



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL-AIRE

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE POR LA
AMPLIACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ, A PARTIR
DEL MONITOREO DE DIÓXIDO DE AZUFRE Y PARTÍCULAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA
IAM. MAURO CORTEZ HUERTA

TUTOR PRINCIPAL
DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA (INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO)

COMITÉ TUTORAL
M.C. VICENTE FUENTES GEA (FACULTAD DE INGENIERÍA)
DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ (FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, AGOSTO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: (DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ)

SECRETARIO: (M.C. VICENTE FUENTES GEA)

1^{ER.} VOCAL: (DR. GILBERTO FUENTES GARCÍA)

2^{DO.} VOCAL: (DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ)

3^{ER.} VOCAL: (DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA)

LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

- SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
- ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL DE VERACRUZ

TUTOR DE TESIS:
DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

FIRMA

DEDICATORIA

A MI FAMILIA:

A mi papá J. Alejo M. Cortez Rodríguez, a mi mamá Alicia Huerta Corona,
a mis hermanos: P. Alejandro, Aurelia[†] y M. Veronica, a mis sobrinos: Alexander,
Zoe E., Oliver D., por ser mi guía y mi motivación de seguir adelante y cumplir mis metas.
Que, con su ejemplo, dedicación y trabajo nunca me han bajado los brazos para todo lo que haga,
aun cuando todo se dificulte.

“LOS AMO”

A MIS AMIGOS:

Ivan de J. Morales Luna, Martha Ramos Morales, Betzabe Orea de Jesús, Brenda Vásquez Rosas,
Janeth Corona Gasca, Alejandra Fernández Lara, Cristian Vázquez Gonzales, Marco A.
Velázquez Espinosa, Axel Ortiz Sánchez, Alejandro Macedo Alcantar, Ana P. Chango Cañola,
Maribel Manzo Garrido, Diana I. Guerrero Campos, Hamilton G. Mosquera Toscano, Jessica M.
Muro Hidalgo, Jessica Martínez Miguel, Fernanda A. Rivera Lima, Luis F. Piñon Flores, Rafael
E. Antonio Duran, Yrany M. Rubio Gómez, Daimy Ávila Rodríguez, Guadalupe I. Lara Carvajal,
Andrea M. Diaz Vázquez, Amelia Jiménez Alcantar, por todo el apoyo y motivación brindada en
todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución llena de conocimiento, deporte, arte y cultura.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Por el apoyo económico otorgado durante el estudio de la Maestría, bajo el CVU No. 1062423.

AL PROGRAMA DE APOYO A LOS ESTUDIOS DE POSGRADO

Por el apoyo económico otorgado para participar en el congreso internacional de la VIII Convención Iberoamericana Sobre Ambiente y Sustentabilidad.

AL TUTOR PRINCIPAL

El Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, por todo el apoyo y confianza otorgada durante la Maestría, por compartir sus conocimientos y experiencias en el campo profesional y por las sugerencias, recomendaciones y observaciones para la realización de este trabajo de investigación.

AL COMITÉ TUTORAL:

Al M.C. Vicente Fuentes Gea y al Dr. Armando Aguilar Márquez por sus observaciones, sugerencias y correcciones las cuales ayudaron a enriquecer este trabajo de investigación.

AL JURADO AMPLIADO:

Al Dr. Enrique César Valdez y al Dr. Gilberto Fuentes García por la revisión y asesoría de este trabajo de investigación.

AL GRUPO RESPONSABLE DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO:

Al M.I. José Hernández Téllez, al Lic. Humberto E. Bravo Witt, al I.Q. Armando Retama Hernández, al Dr. Víctor O. Magaña Rueda, al I.I. Gustavo Vázquez Cruz, por el manejo y verificación de la operación de la estación de monitoreo, así como, de la verificación de la información de calidad del aire y meteorológica.

A LA ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL DE VERACRUZ

Al Arq. Francisco Liaño Carrera, al Arq. Jorge Baños Illana, al Ing. David Augusto de la O Nava y al Ing. Sokaris de la Luz Aranda, por la información y el proyecto de colaboración entre UNAM-APIVER “Evaluación de la calidad del aire, depósitos atmosféricos y meteorología para desarrollar el programa de prevención, minimización del posible deterioro ambiental significativo en el Recinto Portuario de Veracruz y en las zonas de interés”.

A PETRA S.A. DE C.V.

Y al I.E. José Isaac Ramírez M., por la organización y apoyo durante las visitas al área de estudio.

