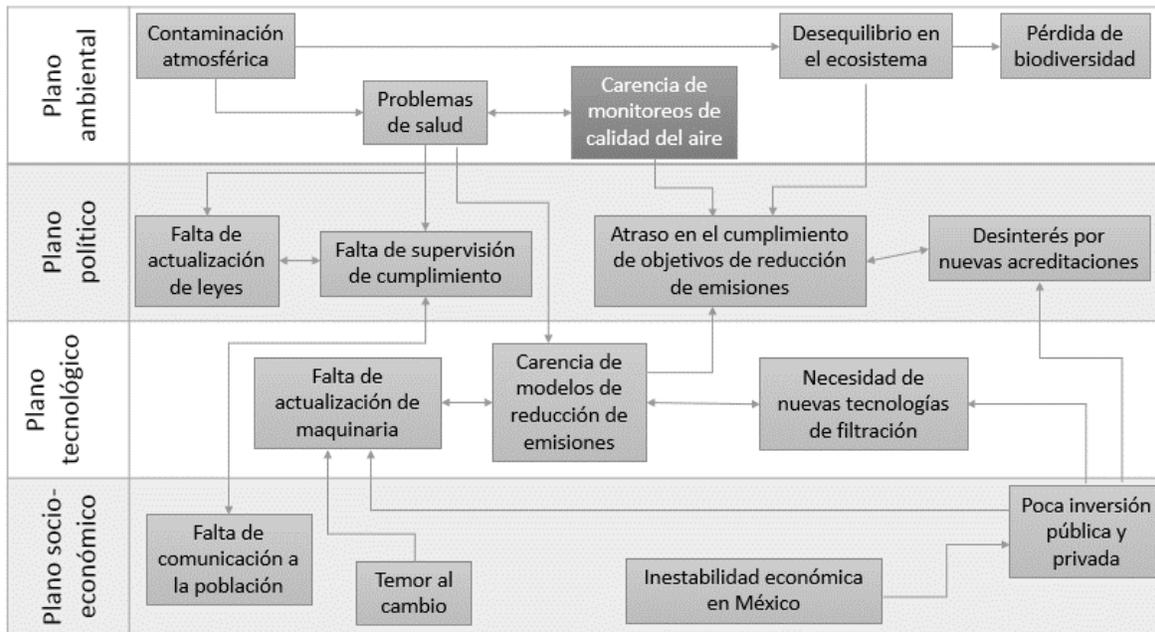


Figura 8. Esquema de la situación problemática por planos.

4.2. Delimitación del problema

A pesar del incremento de las actividades económicas en la zona metropolitana de Veracruz-Boca del Río, se desconoce un organismo público que realice un monitoreo de la calidad del aire en la ciudad. La estación más cercana está situada en la ciudad de Xalapa y maneja el Índice Veracruzano de la Calidad del Aire (IVECA) siguiendo los lineamientos de la NOM-172-SEMARNAT-2019.

De acuerdo con estimaciones realizadas por la SEDEMA (2010), en Veracruz y Boca del Río se concentra el 8 % de las emisiones atmosféricas del estado. Por lo anterior se considera necesario implementar un sistema de monitoreo de calidad del aire en el puerto de Veracruz.

El presente trabajo de investigación se limitó al análisis de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ como indicadores de la calidad del aire. La ausencia de precipitaciones propicia la dispersión del PM, por tal motivo se realizó durante la temporada de estiaje en los meses de julio a octubre.

Se compararon los resultados obtenidos con las NOMs para identificar si existe un riesgo latente en la población aledaña al recinto portuario debido a la exposición a altas concentraciones de PM2.5 y PM10.

4.3. Planteamiento del problema

Al iniciar operaciones el Nuevo Puerto de Veracruz, se estima que incrementarían las emisiones de PM provenientes de las actividades portuarias. Por tal motivo, se considera necesaria la implementación de un monitoreo del PM en la zona aledaña al Nuevo Puerto.

De acuerdo con la literatura consultada, las corrientes de viento dispersan las partículas PM2.5 y PM10 generadas en el puerto, hacia la ciudad de Veracruz, lo que representa riesgos en la salud humana a nivel respiratorio y cardiovascular.

Por consiguiente, esta investigación muestra las bases para el diseño e implementación de acciones a nivel de política pública para reducir la contaminación atmosférica ocasionada por PM y así minimizar sus impactos sobre la salud de la población y los ecosistemas.

4.4. Pregunta de investigación

¿Cómo se dispersa el material particulado PM2.5 y PM10 proveniente del Nuevo Puerto de Veracruz hacia zonas aledañas y cuáles son los efectos potenciales?

4.5. Justificación de la investigación

El monitoreo de la calidad del aire, es una actividad considerada indispensable y de gran importancia tanto para el sector público como el privado (Li-Ramírez et al., 2016). Actualmente no existe un sistema de monitoreo continuo de todos los parámetros recomendados por la OMS, entre ellos el PM, en la ciudad de Veracruz (SEDEMA, 2020).

Esta investigación es de gran relevancia por ser una herramienta para la administración portuaria de Veracruz como parte del proceso de obtención de la Certificación de Puertos Verdes, otorgada por el organismo europeo ESPO/EcoPorts. Hasta el momento, sólo los puertos de Ensenada, Lázaro Cárdenas y Puerto Vallarta cuentan con esta certificación (Irizar-López, 2017). Los resultados de este trabajo servirían de soporte para los diferentes niveles de gobierno en la toma de decisiones concernientes a la salud pública, vialidad, actividades al aire libre, entre otros (Sarro, 2015). Para tal motivo, los niveles máximos permisibles deberán cumplir con los estándares de la USEPA, la OMS y las NOMs

pertinentes. Por otra parte, es importante dar a conocer a la sociedad los niveles de PM2.5 y PM10 en el aire y observar si éstos están dentro de los límites considerados no dañinos para la población. Lo anterior, con el fin de prevenir enfermedades respiratorias y cardiovasculares relacionadas con la contaminación del aire y posteriormente se aplicarían las medidas de remediación, disminuyendo el riesgo en los grupos vulnerables (Aránguez et al., 1999).

De igual forma, sería de utilidad para futuras investigaciones sobre problemas respiratorios y el diseño de innovadoras medidas de mitigación. Además, la administración del puerto podría identificar posibles fuentes puntuales de emisiones dentro de sus instalaciones.

5. HIPÓTESIS

5.1. General

El material particulado PM2.5 y PM10 se dispersa hacia la zona sur-oeste aledaña al Nuevo Puerto de Veracruz, de acuerdo al comportamiento de la dirección y velocidad del viento y representan un riesgo moderado a la salud humana como efecto potencial.

5.2. Particulares

1. Los puntos de muestreo de la investigación estarán establecidos en el área de mayor movimiento logístico dentro del Nuevo Puerto y en la zona sur-oeste del área de emisión.
2. Los valores diarios de PM2.5 y PM10 en el sitio de muestreo se ven directamente afectados por los eventos climatológicos y no rebasarán el límite de la USEPA considerado como un riesgo alto para la salud.
3. El PM2.5 y PM10 no se dispersará a más de 5 km hacia el sur del punto de emisión.
4. Los efectos potenciales producto de las concentraciones presentadas representan un riesgo en la salud de los habitantes de las zonas aledañas.

6. OBJETIVOS

6.1. General

Analizar la dispersión de material particulado PM2.5 y PM10 proveniente del nuevo puerto de Veracruz hacia zonas aledañas y sus efectos potenciales.

6.2. Particulares

- Establecer los sitios de monitoreo de material particulado de acuerdo al criterio de selección
- Evaluar la concentración de partículas PM10 y PM2.5 proveniente de la zona de actividades logísticas del Nuevo Puerto de Veracruz y variables meteorológicas durante las temporadas climáticas de estiaje y nortes.
- Estimar la dispersión de concentración de las partículas PM10 y PM2.5 dentro y fuera del puerto, empleando el modelo gaussiano de dispersión.
- Identificar los riesgos potenciales que estas las concentraciones de PM representan para los habitantes de las zonas aledañas.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Para dar cumplimiento a los objetivos particulares propuestos en este trabajo de investigación, se llevaron a cabo cuatro fases del proyecto, las cuales se mencionan a continuación:

Fase uno. Establecimiento de los sitios de muestreo

Para dar inicio a la investigación fue necesario partir del establecimiento de los puntos ideales para la recolección de datos. Fueron establecidos a través de la técnica de muestreo no probabilística por asignación. Los criterios utilizados fueron que contara con fácil acceso de vehículo o con tomas eléctricas, área abierta, poco tráfico vehicular y correspondiera con la dirección predominante del viento. Se establecieron en la zona urbana en las inmediaciones del Nuevo Puerto de Veracruz.

Con base en datos publicados por la estación meteorológica de CONAGUA de julio a octubre del 2020, se determinó un viento predominante de la dirección NE y una velocidad promedio de 6.10 m/s. Por tal motivo se buscaron sitios en el área sur y sudoeste del Nuevo Puerto de Veracruz, considerado como la fuente de emisión.

Dentro de esta área se seleccionaron puntos que contaran con las características necesarias para el muestreo. Se buscaron áreas abiertas y despejadas para no interferir con las mediciones de dirección y velocidad de viento; de fácil acceso con vehículo para conectar la consola de la estación meteorológica o, en su defecto, que contara con conexiones eléctricas; y con bajo tráfico vehicular para evitar interferencias en la medición del PM.

Las herramientas principales para la determinación del área a muestrear fueron Sistemas de Ubicación Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés).

Fase dos. Determinación de las concentraciones de PM y las variables meteorológicas y análisis de los datos obtenidos.

Para la obtención de valores meteorológicos se utilizó una estación meteorológica marca DAVIS® modelo Vantage VUE, la cual se conectó a la batería del automóvil por medio de un convertidor de corriente directa a corriente alterna. Esta estación puede medir valores de temperatura, humedad, presión barométrica, precipitación y velocidad y dirección de viento. Para completar los objetivos de este trabajo se utilizaron los datos de temperatura y

velocidad y dirección del viento a dos metros de altura. Para la lectura de concentración de PM2.5 y PM10 se utilizó un sensor fotométrico multiparamétrico elaborado por Aibecy Shenzhen Hongcaizhi Technology.

El muestreo se realizó durante los meses de julio a octubre del 2021. Se obtuvieron datos de 60 días con 20 repeticiones al día. Se registraron de manera física en el sitio y momento del muestreo cada 6 minutos durante una hora en la mañana y una hora en tarde para obtener el promedio diario conforme a la NOM-025-SSA1-2014. La normativa establece un mínimo de 18 valores para obtener el promedio diario. Posteriormente se capturaron los datos en formato Microsoft® Excel.



Figura 9. Estación meteorológica DAVIS® en el sitio de muestreo.



Figura 10. Consola de la estación DAVIS® utilizada en el muestreo.

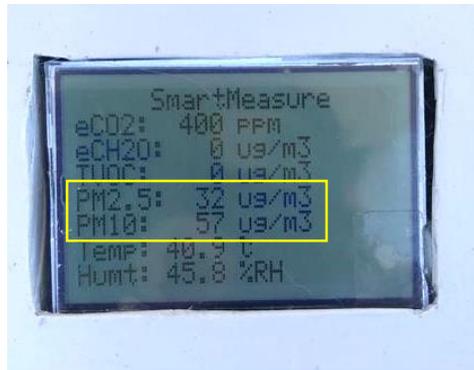


Figura 11. Pantalla del instrumento de medición de PM fotométrico.

Posteriormente, se analizaron los datos de PM obtenidos mediante la metodología de análisis exploratorio de datos (Tukey, 1977), para contrastar los niveles de concentración de material particulado a la actividad y los factores meteorológicos.

Fase tres. Estimación de la dispersión empleando el Modelo Gaussiano de dispersión

En esta fase se detalla la aplicación del modelo de dispersión de PM en la zona de muestreo. Es importante resaltar que el modelo empleado se ajustó a partir de un modelo gaussiano y un modelo regional de para la obtención del mapa de dispersión del lugar de estudio.

Este tipo de modelos se ven limitados por la cantidad de información recabada durante el periodo de muestreo y los factores externos tales como actividades económicas, tráfico vehicular, vientos alisios, elementos meteorológicos a baja y alta altura, entre otros. Por consiguiente, se busca adaptar las condiciones del sujeto de estudio para estimar las concentraciones contaminantes.

Para el caso del Nuevo Puerto de Veracruz, el Centro de Ciencias de la Atmósfera realizó en febrero de 2013 un Inventario de Emisiones Atmosféricas del Recinto Portuario de Veracruz, como parte del proyecto “Puertos Verdes” promovido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (Tami, 2013). De dicho inventario fue posible proyectar las emisiones para la etapa de operación del proyecto. Se obtuvo que las emisiones de PM10 en el 2020 serían de 7.99 ton/año, cifra que no ha sido actualizada; y 11.53 ton/año en 2025 (Tami, 2013). Por su parte, la USEPA dio a conocer en un estudio en 2009 que el contaminante PM10 equivale al 92 % del total de PST de los motores a diésel y que el contaminante PM2.5 equivale al 92 % del total de PM10. Considerando el

crecimiento del tráfico marítimo como lineal $[y = 7.99 + 0.708(x - 2020)]$ se pueden estimar los caudales de emisión tal como se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Estimación de emisiones en el Nuevo Puerto de Veracruz.

Año	PST (ton/año)	PM10 (ton/año)	PM2.5 (ton/año)
2020	8.68	7.99	7.35
2021	9.45	8.70	8.00
2022	10.22	9.41	8.65
2023	10.99	10.11	9.30
2024	11.76	10.82	9.96
2025	12.53	11.53	10.61

Los valores del caudal de emisión para la aplicación el modelado gaussiano fueron los del año 2021 convertido en g/s, es decir, 0.276 g/s para PM10 y 0.254 g/s para PM2.5.