A LA SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL:

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, al Dr. Gilberto Fuentes García, al Biol. Pablo Sánchez Álvarez, a la M.I. Ana Alarcón Jiménez, al Dr. Elías Granados Hernández, a la Dra. Elizabeth Vega Rangel, al M.I. Rafael Esteban Antonio Duran, a la M.I. Daimy Ávila Rodríguez, a la M.I. Guadalupe I. Lara Carvajal, a la I.N. Andrea Mariana Diaz Vázquez, a la I.AM. Yrany Mayerling Rubio Gómez, a la I.Q. Amelia Jiménez Alcántara, al M.I. Luis Miguel Urbina Leonor, al pasante en I.M. Alejandro de David Palacios Ibarra, por su apoyo y consejo durante el estudio de la Maestría.

A MIS PROFESORES:

A la Dra. Georgina Fernández Villagómez, a la Dra. Ana Elisa Silva Martínez, al Dr. Eduardo Vega González, al Dr. Daniel de los Cobos Vasconcelos, al Dr. Enrique César Valdez, a la M.I. Alba Beatriz Vázquez Gonzales, al M.C. Vicente Fuentes Gea, al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, a la Dra. Elizabeth Vega Rangel, al Dr. Luis Antonio García Villanueva, al Dr. Víctor Almanza Veloz y al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, por darme confianza y enseñanza en esta etapa.

ÍNDICE

ÍNDICE	IV
ABREVIATURAS, ACRÓNIMO Y SIGLAS	XI
RESUMEN	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 HIPÓTESIS	4
1.4 OBJETIVOS	4
1.5 ALCANCES	5
1.6 LIMITACIONES	5
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	6
2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	7
2.1.1 CALIDAD DEL AIRE	7
2.1.2 CALIDAD DEL AIRE EN PUERTOS	8
2.1.2.1 PUERTO VERDE	11
2.1.2.2 CONVENIO MARPOL	11
2.2 DIÓXIDO DE AZUFRE	13
2.2.1 CARACTERÍSTICAS	13
2.2.2 FUENTES DE EMISIÓN	13
2.2.3 IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE	14
2.2.4 NORMATIVIDAD MEXICANA E INTERNACIONAL	15
2.2.5 MÉTODOS DE MONITOREO	16
2.3 PARTÍCULAS	18
2.3.1 CARACTERÍSTICAS	18
2.3.2 FUENTES DE EMISIÓN	18
2.3.3 IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE	19
2.3.4 NORMATIVIDAD MEXICANA E INTERNACIONAL	20
2.3.5 MÉTODOS DE MONITOREO	21
2.4 RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ	22
2.4.1 UBICACIÓN Y LÍMITES	22
2.4.2 CLIMA	24

2.4.3 CARACTERÍSTICAS Y ACTIVIDADES	25
2.4.4 PROYECTO DE AMPLIACIÓN	27
2.4.4.1 OTROS PUERTOS EN AMPLIACIÓN	28
2.4.4.2 ESTACIÓN DE MONITOREO	30
2.5 INVENTARIO DE EMISIONES	36
2.5.1 FACTORES DE EMISIÓN	36
2.5.2 AP-42 COMPILACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN ATMOSFÉRICOS	36
2.5.3 INVENTARIOS DE EMISIONES EN EL RPV	38
2.5.4 ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES	40
2.6 ÍNDICES ESPECTRALES	44
2.6.1 CORRECCIONES DE IMÁGENES SATELITALES	46
2.6.2 ÍNDICE DEL SUELO DESCUBIERTO (BSI)	47
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	48
3.1 METODOLOGÍA	49
3.2 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR BUQUES	50
3.2.1 METODOLOGÍA US EPA	51
3.2.1.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	53
3.2.1.2 FACTORES DE EMISIÓN	55
3.2.2 METODOLOGÍA EEA/EMEP	59
3.2.2.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	60
3.2.2.2 FACTORES DE EMISIÓN	61
3.3 ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN	63
3.3.1 EMISIONES POR ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN	63
3.3.1.1 FACTOR DE EMISIÓN	63
3.3.2 EMISIONES POR ACTIVIDADES DE DRAGADO	64
3.3.2.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	66
3.3.2.2 FACTORES DE EMISIÓN	66
3.4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DEL SUELO DESCUBIERTO	67
3.5 MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF	71
3.5.1 SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO	73
3.5.2 PREPROCESAMIENTO	75
3.5.2.1 WRF-ARW	75
3.5.2.2 CALWRF	77
3.5.2.3 CALMET	77
3.5.4 PROCESAMIENTO	81
3.5.4.1 CALPUFF	81
3.5.5 POSTPROCESAMIENTO	84

CAPÍTULO 4. RESULTADOS	85
4.1 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA	86
4.1.1 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA	86
4.1.2 PARTÍCULAS MENORES A 10 Y 2.5 MICRÓMETROS	87
4.1.3 DIÓXIDO DE AZUFRE	93
4.1.4 METEOROLOGÍA	96
4.2 INVENTARIO DE EMISIONES	98
4.2.1 INVENTARIO DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES	98
4.2.2 INVENTARIO DE EMISIONES POR ACTIVIDAD DE DRAGADO	108
4.3 CASOS DE ESTUDIO	112
4.3.1 SIMULACIONES DE LOS CASOS DE ESTUDIO	112
4.3.2 INFLUENCIA DE LA METEOROLOGÍA EN LOS CASOS DE ESTUDIO	126
4.4 VARIABILIDAD DEL MODELO	129
4.5 ZONAS SENSIBLES POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	133
4.6 ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL	135
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	140
5.1 CONCLUSIONES	141
5.2 RECOMENDACIONES	143
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS	144
6.1 REFERENCIAS	145
CAPÍTULO 7. ANEXOS	161
ANEXO 1: EMISIONES DIARIAS DE CN, CH₄ Y N₂O POR MOVIMIENTO DE BUQUES	162
ANEXO 2. SIMULACIONES DE CASOS DE ESTUDIO	163
ANEXO 3: LOCALIDADES DEL MUNICIPIO DE VERACRUZ Y BOCA DEL RIO	175

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FUENTES DE EMISIÓN DE SO _x	14
FIGURA 2. FUENTES DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS	19
FIGURA 3. UBICACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ	23
FIGURA 4. CLASIFICACIÓN KÖPPEN DEL CLIMA EN MÉXICO	24
FIGURA 5. SISTEMA PORTUARIO NACIONAL	26
FIGURA 6. PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ	28
FIGURA 7. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO	31
FIGURA 8. ESTACIÓN DE MONITOREO; A) EXTERIOR, B) INTERIOR	33
FIGURA 9. ANALIZADOR TELEDYNE API-T100	34
FIGURA 10. ANALIZADOR MET ONE BAM-1020	35
FIGURA 11. ESTACIÓN DE MONITOREO METEOROLÓGICA	35
FIGURA 12. ÍNDICE DE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADA (NDVI)	44
FIGURA 13. METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL RPV	49
FIGURA 14. ÍNDICE BSI PARA EL RPV (2 ^{DO} SEMESTRE 2017)	69
FIGURA 15. ÍNDICE BSI PARA EL RPV (2018-2020)	70
FIGURA 16. COMPONENTES Y PROCESADORES DE CALPUFF	71
FIGURA 17. COMPONENTES DEL VIENTO PROVENIENTES DE LA ZONA DE AMPLIACIÓN DEL RPV	74
FIGURA 18. CONFIGURACIÓN UTILIZADA DE DOMINIOS ANIDADOS	76
FIGURA 19. USO DE SUELO EN VERACRUZ	78
FIGURA 20. ELEVACIÓN DEL TERRENO EN VERACRUZ	78
FIGURA 21. MALLA DE SIMULACIÓN PARA LOS CASOS DE ESTUDIO	79
FIGURA 22. DIRECCIÓN PROMEDIO DEL VIENTO (03-11-2017)	80
FIGURA 23. TEMPERATURA PROMEDIO DEL AIRE AMBIENTE (03-11-2017)	80
FIGURA 24. ANILLOS RECEPTORES PARA LOS CASOS DE ESTUDIO	83
FIGURA 25. FUENTES DE EMISIÓN EN LA ZONA DE AMPLIACIÓN DEL RPV	84
FIGURA 26. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DIARIO DE PARTÍCULAS	87
FIGURA 27. DENSIDAD DE KERNEL PARA SUPERACIONES PROMEDIO DIARIA DE PARTÍCULAS; A) PM ₁₀ , B) PM _{2.5}	89
FIGURA 28. ROSA DE CONTAMINANTE PARA PARTÍCULAS; A) PM ₁₀ (H), B) PM ₁₀ (D), C) PM _{2.5} (H), D) PM _{2.5} (D)	91
FIGURA 29. VARIACIÓN TEMPORAL DE LAS PARTÍCULAS CON DATOS HORARIOS (2017-2020)	92
FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DIARIO DE SO ₂	93
FIGURA 31. ROSA DE CONTAMINANTE PARA SO ₂ CON DATOS HORARIOS (2017-2020)	94
FIGURA 32. VARIACIÓN TEMPORAL DEL SO ₂ CON DATOS HORARIOS (2017-2020)	95
FIGURA 33. VARIABILIDAD TEMPORAL DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EN EL RPV	96