Para los fines de este estudio se consideró el Nuevo Puerto de Veracruz como un emisor de celda fija. Es decir, las fuentes de emisión móviles y fijas dentro de este son acumulativas, por tanto, se modela como una sola fuente fija.

Con base en la información de uso público publicada por ASIPONA Veracruz, el barco más grande que recibió el Nuevo Puerto de Veracruz en el último año fue el porta-contenedor Buxcliff de la naviera Maritimex, el cual cuenta con 299 m de eslora, 9.6 m de calado y 35 m de francobordo. Este último dato será el utilizado como altura de chimenea para el modelado.

Se utilizó el software matemático MATLAB ver. 7.0 para simular los valores de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) utilizando el modelo Gaussiano (Ecuación 3) para diferentes clases de estabildades de Pasquill-Gifford (Tabla 8).

La librería utilizada en MATLAB fue *gaussianPlume*, creada por Bien (2009), quien utilizó las ecuaciones presentadas en el Manual del usuario de ISC3 Vol. II disponible en la página oficial de la USEPA. El comando utilizado se adecuó para cada evento atmosférico y sus condiciones. Cada una de sus variables se explican en la Tabla 12. Quedando de la siguiente manera:

$C = \text{gaussianPlume}('Q', 'u_ref', 'h', 'h_ref', 'stability', 'terrain', 'plume-rise-model', 'mw', 'amb_temp', 'reflection', 'deposition', 'term_velocity')$

Tabla 12. Descripción de las variables utilizadas en el comando de MATLAB.

Variable	Descripción	Valor
<i>q</i>	Caudal de emisión (g/s).	PM10: 0.276 PM2.5: 0.254
<i>u_ref</i>	Velocidad del viento (m/s)	C: 7.78 V1: 7.66 HG: 13.89 OT1: 7.35 V2: 6.33 FF1: 9.91 OT2: 7.78 FF2: 7.64
<i>h</i>	Altura de la chimenea (m)	35
<i>h_ref'</i>	Altura de medición del viento (m)	10
<i>stability</i>	Estabilidad atmosférica según Pasquill-Gifford. (A-F)	C: D V1:D HG: A OT1:D V2: D FF1: D OT2: D FF2: D
<i>terrain</i>	Uso de suelo	Urbano
<i>plume-rise-model</i>	Modelo de dispersión gaussiano utilizado	CarlsonMoses
<i>mw</i>	Peso molecular del contaminante (g/mol)	PM2.5: 3625 PM10:1450
<i>amb_temp</i>	temperatura del sitio de muestreo (°C).	C: 28.3 V1: 28.9 HG: 28.3 OT1: 27.8 V2: 27.9 FF1: 30.7 OT2: 29.1 FF2: 27.4
<i>reflection</i>	Efecto de reflexión	false
<i>deposition</i>	Efecto de deposición	true
<i>term_velocity</i>	Velocidad de asentamiento de la partícula (m/s).	PM2.5: 0.005 PM10: 0.008

Véase clave del evento meteorológico en la Tabla 14

Posteriormente, se utilizó el comando siguiente para graficar el modelado de dispersión:

```

1   Cb=squeeze(C(:,:,1))
2   figure
3   subplot(1,2,1)
4   % mesh(Cb)
5   surfc(Cb)
6   % colormap(cool)

```

```
7      xlim([0 inf])
8      ylim([0 inf])
9      zlim([0 inf])
10     xlabel('Direccion del viento (m)')
11     ylabel('Perpendicular a la direccion del viento (m)')
12     zlabel('PM2.5 (g/m3)')
13     colorbar
14
15     subplot(1,2,2)
16     contour(Cb)
17     % colormap(cool)
18     xlim([0 inf])
19     ylim([0 inf])
20     xlabel('Direccion del viento (m)')
21     ylabel('Perpendicular a la direccion del viento (m)')
22     colorbar
```

Fase cuatro. Determinación de los efectos potenciales.

Finalmente, los datos obtenidos se compararon con la NOM-025-SSA1-2014 la cual establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM2.5 y PM10 en el aire ambiente y criterios para su evaluación contenidos en la Tabla 6.

De igual manera se recurrió a la NOM-172-SEMARNAT-2019: “Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud”, presentados en las Tablas 7 y 8, para conocer el nivel de riesgo asociado a la exposición de las concentraciones detectadas durante el presente estudio

8. RESULTADOS

Fase uno. Establecimiento de los sitios de muestreo.

Con base en los criterios establecidos, se seleccionaron cuatro sitios de muestreo dentro del área con las características necesarias para el muestreo (Tabla 11). Sin embargo, se presentaron inconvenientes que desestimaron tres de estos sitios y no permitieron una medición constante para obtener valores significativos de estudio.

Tabla 13. Caracterización de los sitios considerados para el muestreo.

Sitio	Ventajas	Desventajas
Colonia Tarimoya (A)	<ul style="list-style-type: none">• Baja presencia de vehículos de motor.• Altura aceptable para la medición.• Tiempo ilimitado de estancia.	<ul style="list-style-type: none">• Dificil acceso con vehículo.• Sin disponibilidad de tomas eléctricas.• Inseguridad.
Colonia Playa Linda (B)	<ul style="list-style-type: none">• Baja presencia de vehículos de motor.• Disponibilidad de tomas eléctricas.• Altura aceptable para la medición.• Seguridad y vigilancia.	<ul style="list-style-type: none">• Tiempo limitado de estancia.• Acceso restringido a ciertos días a la semana.
Centro Comercial "Los Pinos" (C)	<ul style="list-style-type: none">• Altura ideal para la medición.• Área despejada.	<ul style="list-style-type: none">• Se negó el ingreso de las herramientas de estudio a las instalaciones.
Parque "La Pinera" (D)	<ul style="list-style-type: none">• Área abierta ideal para la medición.• Fácil acceso con vehículo.	<ul style="list-style-type: none">• Mucho tráfico vehicular.• Poca altura.

Se obtuvieron datos de los sitios A, B y D, sin embargo, para el correcto análisis de estos, se utilizaron principalmente aquellos del sitio D Parque "La Pinera". Esto debido a que circunstancias externas no permitieron un monitoreo continuo en los sitios A y B, dando como resultado solamente 14 días de muestreo. Por otra parte, en el sitio C no fue posible llevar a cabo ningún día de medición, pues el acceso fue negado.

El sitio D se localizó al sur del Nuevo Puerto de Veracruz, sobre la avenida Rafael Cuervo de frente al parque recreativo "La Pinera". El sitio cuenta con un área plana y despejada, ideal para la colocación de la estación de monitoreo y al estar dentro de un área recreativa municipal es de acceso fácil y gratuito.

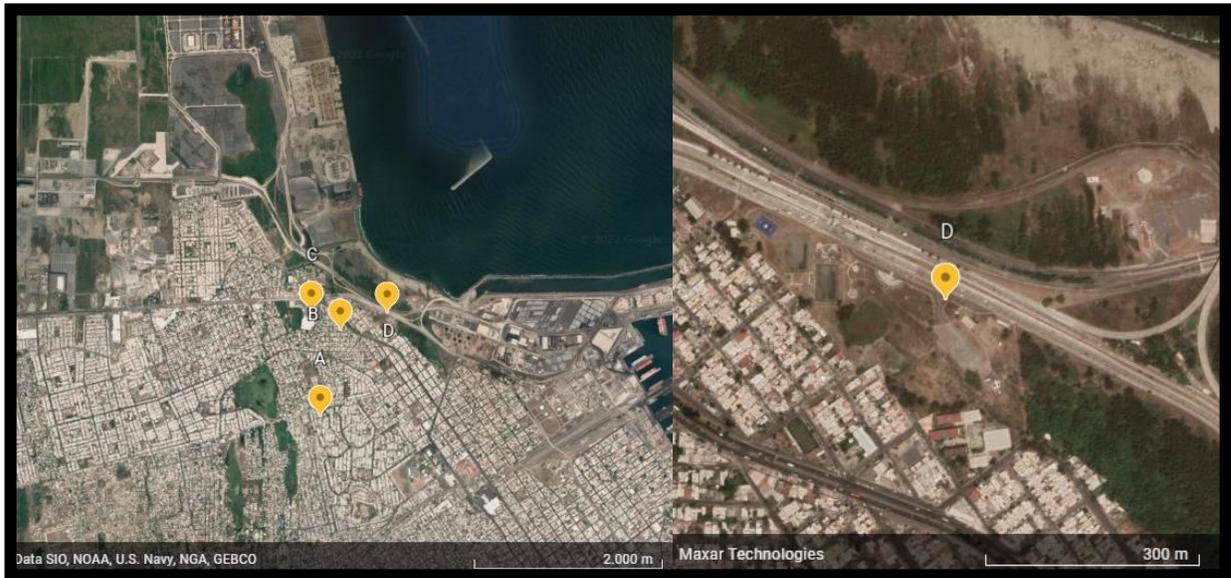


Figura 12. Localización de los sitios de monitoreo.



Figura 13. Fotografía aérea del sitio de muestreo parque “La Pinera”.

Fase dos. Medición y determinación de las concentraciones de PM y variables meteorológicas.

La fecha de inicio del muestreo fue el 19 de julio del 2021 y se concluyó el 10 de octubre del 2021. Durante este periodo se recolectaron 60 días de datos, los cuales incluyen concentraciones promedio diarias de PM_{2.5} y PM₁₀, temperatura y dirección y velocidad predominante del viento en el día. Además de los datos recolectados en el sitio, se registró

información proporcionada por Protección Civil del estado de Veracruz relacionada con factores meteorológicos en el área de estudio. Esta información incluye dirección y velocidad predominante de vientos registrada en la estación meteorológica de APIVER, temperatura máxima y mínima, nubosidad y eventos meteorológicos.

Durante el periodo de muestreo, se registró un valor promedio de PM2.5 de 43.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor mínimo de este parámetro fue de 12.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor máximo fue de 66.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto al PM10, se registró un promedio de 74.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; el valor máximo fue 112.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el mínimo 20.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El día con menos viento en el sitio D (0.33 m/s) se registró el 18 de agosto durante un evento de vaguada. Por otra parte, el día con mayor velocidad de viento (8.8 m/s) fue el 20 de agosto durante el huracán Grace.

Dentro del periodo de muestreo se registraron los eventos meteorológicos presentados en la Tabla 14. Durante los cuales se observó una distribución normal de los valores de PM2.5 y PM10 y, por tanto, se opta por agruparlos de esta manera.

Tabla 14. Resultados del PM para los eventos climáticos durante el periodo de muestreo.

PERIODO	CLAVE	EVENTO CLIMÁTICO	PM2.5 PROMEDIO	PM10 PROMEDIO	NIVEL DE RIESGO
19/07 - 11/08	C	Canícula	45.3	75.8	Alto
12/08 - 17/08	V1	Vaguada	49.7	87.7	Alto
18/08 - 21/08	HG	Huracán Grace	16.5	25.7	Bajo
22/08 - 13/09	OT1	Onda tropical	40.5	71.4	Moderado
14/09 - 20/09	V2	Vaguada	57.7	97.5	Alto
21/09 - 27/09	FF1	Frente Frío núm. 1	30.1	45.4	Bajo
28/09 - 30/09	OT2	Onda tropical	37.4	67.0	Moderado
01/10 - 10/10	FF2	Frente Frío núm. 2	29.7	53.1	Moderado

Durante los 60 días de medición se registraron valores de PM2.5 con un promedio de 43.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor más bajo fue de 12.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se registró el 20 de agosto durante el huracán Grace. El valor máximo fue de 66.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se reportó el 5 de agosto en el periodo correspondiente a la canícula 2021.

Gráfica marginal de PM2.5

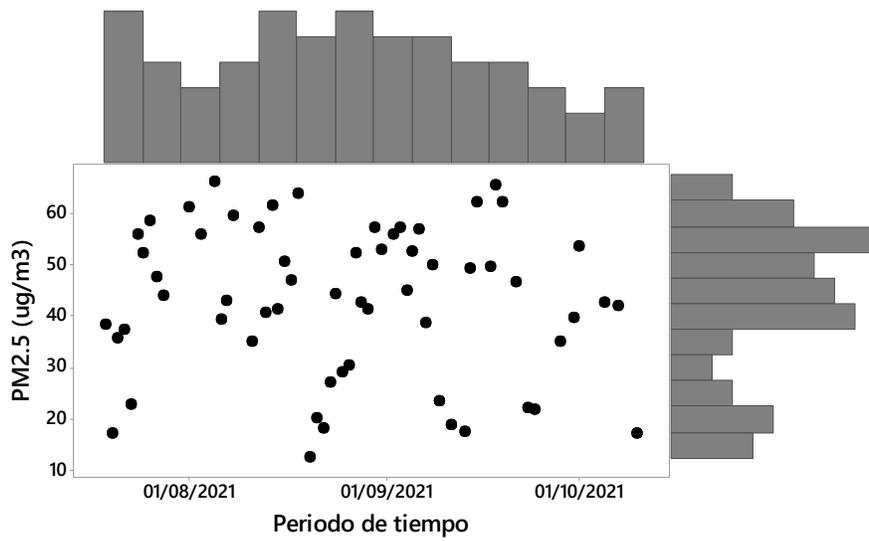


Figura 13. Gráfica marginal de PM2.5 durante los 60 días de muestreo.

Gráfica marginal de PM10

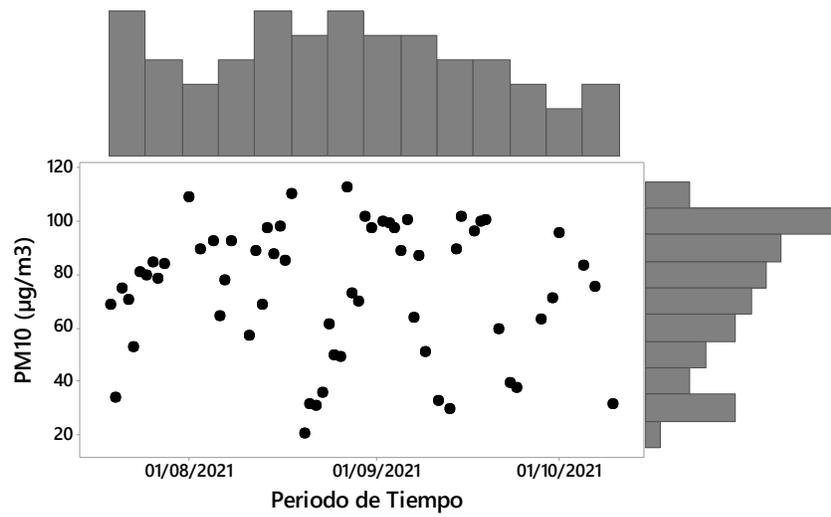


Figura 14. Gráfica marginal de PM10 durante los 60 días de muestreo.

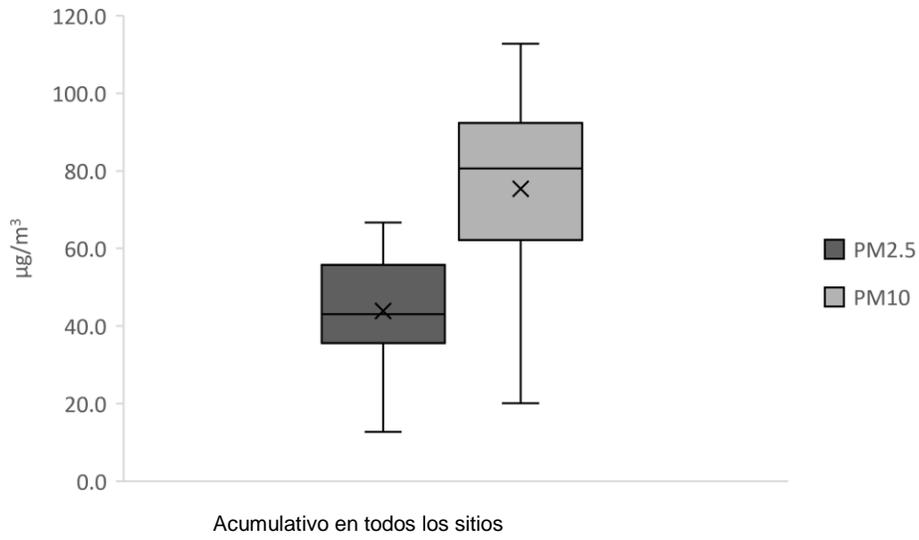


Figura 15. Concentraciones acumuladas de PM2.5 y PM10 en los sitios A, B y D.

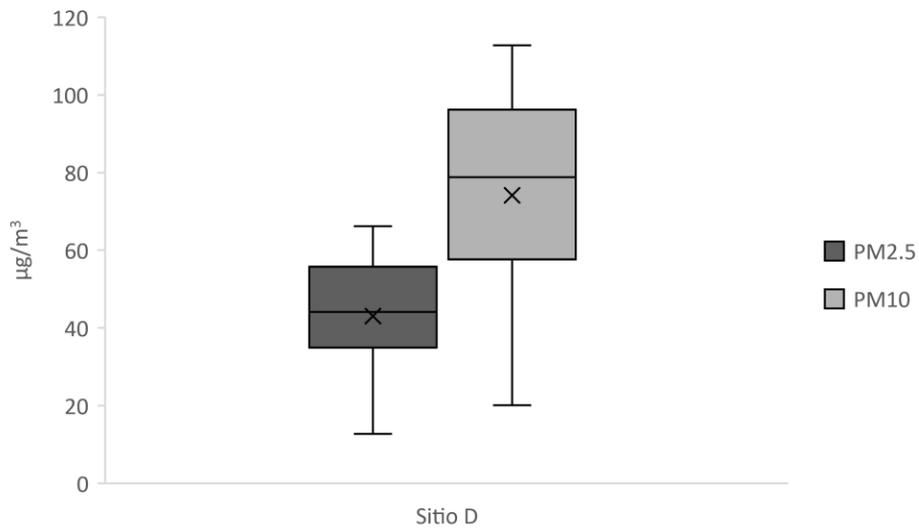


Figura 16. Concentraciones de PM2.5 y PM10 del sitio D "La Pinera"

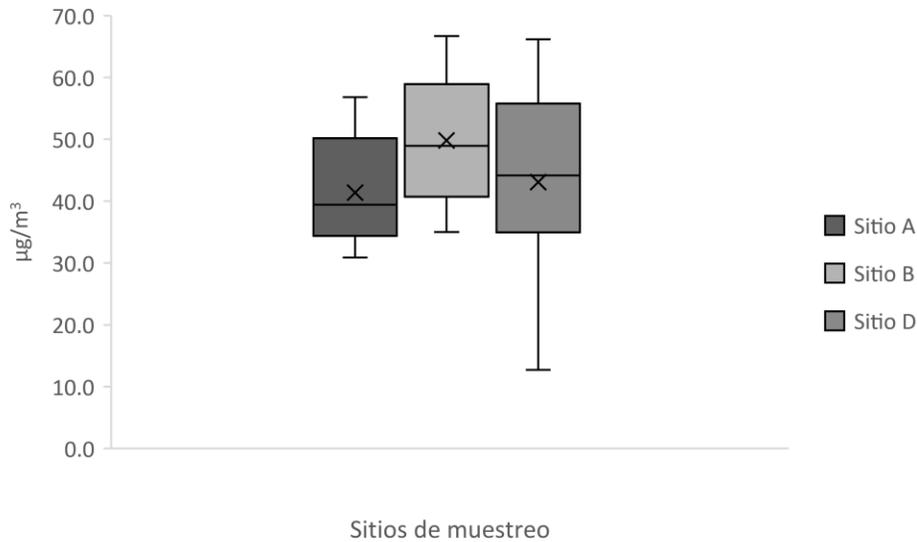


Figura 17. Concentraciones de PM2.5 por sitio de muestreo.

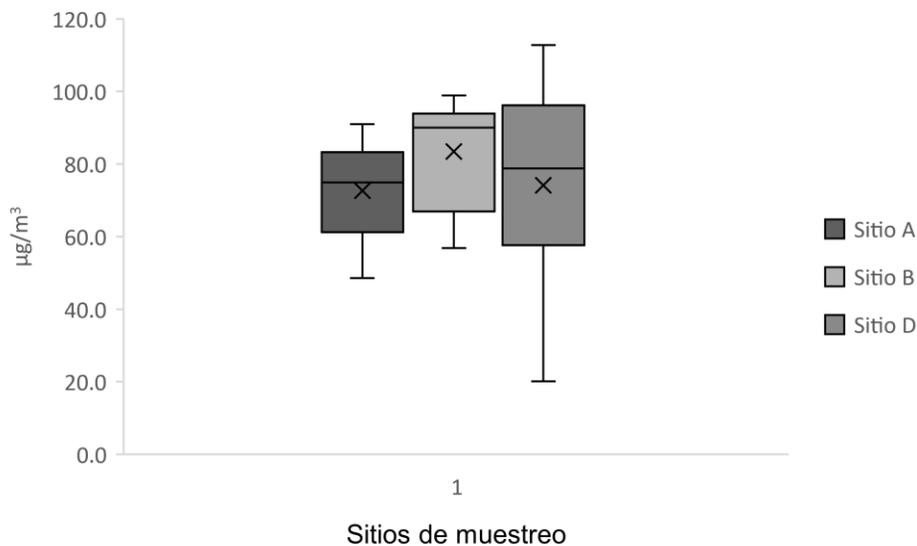


Figura 18. Concentraciones de PM10 por sitio de muestreo.

Fase tres. Estimación de la dispersión empleando el modelo analítico de dispersión

El resultado del comando *gaussianPlume* consistió en una matriz tridimensional que contiene las concentraciones de la sustancia emitida sobre un área cuya primera dimensión (y) es perpendicular al viento, la segunda dimensión es en sentido del viento (x) y la tercera dimensión (z) es el eje vertical.

Se ejecutó este comando para cada evento meteorológico y cada indicador, utilizando los valores de la Tabla 12. Las siguientes figuras presentan los resultados obtenidos del modelado.

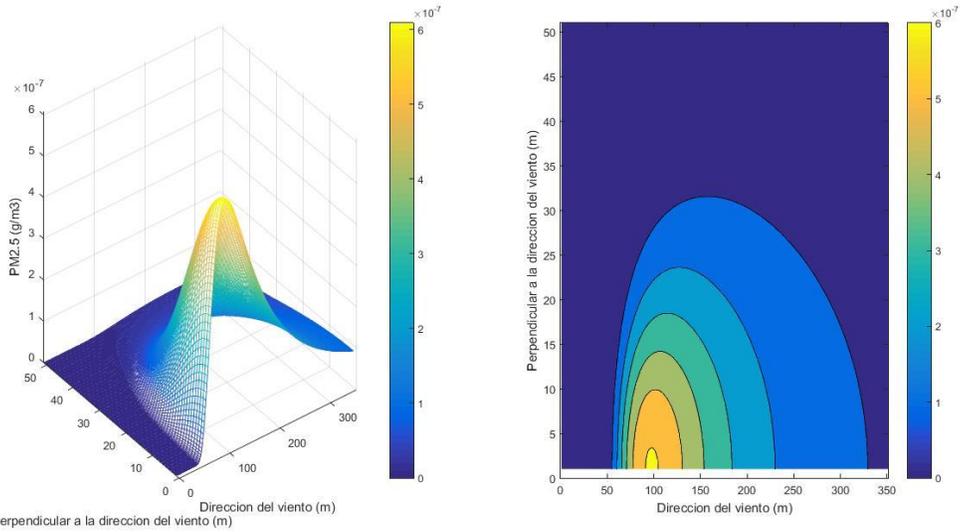


Figura 19. Dispersión de PM2.5 durante la canícula. Resolución de 100 m.

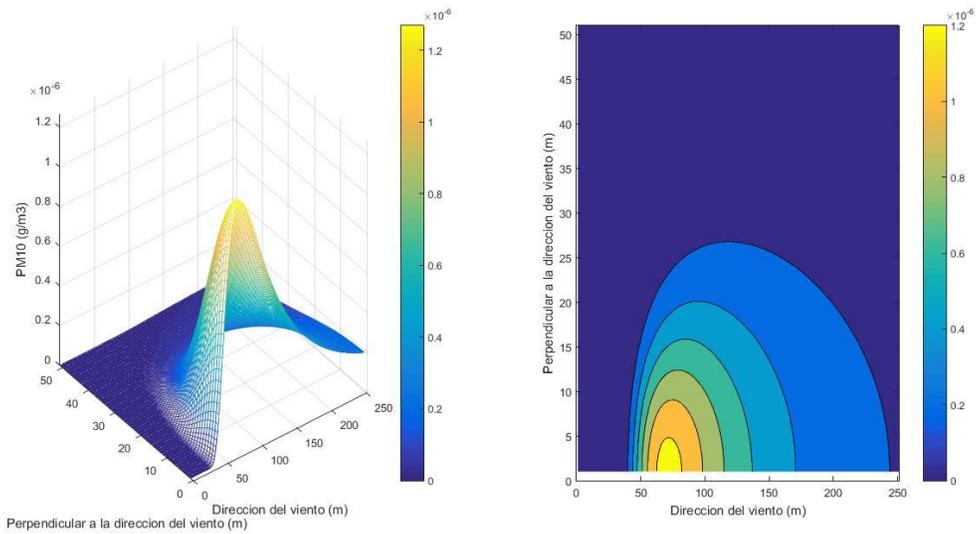


Figura 20. Dispersión de PM10 durante la canícula. Resolución de 100 m.

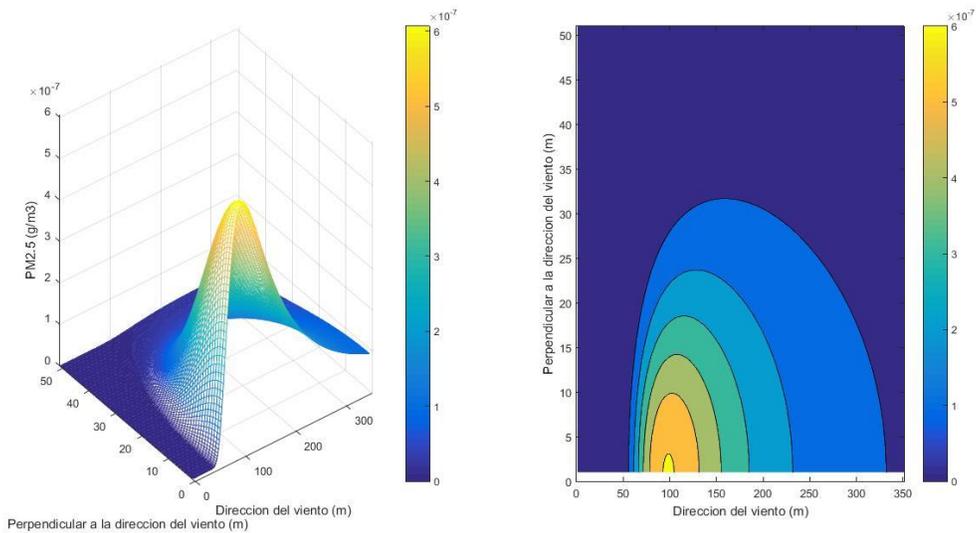


Figura 21. Dispersión de PM2.5 durante la primera vaguada. Resolución de 100 m.