FIGURA 34. ROSA DEL VIENTO MENSUAL EN EL RPV (2017-2020)	97
FIGURA 35. EMISIONES ATMOSFÉRICAS; A) SO₂, B) PM₁₀, C) PM_{2.5}, D) NO_x, E) HC, F) COV, G) CO Y H) CO₂	102
FIGURA 36. POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES PROMEDIO ANUAL PARA EL RPV	103
FIGURA 37. INVENTARIO DE EMISIONES POR TIPO DE BUQUE Y MODO DE OPERACIÓN EN EL RPV	107
FIGURA 38. INVENTARIO DE EMISIONES POR ACTIVIDADES DIARIA DE DRAGADO EN LA ZONA DE AMPLIACIÓN	109
FIGURA 39. EMISIONES ATMOSFÉRICAS POR DRAGADO; A) SO₂ Y B) PM₁₀	110
FIGURA 40. MAPA DE ACTIVIDAD ACUMULADA POR DRAGADO EN LA ZONA DE AMPLIACIÓN	111
FIGURA 41. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 05-10-2017	114
FIGURA 42. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 05-10-2017	115
FIGURA 43. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 17-10-2017	116
FIGURA 44. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 17-10-2017	117
FIGURA 45. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 03-11-2019	118
FIGURA 46. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 03-11-2019	119
FIGURA 47. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 11-12-2019	120
FIGURA 48. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 11-12-2019	121
FIGURA 49. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 12-01-2020	122
FIGURA 50. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 12-01-2020	123
FIGURA 51. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 26-09-2020	124
FIGURA 52. SERIE DE TIEMPO DE CONTAMINANTES PARA CASO DE ESTUDIO DE 26-09-2020	125
FIGURA 53. MATRIZ DE CORRELACIÓN; A) DATOS HORARIOS, B) CASOS DE ESTUDIO	126
FIGURA 54. DISTRIBUCIÓN DE LA PM₁₀ EN FUNCIÓN DE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO	128
FIGURA 55. CAPA LÍMITE Y CONCENTRACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO; A) PARTÍCULAS, B) SO₂	128
FIGURA 56. TEMPERATURA (A) Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA (B) PROMEDIO DIARIO DE LOS CASOS DE ESTUDIO	130
FIGURA 57. ZONAS SENSIBLES POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA; A) PM₁₀, B) PM_{2.5}	134
FIGURA 58. PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL RPV ESPERADO AL 2030	136
FIGURA 59. EMISIONES ATMOSFÉRICAS; A) CN, B) CH₄ Y C) N₂O	162
FIGURA 60. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 01-10-2017	163
FIGURA 61. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 18-10-2017	164
FIGURA 62. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 24-10-2017	165
FIGURA 63. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 25-10-2017	166
FIGURA 64. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀ (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 13-11-2017	167
FIGURA 65. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM₁₀; A) 07-12-2017, B) 08-12-2017	168
FIGURA 66. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 09-11-2019	169
FIGURA 67. DISPERSIÓN PROMEDIO DIARIO DE PM_{2.5} (A) Y SO₂ (B) CASO DE ESTUDIO DE 22-12-2019	170

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ACTUALIZACIONES DEL CONVENIO MARPOL	12
TABLA 2. ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE PARA SO₂ EN PPB	15
TABLA 3. ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE PARA PARTÍCULAS EN μG/M³	20
TABLA 4. PUERTOS NACIONALES E INTERNACIONALES EN AMPLIACIÓN	29
TABLA 5. COMPILACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN: FUENTES ESTACIONARIAS Y DE ÁREA	37
TABLA 6. TRABAJOS REALIZADOS EN EL RPV QUE INCLUYEN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	38
TABLA 7. TIPO DE BUQUES IDENTIFICADOS DENTRO DEL RPV	42
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE PROPULSIÓN POR SU DESPLAZAMIENTO DEL CILINDRO	51
TABLA 9. TIPO DE MOTOR DE PROPULSIÓN DE ACUERDO CON SU VELOCIDAD	51
TABLA 10. CLASIFICACIÓN DE LOS SUBTIPOS DE BUQUES DE ACUERDO CON SU TAMAÑO DE ENVÍO	52
TABLA 11. PROMEDIO DE LA POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTOR Y CALDERA	54
TABLA 12. FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x EN BUQUES	55
TABLA 13. TASA DEL CONSUMO ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE (SFC)	55
TABLA 14. FACTORES DE EMISIÓN DE PM₁₀ PARA MOTORES ST Y GT	56
TABLA 15. FACTORES DE EMISIÓN DE HC Y CO	58
TABLA 16. FACTORES DE EMISIÓN DE N₂O	58
TABLA 17. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR EN FUNCIÓN DEL GT	60
TABLA 18. FACTORES DE EMISIÓN DE NO_x, NMCOV Y PST (G/KWH)	61
TABLA 19. FACTORES DE EMISIÓN PARA BUQUES QUE UTILIZAN BFO, MDO Y MGO	62
TABLA 20. VELOCIDAD PROMEDIO EN TRÁNSITO Y TIEMPOS DE MANIOBRA Y ESTADÍA	62
TABLA 21. FACTOR DE CARGA DE CAPACIDAD MÁXIMA CONTINUA (MCR) DE LOS MOTORES	62
TABLA 22. CLASIFICACIÓN DE MOTORES C1 Y C2	66
TABLA 23. POTENCIA TOTAL PROMEDIO INSTALADA POR TIPO DE DRAGA (KW)	66
TABLA 24. FACTORES DE EMISIÓN PROMEDIO POR NIVEL DE MOTOR (G/KWH)	67
TABLA 25. BANDAS ESPECTRALES DEL SATÉLITE LANDSAT 8	68
TABLA 26. ACCESO A LA INFORMACIÓN	74
TABLA 27. CASOS DE ESTUDIO PARA SU SIMULACIÓN	75
TABLA 28. CONFIGURACIÓN UTILIZADA EN EL WRF	77
TABLA 29. CONFIGURACIÓN DE LA MALLA PARA LA SIMULACIÓN	79
TABLA 30. DATOS DE LAS FUENTES DE EMISIÓN PARA LA SIMULACIÓN	81
TABLA 31. UBICACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN IDENTIFICADAS	81
TABLA 32. ALTURA Y DIÁMETRO DE LOS TUBOS DE GASES DE ESCAPE DE BUQUES (M)	82

TABLA 33. TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE LOS GASES DE ESCAPE EN BUQUES	82
TABLA 34. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA MEDICIONES DE SO₂ Y PARTÍCULAS	87
TABLA 35. REGISTRO MENSUAL POR TIPO DE BUQUE EN EL RPV DE 2019 A 2020	98
TABLA 36. FACTORES DE EMISIÓN CALCULADOS MEDIANTE LA EEA/EMEP Y LA US EPA	99
TABLA 37. SFC PARA MOTORES SSD Y MSD	100
TABLA 38. INVENTARIO DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES EEA/EMEP (MG/MES)	105
TABLA 39. INVENTARIO DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES US EPA (MG/MES)	106
TABLA 40. INVENTARIO DE EMISIONES POR BAHÍA EN EL RPV (MG/AÑO)	107
TABLA 41. FACTORES DE EMISIÓN PARA LA DRAGA	109
TABLA 42. INVENTARIO DE EMISIONES POR ACTIVIDAD DE DRAGADO (MG/MES)	111
TABLA 43. CASOS DE ESTUDIO PARA SU ANÁLISIS	112
TABLA 44. CONCENTRACIONES DE SALIDA DE CALPUFF PARA LOS CASOS ESTUDIO	129
TABLA 45. RESULTADOS DE LA PRUEBA T DE STUDENT PARA LOS CASOS DE ESTUDIO	131
TABLA 46. RESULTADOS PRUEBA T DE STUDENT CASOS ESTUDIO 2019 Y 2020	132
TABLA 47. MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	137
TABLA 48. LOCALIDADES DEL MUNICIPIO DE VERACRUZ Y BOCA DEL RIO	175