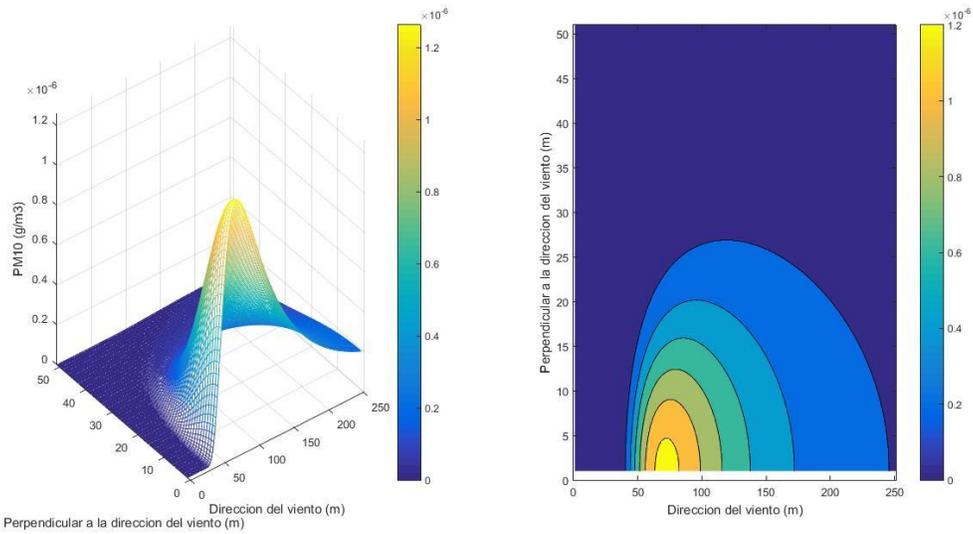


Figura 22. Dispersión de PM10 durante la primera vaguada. Resolución de 100 m.

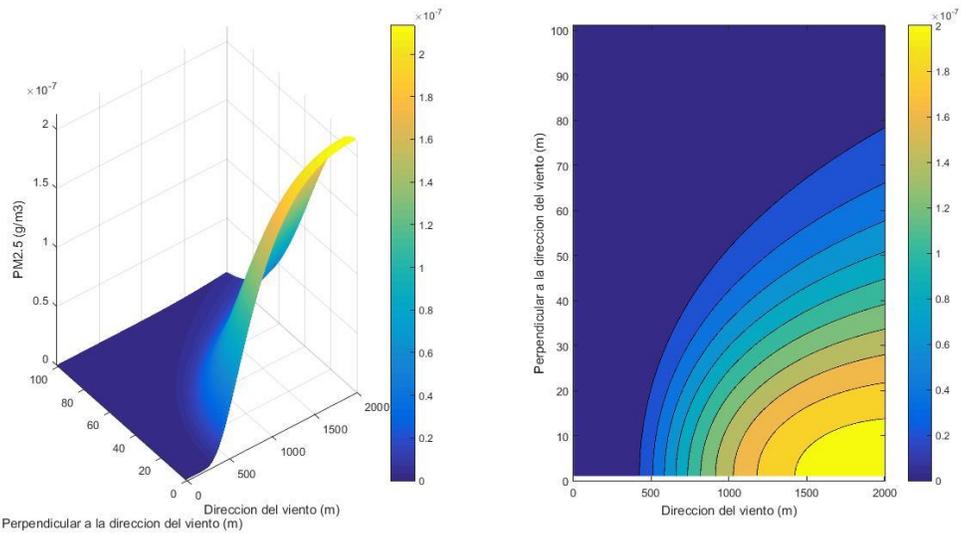


Figura 23. Dispersión de PM2.5 durante el huracán "Grace". Resolución de 100 m.

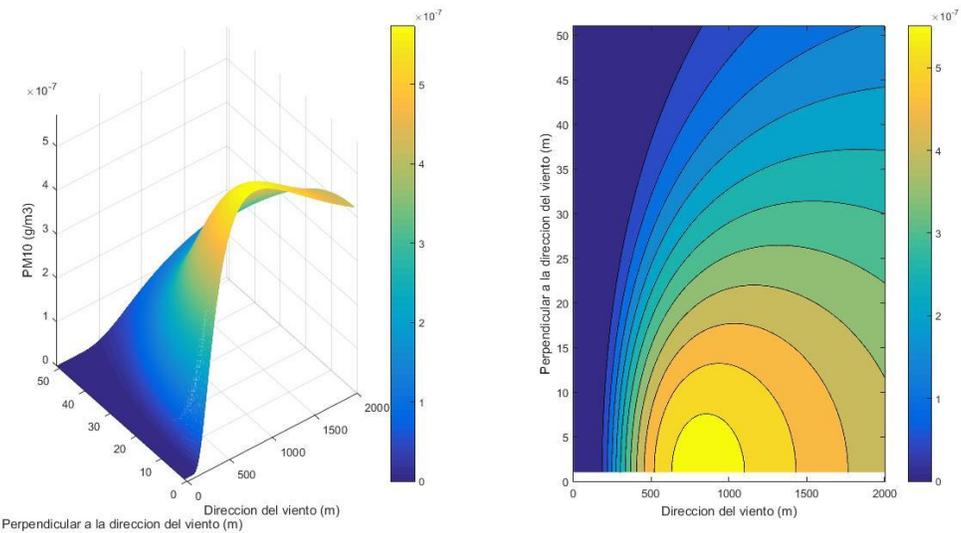


Figura 24. Dispersión de PM10 durante el huracán "Grace". Resolución de 100 m.

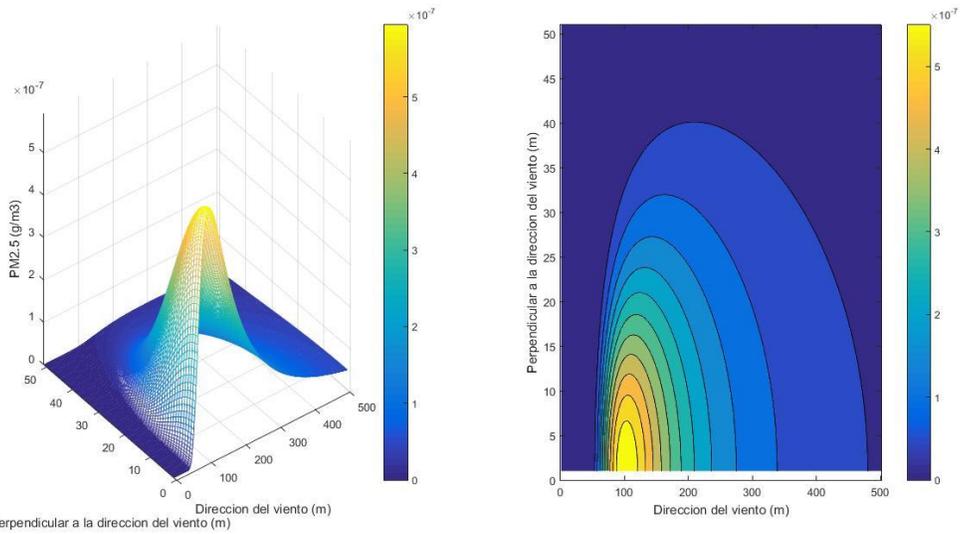


Figura 25. Dispersión de PM2.5 durante la primera Onda Tropical. Resolución de 100 m.

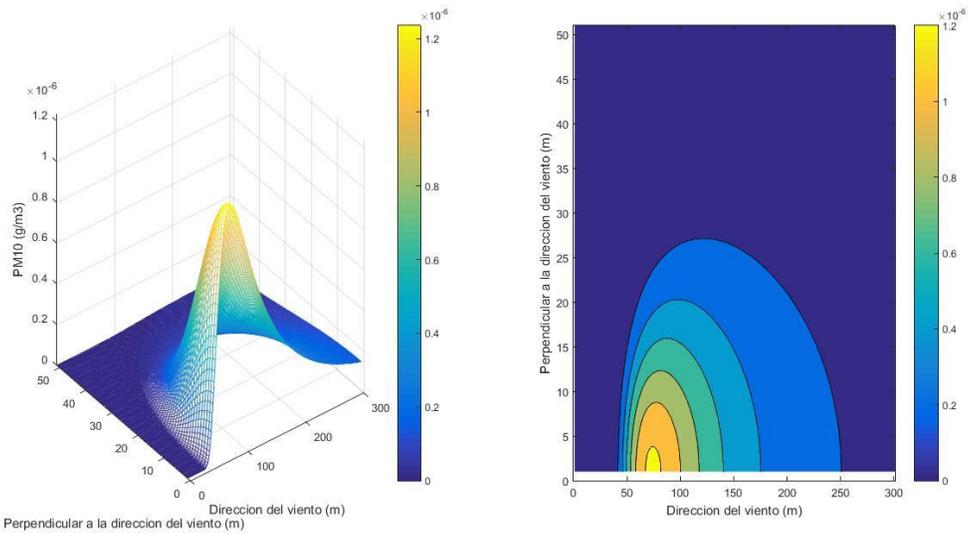


Figura 26. Dispersión de PM10 durante la primera Onda Tropical. Resolución de 100 m.

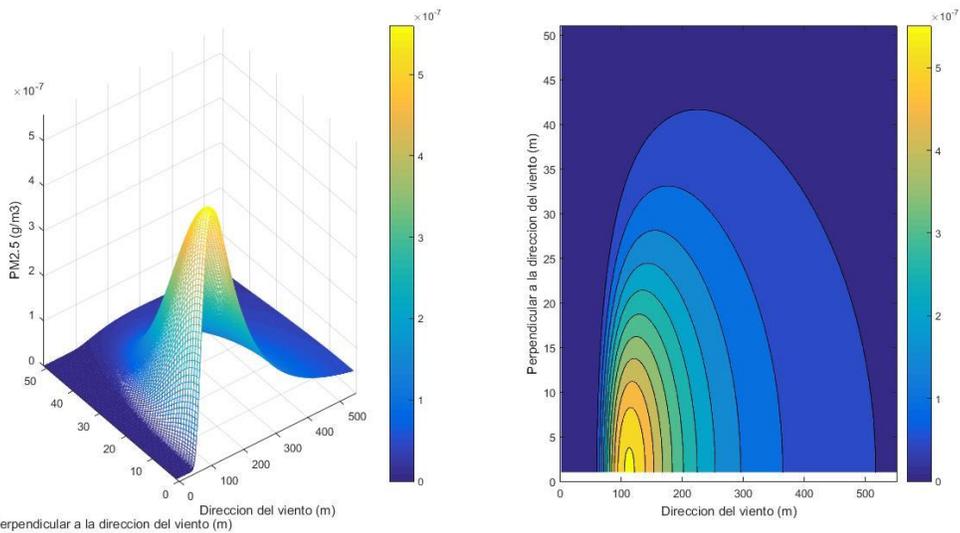


Figura 27. Dispersión de PM2.5 durante la segunda vaguada. Resolución de 100 m.

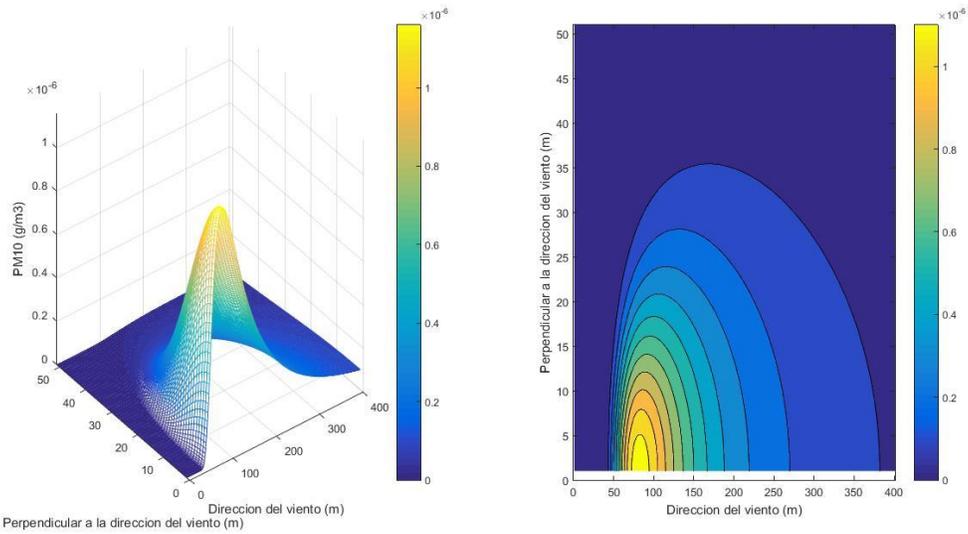


Figura 28. Dispersión de PM10 durante la segunda vaguada. Resolución de 100 m.

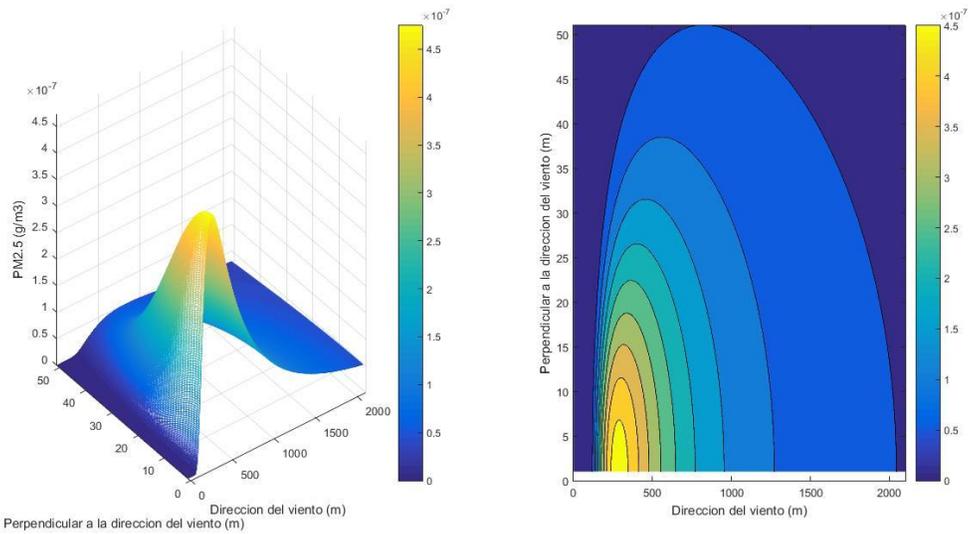


Figura 29. Dispersión de PM2.5 durante el Frente Frio núm. 1. Resolución de 100 m.

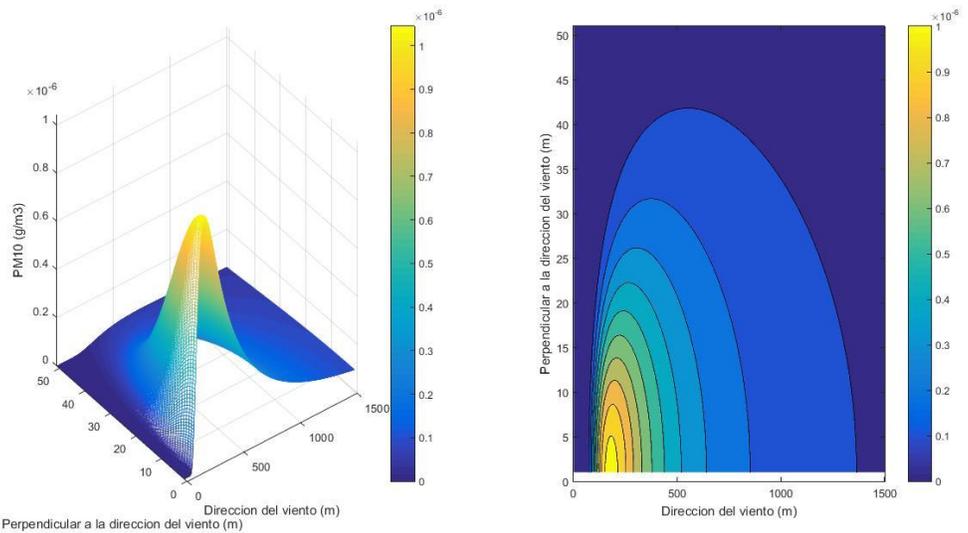


Figura 30. Dispersión de PM10 durante el Frente Frio núm. 1. Resolución de 100 m.

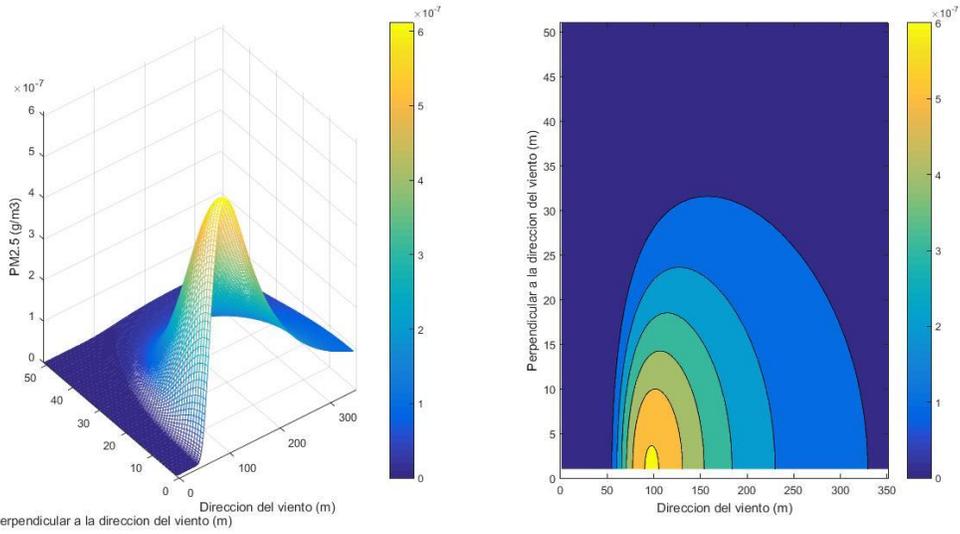


Figura 31. Dispersión de PM2.5 durante la segunda Onda Tropical. Resolución de 100 m.

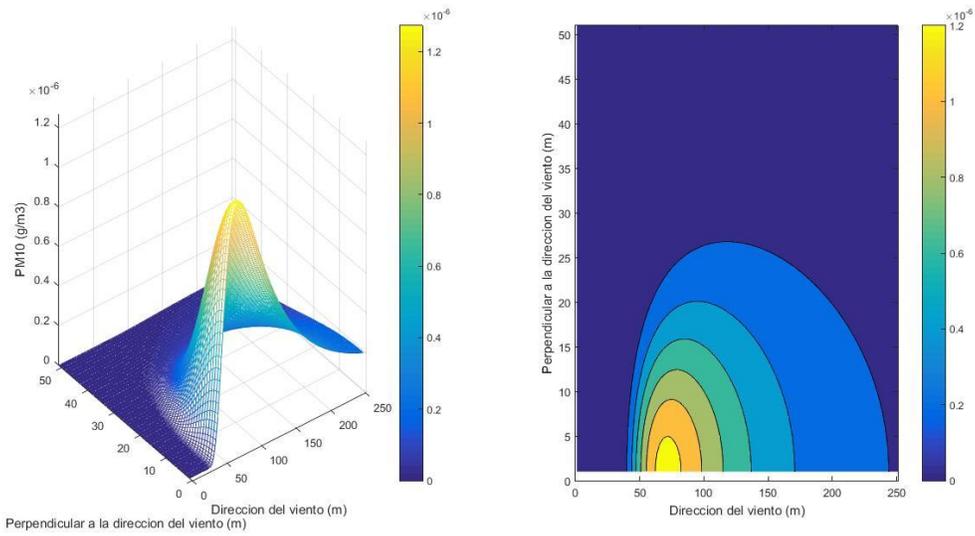


Figura 32. Dispersión de PM10 durante la segunda Onda Tropical. Resolución de 100 m.

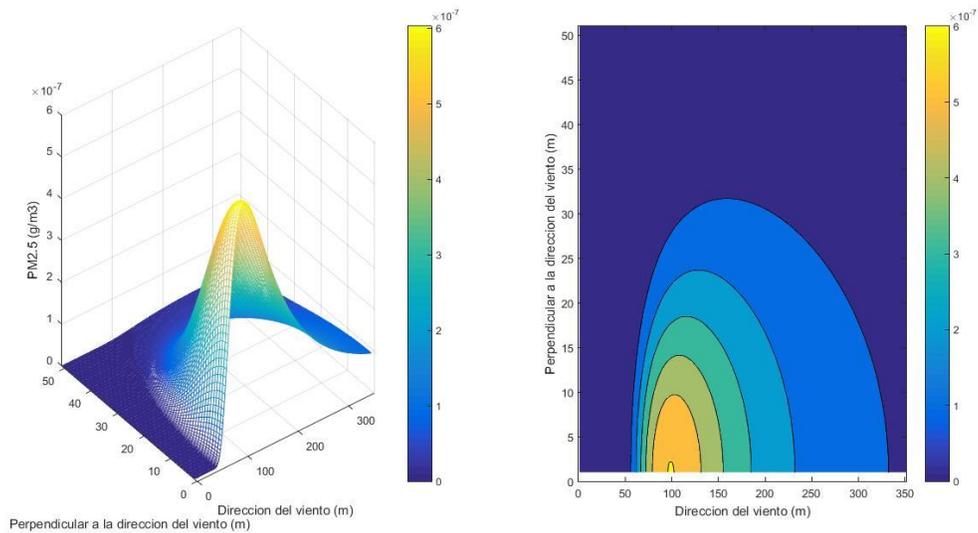


Figura 33. Dispersión de PM2.5 durante el PM2.5 Frente Frio núm. 2. Resolución de 100 m.

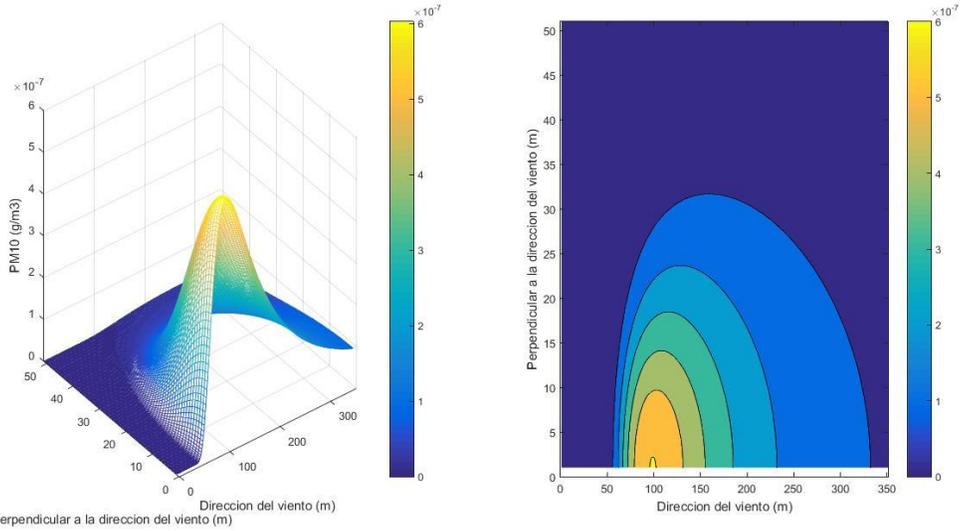


Figura 34. Dispersión de PM10 durante el Frente Frio núm. Resolución de 100 m.

En la Tabla 15 se puede observar la distancia estimada a la que se asentó el PM durante cada uno de los eventos climáticos.

Tabla 15. Distancia aproximada del asentamiento del contaminante. Obtenido de la modelación gaussiana en MATLAB.

Evento climático	Distancia de asentamiento (km)	
	PM2.5	PM10
C	33	24
V1	33	24
HG	>200	>200
OT1	48	25
V2	52	38
FF1	190	135
OT2	33	24
FF2	33	25

Fase cuatro. Análisis de los datos obtenidos y determinación de los efectos potenciales.

Los niveles máximos permisibles según la NOM-025-SSA1-2014 para PM10 son 75 µg/m³ como promedio de 24 horas de exposición. En el caso de PM2.5, el límite diario es de 45

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. En las figuras 35 y 36 se observó que sí exceden estos límites en el periodo muestreado.

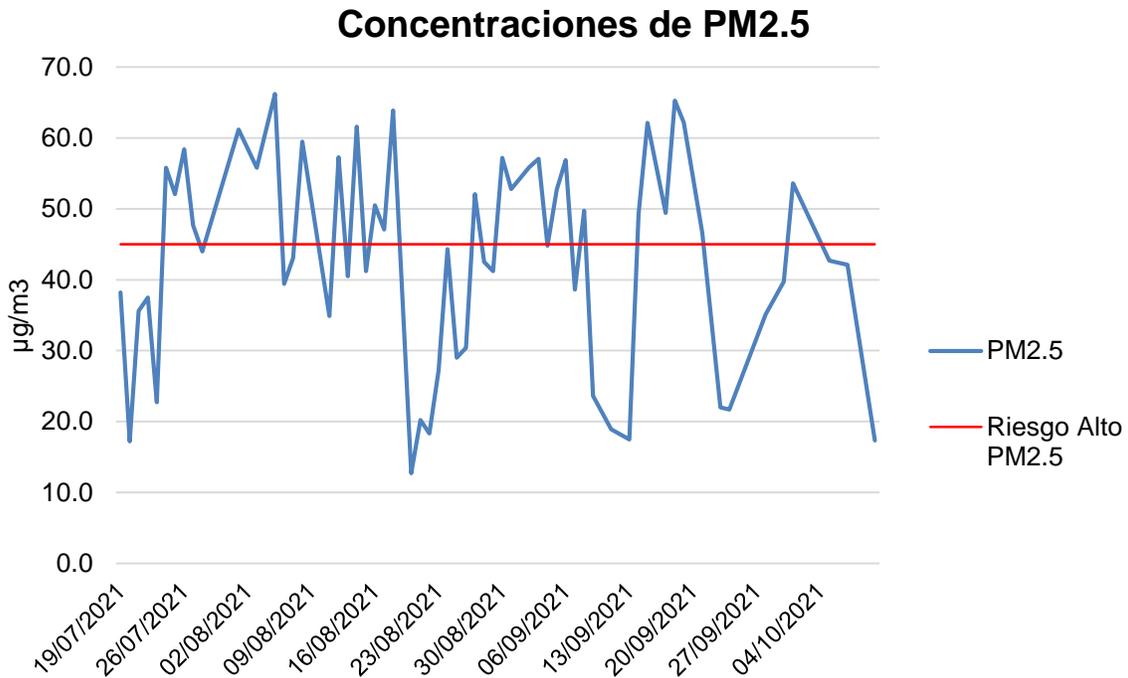


Figura 35. Concentraciones de PM2.5 durante el periodo de muestreo.