ABREVIATURAS, ACRÓNIMO Y SIGLAS

APIVER: Administración Portuaria Integral de Veracruz

ASIPONA-VER: Administración del Sistema Portuario Nacional de Veracruz

BFO: Aceite Pesado

BSI: Índice del Suelo Descubierta

C₆H₆: Benceno

CA: Caldera

CAAAC: Comité Asesor de la Ley de Aire Limpio

CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera

CH₂O: Formaldehído

CH₄: Metano

CIMARES: Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas

CIP: Comisión Interamericana de Puertos

CN: Carbón Negro

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

DOF: Diario Oficial de la Federación

DWT: Tonelaje de Peso Muerto

ECA: Áreas de Control de Emisiones

EEA: Agencia Ambiental Europea

EM: Estación de Monitoreo

EMEP: Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación

ESPO: Organización Europea de Puertos Marítimos

FE: Factor de Emisión

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GT: Tonelaje Bruto

Gt: Gas Turbina

H₂SO₄: Ácido Sulfúrico

HC: Hidrocarburos

HFO: Combustible Pesado

HSD: Motor Diésel de Alta Velocidad

ICAyCC: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

IMO: Organización Marítima Internacional

LLAF: Factor de Ajuste de Carga

MA: Motor Auxiliar

MCR: Capacidad Máxima Continua

MDO: Diésel Marino

MGO: Gasóleo Marino

MIA: Manifestación de Impacto Ambiental

MP: Motor Principal

MSD: Motor Diésel de Velocidad Media

MSTRS: Subcomité de Revisión Técnica de Fuentes Móviles

N₂O: Óxido Nitroso

NaCl: Cloruro de Sodio

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

NGFA: Fundación Nacional de Granos y Alimentos

NH₄⁺: Amonio

NMCOV: Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano

NO₂: Dióxido de Nitrógeno

NO₃-: Nitratos

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

O₃: Ozono

OMS: Organización Mundial de la Salud

PM₁₀: Partículas Iguales o Menores a 10 Micrómetros
PM_{2.5}: Partículas Iguales o Menores a 2.5 Micrómetros
PM₃₀: Partículas Iguales o Menores a 30 Micrómetros
PMDPV: Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz
PST: Partículas Suspendidas Totales
RM: Combustible Residual Marino
RPV: Recinto Portuario de Veracruz
SALUD: Secretaría de Salud
SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transporte
SDI: Secretaría de Desarrollo Institucional
SEMAR: Secretaría de Marina
SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SFC: Consumo Específico del Combustible
SO₂: Dióxido de Azufre
SO₃: Trióxido de Azufre
SO₄²⁻: Sulfatos
SO_x: Óxidos de Azufre
SSD: Motor Diésel de Baja Velocidad
ST: Turbina de Vapor
TEU: Unidad Equivalente a Veinte Pies
UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México
US EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos
UTM: Sistema de Coordenadas Transversal de Mercator

RESUMEN

La actividad marítima en México se ha incrementado en los últimos años, principalmente en la zona del Golfo de México produciendo emisiones atmosféricas debido al aumento en las actividades portuarias, por lo que, es necesario identificar sus niveles. A partir del 2014 y hasta el 2030, el Recinto Portuario de Veracruz (RPV) se encontrará en vías de desarrollo indicando que su ampliación será el triple del original (311,569 m²), por consiguiente, este trabajo de investigación contribuyó con la identificación de las fuentes de emisiones durante su primera etapa de construcción de 2014 a 2020. Se determinó la calidad del aire considerando el registro de dióxido de azufre (SO₂) y partículas, además, de parámetros meteorológicos de una estación de monitoreo ubicada estratégicamente en el interior del recinto portuario.

Se encontró que la concentración de SO₂ fue de 0.70 ppb promedio horario de tres años consecutivos y de 0.71 ppb promedio diario respecto al límite normado (NOM-022-SSA1-2019) de 7.5 ppb y 40 ppb respectivamente, indicando una calidad del aire satisfactoria. Por otro lado, para las partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) se encontró que en 57 días se rebasó la concentración promedio diaria, y anual en 2018 y 2019 de acuerdo con la normatividad mexicana vigente (NOM-025-SSA1-2021) de 70 y 36 µg/m³ respectivamente. En el caso de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) se llegó a rebasar en 13 días el promedio diario, así como el anual en 2020 de acuerdo con los límites de la NOM-025-SSA1-2021. Sin embargo, debido a que el monitoreo de la calidad del aire se realizó en el interior del RPV, es necesario extender el monitoreo a la zona urbana para analizar las concentraciones a las que la población está expuesta.

Por otro lado, se observaron diferencias entre las metodologías (EEA/EMEP y US EPA) utilizadas para el inventario de emisiones por movimiento de buques, obteniendo los valores más altos con la metodología de la EEA/EMEP. La principal diferencia identificada entre las metodologías utilizadas fue el cálculo de la potencia de funcionamiento del motor principal y auxiliar, seguido de los motores utilizados durante los diferentes modos de operación en puerto.

A raíz de las simulaciones realizadas mediante el modelo de dispersión CALPUFF, se logró identificar las zonas sensibles de contaminación de la calidad del aire por partículas en el interior y exterior del RPV a causa de las actividades de construcción y de terreno ganado al mar en la zona de ampliación.

ABSTRACT

Maritime activity in Mexico has increased in recent years, mainly in the Gulf of Mexico area, producing atmospheric emissions due to the increase in port activities, so it is necessary to identify their levels. From 2014 to 2030, the Veracruz Port Area (RPV) will be in development, indicating that its expansion will be threefold the original (311,569 m²), therefore, this research work contributed to the identification of the sources of emissions during its first stage of construction from 2014 to 2020. Air quality was determined considering the record of sulfur dioxide (SO₂) and particulate matter (PM), in addition to meteorological parameters from a monitoring station strategically located inside the port area.