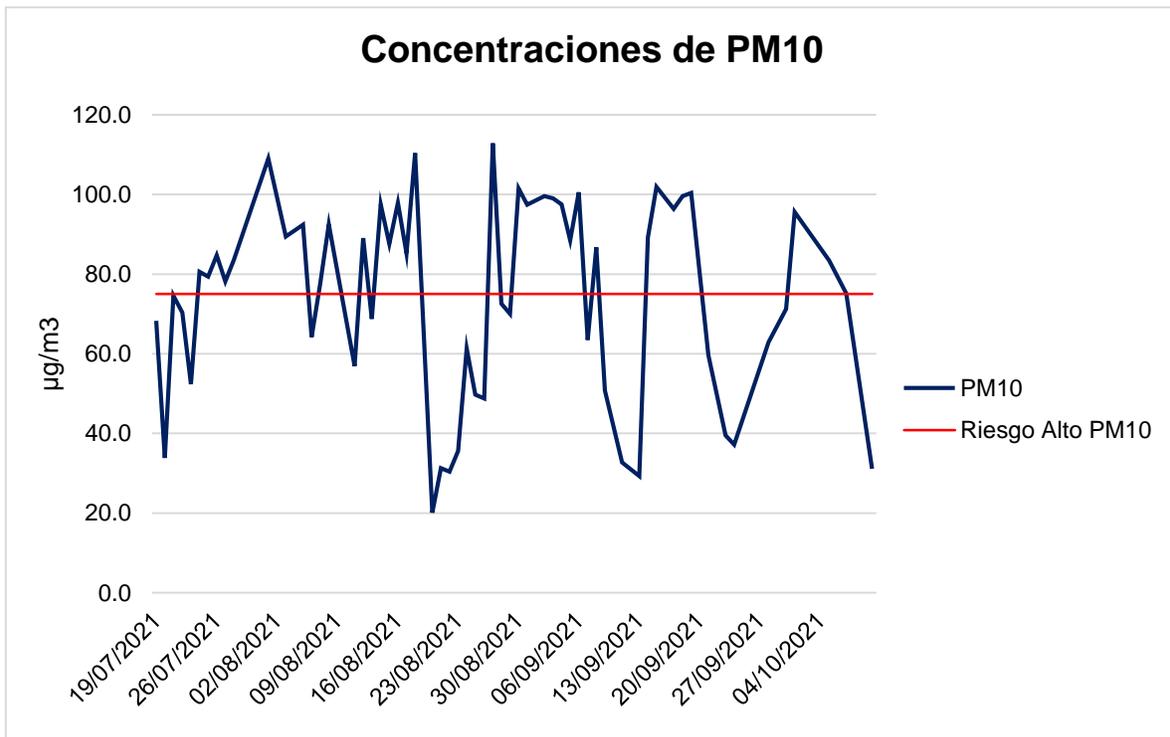


Figura 36. Concentraciones de PM10 durante el periodo de muestreo.

Para determinar el efecto potencial de riesgo se tomaron como referencia las Tablas 7 y 8. La distribución en las gráficas de pastel corresponden al periodo de muestreo. En el caso de PM2.5 se observó que el 47 % de los días de muestreo tuvo un nivel de riesgo alto; un 35 % moderado y un 18 % de bajo riesgo.

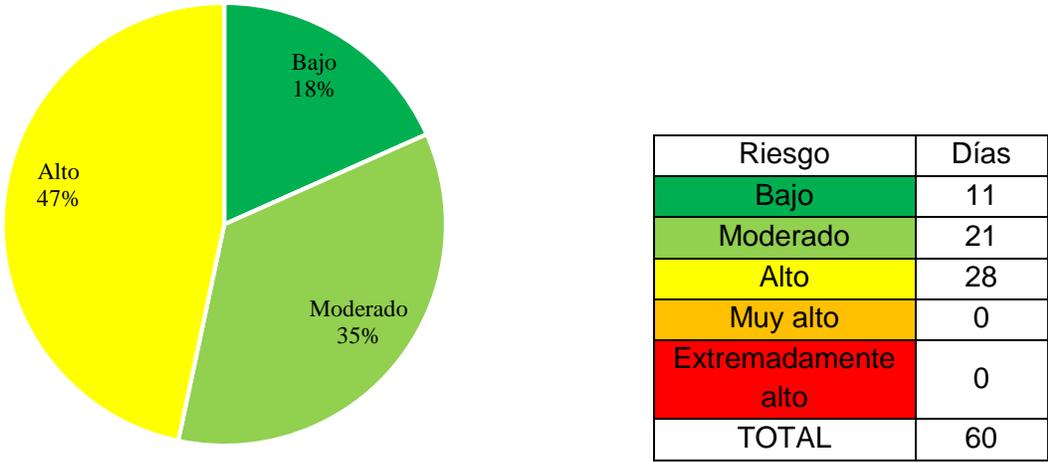


Figura 37. Nivel de riesgo asociado a PM2.5.

Por su parte, el nivel de riesgo relacionado a PM10 se registró alto en un 55 % del total de días muestreados; moderado en un 25 % y de bajo riesgo en un 20 %.

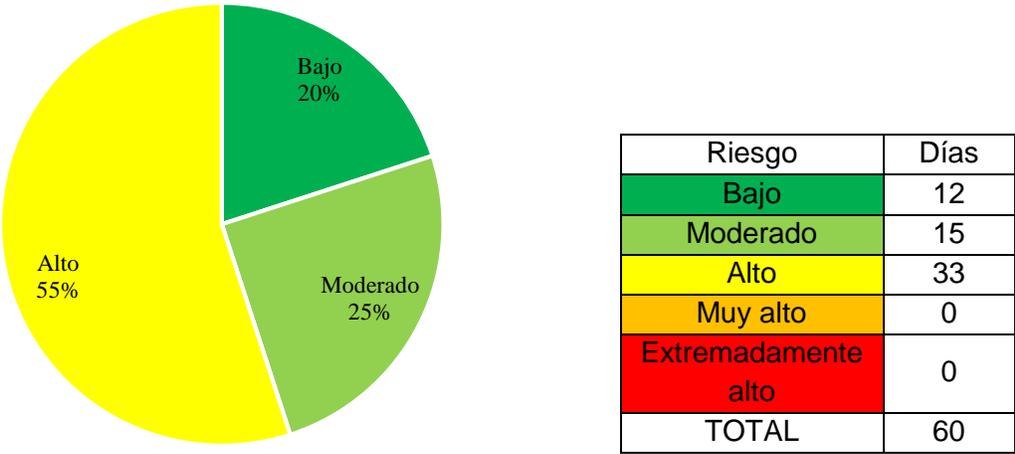


Figura 38. Nivel de riesgo asociado a PM10.

9. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados, las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ rebasan el límite recomendado para un periodo de muestreo de 24 horas según la norma mexicana. De acuerdo con los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQs) en Estados Unidos de América, los niveles de exposición de PM₁₀ y PM_{2.5} no deben exceder 150 µg/ m³ y 35 µg/ m³. Mostrándose así, más permisibles con los PM₁₀ y más estrictos con los PM_{2.5}. Esto puede deberse al potencial de impacto que los PM_{2.5} tienen en la región traqueobranquial y pulmonar del sistema respiratorio.

En la ciudad de Veracruz, todavía no se estudia a fondo la cantidad de casos de enfermedades respiratorias y del sistema cardiaco relacionadas con una mala calidad del aire, como sí lo hicieron Romero-Placeres et al. (2004) en la ciudad del La Habana, Cuba y Figueroa et al. (2016) en Guadalajara, México.

A pesar de que los sitios A y B no obtuvieron la cantidad de datos ideal, se procedió a comparar los datos de estos sitios junto con los del sitio D para ambos indicadores en forma de gráficas de caja y bigote. Se observó una asimetría en los datos acumulados de los 3 sitios de muestreo

Los valores totales obtenidos no muestran una tendencia observable en las Figuras 13 y 14. Sin embargo, se observó que el comportamiento de las fracciones de PM₁₀ y PM_{2.5} provenientes del Nuevo Puerto de Veracruz, está directamente influenciado por los factores meteorológicos del momento de muestreo, tales como humedad, temperatura, nubosidad, velocidad del viento, precipitaciones y radiación solar. Esta observación también fue hecha en los trabajos de Arrieta (2016), Álvarez et al. (2017) y Vergara y García (2013).

Por tal motivo se analizó por separado cada contaminante en función de las características meteorológicas de cada evento (Tabla 14). Se observó que, en los días con fuertes ráfagas de viento, como durante el huracán “Grace”, los niveles de concentración en las proximidades del puerto bajan. Por otra parte, en días de poco viento la concentración es mayor. Los días de menor viento se presentaron durante eventos de vaguada, sin embargo, durante estos eventos predomina el ascenso de aire cálido influyendo así en el eje vertical de la dispersión.

En las gráficas de dispersión del modelo gaussiano se pueden observar cómo influyen los factores meteorológicos en las concentraciones de contaminantes. Hubo una mayor

dispersión horizontal durante el huracán “Grace”, cómo se puede observar en la Tabla 15. De igual manera, se comprobó que el PM10 se dispersa a menor distancia que el PM2.5 debido a masa y su velocidad de asentamiento.

Por otra parte, cabe resaltar que para la realización de este trabajo se empleó el software MATLAB el cual es una plataforma de programación y cálculo numérico diseñado para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos matemáticos. No se utilizaron softwares especializados en dispersión de contaminantes para la elaboración de mapas como lo hicieron Delgado (2001), Rojano et al. (2013) y Montecinos (2008). Otra diferencia detectada con la mayoría de las referencias bibliográficas es el uso de muestreadores de alto y bajo volumen para la captación del PM. Esta técnica también permite analizar la composición química del contaminante, la cual, como ya se mencionó anteriormente, varía de acuerdo a la fuente de emisión.

Puertos alrededor del mundo ya tienen en operación un SMCA. Tal es el caso del puerto de Los Ángeles, California. Desde 2005 este puerto realiza un inventario anual de emisiones de CO, CO₂, SOx NOx, PM2.5 y PM10 de conocimiento público. Igualmente lleva a cabo medidas de mitigación como el programa de eficiencia energética y sistemas de captación de CO₂. Tal es el éxito de este monitoreo que la IMO ha utilizado estas implementaciones para elaborar las *Herramientas para las Emisiones Portuarias* (Toolkits) y poder replicar dicho sistema (IMO, 2018). En el caso de Europa, la organización OCEANA ha sido la responsable de fomentar programas de reducción de emisiones. En México contamos con el Programa de Puertos Verdes y las certificaciones ISO 14000 para abrir paso a la instalación de un SMCA eficiente pensando en la población en las inmediaciones de las zonas portuarias

10. CONCLUSIONES

Con base en la hipótesis general planteada, se concluye que se rechaza debido a que el comportamiento tanto de PM2.5 como de PM10 sobrepasan los niveles considerados como seguros para la población. En ambos parámetros predominó un nivel de riesgo alto de acuerdo con la NOM-172-SEMARNAT-2019.

Con respecto a la hipótesis particular 1, los puntos de muestreo sí estuvieron establecidos en la zona sur-oeste del área de emisión gracias a los valores proporcionados por CONAGUA. Por medio de herramientas SIG se determinó el punto que mayor cumpliera con las características solicitadas, siendo esta el parque “La Pinera”.

La hipótesis particular 2 igualmente no se rechaza. Los valores diarios de PM2.5 y PM10 en el sitio de muestreo fueron directamente afectados por los eventos climatológicos que se registraron durante el periodo de monitoreo. Se observó que durante los eventos de tormenta tropical y onda tropical la dispersión de los contaminantes es mayor, aumentando así su alcance y disminuyendo su concentración.

Las figuras resultantes del modelado en MATLAB mostraron que los contaminantes se dispersaron a más de 5 km hacia el sur del punto de emisión, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis 3.

Dentro de los efectos potenciales, relacionados con los valores de concentración obtenidos, se identificó un alto riesgo a la salud de los habitantes de las zonas aledañas durante días de poco viento, pues los niveles superan los recomendados por la normativa. Por tal motivo, hipótesis 4 no queda rechazada.

Se concluye que la situación actual del puerto no es crítica con respecto a otros estudiados. Sin embargo, puede decaer de manera considerable sin la implementación de medidas de reducción de emisiones y adecuada gestión de las operaciones para evitar la saturación de navieras. Cabe recordar que el Nuevo Puerto de Veracruz se encuentra en la primera de dos fases de construcción, siendo la segunda fase más grande que la actual.

11. RECOMENDACIONES

Por todo lo anterior, se recomienda la implementación de un SMCA en los puertos con alta actividad portuaria. En el caso de México, se recomienda iniciar con los recintos federales, que son las de mayor actividad y además tienen a sus alrededores desarrollos urbanos. Por consiguiente, este sistema representaría el primer paso para posteriormente diseñar e implementar acciones de política pública para reducir la emisión de contaminantes en la atmósfera y así minimizar sus impactos sobre la salud de la población y los ecosistemas.

Es recomendado que un SMCA se componga de por lo menos 6 indicadores para poder obtener un Índice de Calidad del Aire que facilite la interpretación de los valores obtenidos. El PM_{2.5} y PM₁₀ son sólo 2 de estos indicadores. Se propone consultar las guías proporcionadas por la IMO y la USEPA. De igual manera se recomienda el uso de muestreadores de alto volumen para PM₁₀ y de bajo volumen para PM_{2.5} para una medición más precisa y poder analizar la composición química del contaminante. Conocer su composición permite saber exactamente su densidad y posiblemente identificar su procedencia.

Los modelos de dispersión de contaminantes, sean gaussianos o no, demandan un alto nivel de entendimiento del sistema y de las variables que lo compongan. Entre más datos se puedan recolectar en el muestreo, más preciso serán las gráficas de dispersión. Lo ideal es tener un monitoreo fijo directamente de la chimenea para evitar las estimaciones. Actualmente existen navieras cuyos barcos cuentan con este monitoreo de sus emisiones.

Recordando que las emisiones son acumulativas, es posible conocer la concentración del contaminante en cualquier punto de la zona aledaña identificando las fuentes fijas y sumando las concentraciones convergentes en ese punto. Un mayor número de sitios de monitoreo servirían para la creación de mapas de dispersión utilizando el mismo modelado. Para la elaboración de mapas y realizar un análisis más detallado sobre la dispersión, se recomienda el uso de programas avalados por la USEPA y que utilicen el modelo ISC3.

Una de las mayores ventajas del modelo gaussiano es la cantidad de variables que considera. Además de las variables utilizadas en este trabajo existen otras más. Permitiendo así trabajar bajo diversas condiciones de estabilidad atmosférica, relieve, contaminante y caudal, por mencionar algunos.

La calidad del aire no se debe menospreciar en las zonas costeras, pues se prevé que el tráfico marítimo crezca aún más en las próximas décadas y con él la contaminación del aire y su impacto en las regiones costeras.

12. LITERATURA CITADA

- Aguilar, V. A. (2014). Ontología y epistemología en la investigación cualitativa. *Revista De Investigación En Psicología*, 15(1), 209-212.
- Álcantara, V., y Padilla, E. (2005). *Análisis de las emisiones de CO2 y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo* [Universidad Autónoma de Barcelona]. España. http://revistaeconomiacritica.org/sites/default/files/revistas/n4/2_analisis_emisiones.pdf
- Álvarez, A. M., Arredondo, R., y Posadas, R. Y. (2017). Determinación de la presencia de partículas (PM10) en Perú producidas por quema de biomasa con ayuda de modelos numéricos. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 33(1), 99-108. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.09>
- APIVER. (2020). *Certificados*. Administración Portuaria Integral de Veracruz. <https://www.puertoveracruz.com.mx/wordpress/acerca-del-puerto/certificados/>
- Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., y Aragonés, N. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista española de Salud Pública*, 73. http://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul I*, 34(1).
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 12.
- ASIPONA. (2022). *Certificados*. Retrieved 08/19/2022 from
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista española de Salud Pública*, 79. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200005
- Ballester, F., Tenías, J., y Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: Una introducción. *Revista española de Salud Pública*, 73. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200002
- Bien, H. (2009). *gaussianPlume*. Retrieved august from https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13279-gaussianplume?s_tid=srchtitle_gaussianplume_1
- Cabrera-Fernández, J., y Torres, J. (2012). *Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica* [Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. Colombia. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCF3110_01.pdf
- Castro, P., y Escobar, L. (2006). *Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión* [Universidad de La Salle]. México. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1300&context=ing_ambiental_sanitaria
- CENAPRED. (2001). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2000*. México Retrieved from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/29-NO.2-IMPACTOSOCIOECONMICODELOSPRINCIPALESDESASTRESOCURRIDOSENMXICOENELAO2000.PDF>

- Cruz, M., Gómez, A., Ramírez, R., Villalba, A. G., Monge, O., Varela, J., . . . Duarte, H. F. (2017). Calidad del aire respecto de metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) y relación con salud respiratoria: caso Sonora, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 33(1). <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp02.02>
- Cuevas, A. (2019). La atmósfera, sus capas y propiedades. In U. A. d. E. d. Hidalgo (Ed.), *Escuela Superior de Ciudad Sahagún*. Mexico.
- De la Cruz-Monte de Oca, F., Furet-Bridón, N., Turtós-Carbonell, L., y Lorente-Vera, M. (2011). La dispersión atmosférica de contaminantes en una zona industrial de Cuba. *Revista CENIC*, 42(3), 7.
- Delgado, M. (2001). *Estudio correlativo de la concentración de elementos tóxicos con el tamaño de partículas en el aire ambiental* Centro de investigación en materiales avanzados]. México.
- EPA. (2007). *The plain english guide to the clean air act*. Estados Unidos
- ESMAP. (2010a). *Desarrollo con bajas emisiones de carbono para México* (C. F. Assist, Ed.) http://awsassets.panda.org/downloads/desarrollo_con_bajas_emisiones_de_carbono_para_mexico.pdf
- ESMAP. (2010b). Programa de estudios de países sobre el crecimiento con bajas emisiones de carbono. In B. Mundial (Ed.), *Desarrollo con bajas emisiones de carbono para México*. Carbon Finance Assist. https://esmap.org/sites/default/files/esmap-files/2011000172SPAspa_LowRes.pdf
- Ferrelli, F., Bustos, M. L., y Piccolo, M. C. (2016). La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Estudios Geográficos*, 77(281), 469-489. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201615>
- Figueroa, A., Davydova, V., Garibay, G., Parada, T., y Orozco, M. G. (2016). PM10 y O3 como factores de riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y neumonía en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 20(1), 14-23. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927002.pdf>
- Gómez-Barquín, R. (2019). *Modernización del puerto de Veracruz, la obra más importante de infraestructura en México* [Interview]. <https://prospectiva.uv.mx/index.php/prospectiva/article/viewFile/7/7>
- González-Cancelas, N., Soler-Flores, F., Orive, A., y Camarero-Orive, A. (2013). Transporte marítimo y medio ambiente: las implicaciones de las SECAS y las ECAS. *Revista Transporte y Territorio*, 8.
- González, A., y Carlsson-Kanyama, A. (2007). Emisiones de gases de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global: sector agropecuario. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11. https://www.researchgate.net/publication/237647434_EMISIONES_DE_GASES_DE_EFECTO_INVERNADERO_CON_ALTO_POTENCIAL_DE_CALENTAMIENTO_GLOBALEL_SECTOR_AGROPECUARIO
- Hernández-Cadena, L., Barraza-Villarreal, A., Ramírez-Aguilar, M., Moreno-Macías, H., Miller, P., Carbajal-Arroyo, L. A., y Romieu, I. (2007). Morbilidad infantil por causas respiratorias y su relación con la contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Salud pública de México*, 49(1), 27-36. <https://www.medigraphic.com/pdfs/salpubmex/sal-2007/sal071e.pdf>
- Hernández, L., Gallardo, J., Díaz, J. d. J., y Villegas, E. (2017). Contaminación del aire por partículas (PM10) en el Polígono de Fragilidad Ambiental, Guadalajara, Jalisco. *Ciencia y tecnología*

<http://reaxion.utleon.edu.mx/Art Impr Contaminacion del aire por particulas PM10 en el Poligono de Fragilidad Ambiental Guadalajara Jalisco.html>

- Herrera-Murillo, J., Susana, R.-R., y Ligia, S.-T. (2009). Determinación de los niveles de partículas PM10 y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia, Costa Rica: año 2005-2006. *Tecnología en Marcha*, 22(4), 18-27.
- IMO. (2018). *Herramientas para las emisiones portuarias. Guía N.º 1: Evaluación de las emisiones portuarias*.
- INECC. (2014). *Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM2.5 en tres zonas metropolitanas mexicanas*. México Retrieved from http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/224/712_2014_Valoracion_economica_beneficios_salud.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- INECC. (2019). *Informe Nacional de la Calidad del Aire, México*. México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Retrieved from <https://www.gob.mx/inecc/es/articulos/estado-de-la-calidad-del-aire-en-mexico?idiom=es>
- INECC. (2020). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php>
- INEGI. (2019). *Comunicado de Prensa Núm. 640/19. Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2018*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/StmaCntaNal/CtasEcmcasEcolgicas2018.pdf>
- Irizar-López, A. (2017). *Puertos verdes en favor del medio ambiente*. <https://www.elsoldemexico.com.mx/analisis/Puertos-verdes-en-favor-del-medio-ambiente-244134.html>
- Jiménez, J., y Pulgarín, D. (2010). Sistema de indicadores de la calidad del aire. *Revista Gestión y Ambiente*, 13(3), 37-50. <https://doi.org/10.15446/ga>
- Kibler, S. R., Tester, P. A., Kunkel, K. E., Moore, S. K., y Litaker, R. W. (2015). Effects of ocean warming on growth and distribution of dinoflagellates associated with ciguatera fish poisoning in the Caribbean. *Ecological Modelling*, 316(2015), 194-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.08.020>
- Langella, G., Iodice, P., Amoresano, A., y Senatore, A. (2016). Ship engines and air pollutants: emission during fuel change-over and dispersion over coastal areas. *Energy Environment Engineering*, 7, 307-320. <https://doi.org/10.1007/s40095-016-0211-7>
- Li-Ramírez, J., Duque-Méndez, N., Pérez-Zapata, A., y Aristizábal-Zuluaga, B. (2016). Generación y representación de Indicadores de calidad de aire: caso de estudio aplicado a Manizales. *ITECKNE*, 13(12), 174 - 184. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-17982016000200008&script=sci_abstract&tlang=es
- Lim, K. (2017). Panorama actual de la Organización Marítima Internacional, prospectiva y desafíos en el orbe. In *Autoridad Marítima Nacional, una perspectiva global*. Secretaría de Marina-Armada de México. www.cesnav.edu.mx/ININVESTAM
- Londoño, J., Correa, M., y Palacio, C. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista EIA*, 16, 149-162. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/439>

- Manzur, M. E., Benzal, G., y Gonzalez, S. N. (2013). Simulación de dispersión de contaminantes atmosféricos. *Arch. Bioq., Quím. y Farm.*, 22(2), 15.
- Masters, G., y Ela, W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental* (1 ed.). Pearson Prentice Hall. https://www.academia.edu/20196483/Introduccion_A_La_Ingenieria_Medioambiental
- Matus, P. (2017). Contaminación atmosférica: la composición química incide en su riesgo. *Rev Med Chile*, 145(1), 7-8. <https://doi.org/10.4067>
- Mendoza, A., y García, M. R. (2009). Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(2), 73-85. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000200002
- Mihelcic, J. R., y Zimmerman, J. B. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño* (1 ed.). Alfaomega. https://www.academia.edu/16460327/220588573_Ingenieria_ambiental_fundament_Mihelcic_James_R_pdf
- Montecinos, S. (2008). Simple air quality model for a plane source. *Atmósfera*, 21(2), 147-170. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-62362008000200003&Ing=en&nrm=iso&tIng=en
- Montoya, G., Cepeda, W., y Eslava, J. (2004). Características de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica en Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(108).
- Morales, J., Martínez, O., González, C., López, A., Cruz, B., y Carrillo, F. (2021). Contaminación del aire en la zona urbana de Puerto Vallarta, México. *Dossier Central. Bitácora*, 31(2), 16.
- Morantes, G. (2016). Revisión de instrumentos normativos de la calidad del aire y sistemas de monitoreo atmosférico: América Latina y el Caribe. *Revista Interciencia*, 41(4), 235-242. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/10/235-A-RINCON-41_48.pdf
- NOAA. (2017). *Climate Change Predictions*. Retrieved 06/05/2020 from <https://www.coast.noaa.gov/states/fast-facts/climate-change.html>
- Onatra, W., Vargas, S., Páez, E., Rojas, D., y López, A. (2009). Correlación entre la enfermedad respiratoria aguda (ERA) en mujeres embarazadas y la calidad del aire. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient*, 12(2), 27-37. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v12n2/v12n2a04.pdf>
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26(1).
- PC. (2018). *Contaminación del Aire*. Protección Civil del Estado de Veracruz. <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/contaminacion-del-aire/>
- Peña, M., y Ramírez, A. (2016). Métodos espectrales modernos para el post proceso de mediciones experimentales de contaminación atmosférica. *Verano de la Investigación Científica*, 2(1), 1188-1192. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1208/835>
- Pérez-Balán, R. (2013). *Estudio del contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos y metales en partículas atmosféricas de diferentes diámetros aerodinámicos de La Comarca Lagunera, México*. Centro De Investigación En Materiales Avanzados, S.C.]. México.
- Pérez Carpio, J. E., Cárdenas Soto, R., y Almaraz Villegas, C. (2015). Evaluación de la calidad de aire por partículas menores a 10 microgramos y nivel de riesgo basado en el índice de calidad