It was found that the concentration of SO₂ was 0.70 ppb hourly average for three consecutive years and 0.71 ppb daily average concerning the normative limit (NOM-022-SSA1-2019) of 7.5 ppb and 40 ppb respectively, indicating satisfactory air quality. On the other hand, for particles smaller than 10 micrometers (PM₁₀) it was found that in 57 days the average daily concentration was exceeded, and annuals in 2018 and 2019 by following current Mexican regulations (NOM-025-SSA1-2021) of 70 and 36 µg/m³ respectively. In the case of particles smaller than 2.5 micrometers (PM_{2.5}), the daily average was exceeded in 13 days, as well as the annual average in 2020 by following the limits established in the NOM-025-SSA1-2021. However, since the air quality monitoring was carried out inside the RPV, it is necessary to extend the monitoring to the urban area to analyze the concentrations to which the population is exposed.

On the other hand, differences were observed between the methodologies (EEA/EMEP and US EPA) used for the inventory of emissions from the movement of ships, obtaining the highest values with the EEA/EMEP methodology. The main difference identified between the methodologies used was the calculation of the operating power of the main and auxiliary engines, followed by the engines used during the different port operation modes.

As a result of the simulations carried out using the CALPUFF dispersion model, it was possible to identify the sensitive areas of air quality contamination by particles inside and outside the RPV due to construction activities and land reclaimed from the sea in the expansion area.

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

CONTENIDO:

1.1 INTRODUCCIÓN

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.3 HIPÓTESIS

1.4 OBJETIVOS

1.5 ALCANCES

1.6 LIMITACIONES

1.1 INTRODUCCIÓN

A través de los años, la tierra ha resistido cambios debido a la intervención humana y de fenómenos naturales. La contaminación ambiental es hoy un problema muy grave en México y debe ser combatida con todas las herramientas necesarias para que el país se desarrolle de manera sustentable. Uno de los medios afectados se relaciona con la atmósfera, principalmente por las emisiones de contaminantes de diversas fuentes. El aire es un recurso importante para los humanos y muchas otras especies que viven en la Tierra, pero este medio se ve contaminado debido a actividades antropogénicas y naturales, afectando principalmente la salud humana.

México cuenta con acceso al océano Pacífico y al Atlántico a través del Golfo de México, por lo tanto, a lo largo del territorio se encuentran más de cien puertos y terminales donde se desarrollan actividades enfocadas al comercio internacional marítimo. En años recientes, la actividad marítima del país se ha incrementado principalmente en la zona del Golfo de México generando emisiones atmosféricas debido a las actividades portuarias. Debido al aumento de emisiones, las ciudades costeras están prestando mayor atención a las emisiones atmosféricas originadas por sus puertos y los impactos potenciales al ambiente que estos generan.

El transporte marítimo es ampliamente reconocido como el más ecológico en términos de emisiones por carga-tonelaje, sin embargo, la parte abrumadora del comercio mundial y el aumento del tráfico portuario hacen de un buque el contribuyente clave de las emisiones antropogénicas dentro de las actividades de operación de los puertos. Las principales emisiones a la atmósfera por actividades portuarias corresponden a gases de efecto invernadero (GEI), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), partículas e hidrocarburos (HC).

Hoy en día, el puerto de Veracruz es el más antiguo e históricamente más importante que además está experimentando una ampliación que lo convertiría en el más grande de toda Latinoamérica al término del proyecto en 2030. El Recinto Portuario de Veracruz (RPV) al igual que otros puertos, son generadores de contaminantes atmosféricos debido a sus actividades de operación que van desde la combustión de combustibles fósiles, almacenamiento de granel agrícola, chatarra, vehículos, fluidos, combustibles, actividades de mantenimiento, etc., provocando emisiones que afectan de manera negativa la calidad del aire del sitio.

En 2014 el RPV inició su proceso de ampliación, el cual será el triple que el original puerto con la finalidad de atender la demanda de transporte marítimo del país. Debido a las dimensiones, actividades del proyecto y al aumento en las emisiones portuarias de la zona, este trabajo de investigación contribuye con la identificación de las emisiones durante la primera etapa de construcción desarrollada de 2014 a 2020, así como, al monitoreo de la calidad del aire y variables meteorológicas del sitio.