- de aire en la Universidad Peruana Unión. *Revista de Investigación Universitaria*, 4(2), 79-82.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., y Kreski, D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality and Long-term Exposure to Fine particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), 1132-1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Portuaria, V. C. (2020). *Ampliación del puerto de Veracruz*. Retrieved 04/06/2020 from <https://veracruzcomunidadportuaria.com.mx/ampliacion-del-puerto>
- Prato, D. (2012). *Modelación de la dispersión de material particulado en zona minera del cesar, colombia, usando Fluent (CFD)* Universidad EAN]. Colombia.
- Préndez, M., Corvalán, R., y Cisternas, M. (2007). Estudio Preliminar del Material Particulado de Fuentes Estacionarias: Aplicación al Sistema de Compensación de Emisiones en la Región Metropolitana, Chile. *Información tecnológica*, 18(2).
- Puigcerver, M., y Carrascal, M. (2008). *El Medio Atmosférico: Meteorología y Contaminación*. Univeristat de Barcelona. <http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/07022.pdf>
- Rivas, D. (2018). El clima, caracteres, causas, clasificación, fenómenos y alteraciones climáticas. Aplicación didáctica. In U. N. D. EDUCACIÓN (Ed.), *Escuela Profesional de Ciencias Sociales*. Perú.
- Rojano, R., Angulo, L., y Restrepo, G. (2013). Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano. *Información tecnológica*, 24(2).
- Romero-Placeres, M., Más-Bermejo, P., y Lacasaña-Navarro, M. (2004). Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad de La Habana. *Salud pública de méxico*, 46(3), 222-233. <http://www.insp.mx/salud/index.html>
- Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Olaiz-Fernández, G., y Borja-Aburto, V. H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. *Salud pública de méxico*, 43(6), 544-555.
- Salazar, A., Chávez, R. H., y Pichardo, J. A. (2016). Estudio de las causas y efectos de la contaminación del aire, una responsabilidad social. *Estudios Interdisciplinarios de la Organización*, 10(1), 28-48.
- Sánchez, E., Ortiz, M. L., y Mussali, P. (2016). Implicaciones del cambio climático en la salud humana. *Ciencia y tecnología. Profesores e investigadores, Centro de Investigación en Biotecnología (ceib), uaem*. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/143/297-2185-2-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santa Cruz, A. (2000). *Difusión de contaminantes gaseosos en la atmósfera* Universidad Tecnológica Nacional]. Argentina.
- Sarro, L. (2015). Puertos y reportes de sostenibilidad. *Escritos Contables y de Administración*, 5(2), 87-123. <http://sitiosbib.bcentral.uns.edu.ar/eca/article/view/330>
- SCT. (2019). *Anuario Estadístico de los Puertos de México*. Puertos y Marina Mercante. http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/U_DGP/estadisticas/2016/Anuario/Anuario2019.html
- SCT. (2020). *Compilación de prácticas ambientales exitosas en puertos de México*. México Retrieved from <http://portalcip.org/wp-content/uploads/2020/05/PRACTICAS-AMBIENTALES-EXITOSAS-EN-PUERTOS-DE-MEXICO-CGPM-30-ABR-2020comp.pdf>

- SEDEMA. (2010). *Inventario de emisiones*. <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/inventario-de-emisiones/>
- SEDEMA. (2020). *Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire*. <http://www.veracruz.gob.mx/medioambiente/calidad-del-aire/>
- SEMARNAT. (2007). *Resolutivo de la Manifestación de Impacto Ambiental del Nuevo Puerto de Veracruz*. Delegación Federal en el Estado de Veracruz: Subdelegación de Gestión para la Protección Ambiental y Recursos Naturales Retrieved from <http://www.puertodeveracruz.mx/apiver/archivos/IFAI/2012/Libros Blancos/Archivos/AneXos/Docs/GICO0309/RESOLUTIVO%20MIA.pdf>
- SEMARNAT. (2013). *Resuelve Semarnat MIA del proyecto Ampliación del Puerto de Veracruz en la Zona Norte*. Retrieved 06/05/2020 from <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/resuelve-semarnat-mia-del-proyecto-ampliacion-del-puerto-de-veracruz-en-la-zona-norte>
- SEMARNAT. (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. Diario Oficial de la Federación Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#:~:text=NO RMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%20D025,y%20criterios%20para%20su%20evaluaci%C3%B3n.
- SEMARNAT. (2015). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-y-su-protocolo-de-kioto-cmnucc>
- SEMARNAT. (2016a). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SEMARNAT. (2016b). *Informe del Medio Ambiente: Atmósfera*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap5.html#tema1>
- SEMARNAT. (2016c). *Protocolo de Kioto sobre cambio climático*. Retrieved 06/05/2020 from <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico?idiom=es#:~:text=El%20protocolo%20entr%C3%B3%20en%20vigor,de%20los%20pa%C3%ADses%20en%20desarrollo>.
- SEMARNAT. (2018). *Ley General de Cambio Climático*. (DOF 13-07-2018). México Retrieved from http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/juridico/leyes/LG_DE_CAMBIO_CLIMATICO.pdf
- SEMARNAT. (2020). *Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud México: Documento Oficial de la Federación* Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019
- SEMARNAT. (2022). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2019* (1 ed.). INEGI. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz, M., y Mendoza, E. (2014). Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. In UNAM (Ed.). Mexico: Instituto de Ingeniería.

- Soto-Colobaltes, N. (2017). El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales. *Dynamis*, 37(1), 187-209. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0211-95362017000100009
- Tami, L. (2013). *Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México* UNAM]. México.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*.
- USEPA. (2016). *NAAQS Table*. Retrieved 20 de diciembre from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- Valdés, R. (2018). Prevención de la contaminación marina originada por los buques en México. *Instituto de Investigaciones Estratégicas de la Armada de México*, 49(18).
- Valencia, J., Espinosa, A., Parra, A., y Peña, M. (2011). Percepción del riesgo por emisiones atmosféricas provenientes de la disposición final de residuos sólidos. *Revista de Salud Pública*, 13. <https://doi.org/10.15446/rsap>
- Vallejo, M., Jáuregui-Renaud, K., y Hermosillo, A. (2003). Efectos de la Contaminación atmosférica en la Salud y su Importancia en la Ciudad de México. *Gaceta Médica de México*, 139. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=1108>
- Vega de Kuyper, J. C., y Ramírez, M. S. (2014). *Fuentes de energía , renovables y no renovables. Aplicaciones* (1 ed.). Alfaomega.
- Vergara, E., y García, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta. *Épsilon*, 21(3), 16.
- Vijay, S., Molina, L., y Molina, M. (2004). *Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano* Massachusetts Institute of Technology]. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2166-estimating-air-pollution-emissions-from-fossil-fuel-use-in-electricity-sector-in-es.pdf>
- Vilardell, M. (2010). *Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008* Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona]. España. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/10640/PFC_Memoria.pdf
- WHO. (2019). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2016*. https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_March2014.pdf?ua=1

13.ANEXOS

16Anexo 1. Registros obtenidos durante el periodo de muestreo.

Fecha	Datos de Protección Civil Veracruz					Datos del muestreo				
	Viento		Temperatura (°C)		Nubosidad	Evento climático	Viento		PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
	Velocidad (km/h)	Dirección	Max.	Min.			Velocidad (m/s)	Dirección		
19/07/2021	20-30	NNE	32	22	Medio nublado	Canícula	2.5	NNE	38.2	68.3
20/07/2021	25-40	NE	32	23.4	Mayormente despejado	Canícula	3.8	NNE	17.2	33.8
21/07/2021	20-35	NEE	31.6	25	Parcialmente nublado	Canícula	1.91	E	35.6	74.6
22/07/2021	20-35	SEE	33.6	23	Despejado	Canícula	2.17	E	37.5	70.3
23/07/2021	25-40	SEE	33.4	21.1	Parcialmente nublado	Canícula	3.22	S	22.7	52.4
24/07/2021	20-30	NEE	34	24.4	Despejado	Canícula	0.83	E	55.8	80.6
25/07/2021	20-30	NEE	34	24.5	Despejado	Canícula	0.95	E	52.1	79.4
26/07/2021	25-40	NE	32.6	24	Mayormente despejado	Canícula	1.06	NE	58.4	84.7
27/07/2021	20-30	NEE	32.8	25	Mayormente despejado	Canícula	1.21	NEE	47.7	78.2
28/07/2021	20-35	NE	33	25	Medio nublado	Canícula	1.8	NNE	44.0	83.6
01/08/2021	20-35	N	32.2	23.3	Medio nublado	Canícula	0.7	N	61.2	109.0
03/08/2021	20-35	E	33	25	Mayormente nublado	Canícula	0.92	SEE	55.8	89.4
05/08/2021	20-35	NNE	32	25	Mayormente nublado	Canícula	0.41	N	66.2	92.4
06/08/2021	20-35	NE	32.8	25.3	Medio nublado	Canícula	2.11	E	39.4	64.2
07/08/2021	20-35	NE	32.4	24	Medio despejado	Canícula	1.93	NE	43.1	77.6
08/08/2021	20-35	NE	31.9	23.1	Medio despejado	Canícula	0.98	NE	59.5	92.5
11/08/2021	20-35	NE	32.5	24.4	Medio despejado	Canícula	2.2	NEE	34.9	57.0
12/08/2021	20-35	NE	32.8	22.8	Medio nublado	Vaguada	1.5	NE	57.3	89.0
13/08/2021	20-35	NE	33	25	Mayormente nublado	Vaguada	1.78	NE	40.5	68.7
14/08/2021	15-35	NE	32.5	25	Despejado	Vaguada	0.67	NNE	61.6	97.5
15/08/2021	20-35	NE	33	25	Mayormente nublado	Vaguada	1.78	NE	41.2	87.6
16/08/2021	20-35	NE	32.8	24.6	Medio nublado	Vaguada	1.16	E	50.5	97.9
17/08/2021	20-35	NE	33	25	Medio nublado	Vaguada	1.9	SEE	47.1	85.2
18/08/2021	20-35	NE	34.8	26.5	Despejado	Huracán Grace	0.33	NE	63.9	110.4
20/08/2021	60-80	N	31.9	25	Nublado	Huracán Grace	8.8	N	12.7	20.1
21/08/2021	20-40	N	31.9	24.4	Medio nublado	Huracán Grace	4.2	NNE	20.2	31.3
22/08/2021	15-25	NE	32.2	24.4	Medio nublado	Onda tropical	3.94	E	18.3	30.4
23/08/2021	20-30	NEE	30.8	21.6	Mayormente nublado	Onda tropical	2.9	SE	27.2	35.6

24/08/2021	20-30	NE	27.8	22.1	Mayormente nublado	Onda tropical	1.88	SE	44.3	61.3
25/08/2021	20-30	NE	28.5	22.8	Mayormente nublado	Onda tropical	3.18	E	29.0	49.7
26/08/2021	20-30	NEE	30.6	23	Medio nublado	Onda tropical	3.32	E	30.4	48.8
27/08/2021	20-30	NEE	32.6	23.6	Medio nublado	Onda tropical	0.58	NEE	52.1	112.8
28/08/2021	10-25	NEE	31.8	32.4	Medio nublado	Onda tropical	1.67	NE	42.5	72.6
29/08/2021	10-25	NEE	32.6	23.2	Mayormente nublado	Onda tropical	1.55	NE	41.2	70.0
30/08/2021	20-30	NEE	31.9	24.6	Mayormente despejado	Onda tropical	0.98	NE	57.2	101.5
31/08/2021	20-35	E	32	23.5	Medio nublado	Onda tropical	1.02	NEE	52.8	97.4
02/09/2021	20-35	SE	33.2	24	Medio nublado	Onda tropical	1.74	E	55.9	99.6
03/09/2021	20-30	E	32	24.4	Mayormente nublado	Onda tropical	0.87	SE	57.1	99.0
04/09/2021	20-35	NEE	31.4	23.8	Medio nublado	Onda tropical	1.1	E	44.8	97.5
05/09/2021	20-30	NEE	31.6	24	Medio nublado	Onda tropical	0.86	NEE	52.7	88.5
06/09/2021	20-35	E	31	22.4	Mayormente nublado	Onda tropical	0.4	SE	56.9	100.6
07/09/2021	20-35	E	32.6	24	Mayormente nublado	Onda tropical	0.63	SSE	38.6	63.5
08/09/2021	20-35	NNE	33.4	24	Mayormente nublado	Onda tropical	1.48	N	49.8	86.7
09/09/2021	20-35	NNE	31.4	23	Mayormente nublado	Onda tropical	2.74	NE	23.6	50.8
11/09/2021	35-45	NNO	30.8	23.2	Nublado	Tormenta tropical	5.75	N	18.9	32.7
13/09/2021	20-35	SE	31.5	22.6	Medio nublado	Tormenta tropical	5.03	SSE	17.5	29.3
14/09/2021	20-30	SEE	33	24.6	Despejado	Vaguada	1.85	NEE	49.3	89.2
15/09/2021	20-30	SEE	33.4	22.2	Despejado	Vaguada	0.84	SE	62.2	101.9
17/09/2021	20-35	NE	32.7	24.5	Mayormente despejado	Vaguada	1.09	N	49.5	96.4
18/09/2021	10-25	NNE	32.2	23	Mayormente nublado	Vaguada	0.76	N	65.3	99.6
19/09/2021	10-25	NEE	30.6	23.6	Medio nublado	Vaguada	0.44	NE	62.2	100.4
21/09/2021	25-40	E	35	31	Mayormente despejado	Norte (FF1)	3.87	E	46.7	59.6
23/09/2021	20-40	N	33.6	23	Medio nublado	Norte (FF1)	2.1	NE	22.0	39.5
24/09/2021	35-55	N	33	29	Medio nublado	Norte (FF1)	4.7	N	21.7	37.2
28/09/2021	20-35	NE	33.5	25	Mayormente despejado	Onda tropical	0.83	E	35.1	62.9
30/09/2021	20-35	NE	33	25	Nublado	Onda tropical	1.48	SSE	39.8	71.2
01/10/2021	20-35	SE	31	25	Medio nublado	Lluvias fuertes (FF2)	1.95	N	53.6	95.6
05/10/2021	25-35	NNO	32	23.2	Nublado	Lluvias fuertes (FF2)	2.04	N	42.7	83.4

07/10/2021	25-35	N	31.8	23	Nublado	Lluvias fuertes (FF2)	0.41	NE	42.1	75.1
10/10/2021	20-30	S	31.8	23.2	Despejado	Vaguada	0.175	NE	17.3	31.1

NNO: Nornoroeste

N: Norte

NNE: Nornordeste

NEE: Estenordeste

E: Este

SEE: Estesudeste

SSE: Sudsudeste

S: Sur

FF1: Frente Frio núm. 1

FF2: Frente Frio núm. 2