Se evaluó la calidad del aire al interior del RPV, consecuencia de las actividades desarrolladas en la ampliación considerando los datos de monitoreo de calidad del aire, meteorología, inventario de emisiones y simulación de casos de estudio seleccionados. Se realizó el inventario de emisiones con los datos del movimiento diario de buques registrados de 2019 a 2020, mientras que las emisiones diarias por actividad de dragado se hicieron de agosto a diciembre de 2017. Considerando los datos de emisión diaria de los buques, dragado y actividades de construcción se generaron simulaciones de la dispersión de los contaminantes, identificando aquellas zonas sensibles por contaminación atmosférica en el interior del RPV y localidades aledañas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La ampliación del RPV es uno de los proyectos más grandes y ambiciosos del país en las últimas décadas. Como todo plan de desarrollo tendrá un beneficio socioeconómico, tanto a nivel local como nacional. Sin embargo, un aspecto negativo si no se atiende adecuadamente durante su desarrollo es la contaminación ambiental. Debido a las dimensiones y características del RPV, en los últimos años se ha desarrollado una línea de investigación en calidad del aire, así como, de los niveles de emisión por las actividades portuarias. Resultados de los estudios realizados por los maestros en ingeniería Antonio R.E.D. y Zamora E.V., han manifestado que el RPV tiene problemas de contaminación atmosférica debido a las partículas, sin embargo, no se han identificado las principales fuentes de emisión del contaminante, por lo que se han atribuido a las actividades de construcción en la zona de ampliación. A causa de los resultados reportados, este estudio tiene la finalidad de identificar si las fuentes de emisión provienen de la zona de ampliación, para así evaluar en tiempo real la calidad del aire a través de los contaminantes atmosféricos como dióxido de azufre (SO₂) y partículas juntamente con las condiciones meteorológicas del lugar.

1.3 HIPÓTESIS

El evaluar conjuntamente las concentraciones de dióxido de azufre, partículas y las condiciones meteorológicas, permitirá identificar las potenciales fuentes de contaminación atmosférica en el sitio de estudio, así como establecer las estrategias de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica en el Recinto Portuario de Veracruz.

1.4 OBJETIVOS

General:

- Evaluar el impacto en la calidad del aire por la ampliación del Recinto Portuario de Veracruz mediante el monitoreo de dióxido de azufre y partículas, y su interacción con parámetros meteorológicos permitiendo su comparación con las normas oficiales mexicanas de calidad del aire.

Específicos:

- Caracterizar la zona de estudio respecto a las potenciales fuentes de emisiones atmosféricas en el espacio-tiempo permitiendo la actualización del inventario de emisiones ASIPONA-VER 2017-2019.
- Aplicar el método *bottom-up* para la estimación de emisiones atmosféricas debido al movimiento de buques en sus diferentes modos de operación en la Bahía Sur y Bahía Norte considerando la información oficial de ASIPONA-VER.
- Comparar las mediciones de calidad del aire mediante el modelo de dispersión CALPUFF, identificando aquellas zonas sensibles por contaminación atmosférica al interior y exterior del RPV.
- Evaluar el impacto potencial en la calidad del aire debido a las operaciones marítimas y de construcción en la Bahía Norte considerando la información del monitoreo de dióxido de azufre, partículas, parámetros meteorológicos y simulación.

- Proponer estrategias de prevención, minimización y control de contaminación atmosférica seleccionando aquellas que sean viables para el Recinto Portuario de Veracruz.

1.5 ALCANCES

- Evaluar conjuntamente concentraciones de dióxido de azufre y partículas, ya que existen trabajos de investigación independientes por los maestros en ingeniería Zamora E.V y Antonio R.E.D., respectivamente.
- Actualizar el inventario de emisiones atmosféricas debido a las operaciones de buques en la Bahía Norte y Bahía Sur del Recinto Portuario de Veracruz.
- Conocer el nivel de emisión de contaminantes atmosféricos considerando los factores de emisión de la US EPA y de la EEA/EMEP para las diferentes actividades de operación y construcción del RPV de 2019 a 2020.
- Identificar las zonas sensibles por la contaminación atmosférica causados por el dióxido de azufre y partículas mediante el modelo de dispersión CALPUFF.
- Integrar el monitoreo de calidad del aire y su simulación, para proponer estrategias de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica en la zona de estudio.

1.6 LIMITACIONES

- No se pudieron identificar todas las fuentes de emisión en el RPV, debido a la confidencialidad de la información.
- Poca información sobre el nivel de azufre en el combustible, tipo de combustible utilizado y altura de chimeneas de las embarcaciones, lo que dificultó este trabajo de investigación.

CAPÍTULO

2

ANTECEDENTES

CONTENIDO:

2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2.2 DIÓXIDO DE AZUFRE

2.3 PARTÍCULAS

2.4 RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ

2.5 INVENTARIOS DE EMISIONES

2.6 ÍNDICES ESPECTRALES

2.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2.1.1 CALIDAD DEL AIRE

Una buena calidad del aire se puede definir como el conjunto de componentes presentes en la atmósfera los cuales no causan daños a la salud, la población, equilibrio ecológico o materiales con valor económico (Romero et al., 2006). Por otro lado, una mala calidad del aire se puede definir como la situación en la cual las concentraciones de los compuestos presentes en la atmósfera superan la normatividad vigente causando efectos nocivos en las personas, vegetación, animales o materiales. La manera que los contaminantes se emiten a la atmósfera puede clasificarse de muchas maneras, por ejemplo, su origen (fuentes naturales y antropogénicas), mecanismos de formación (primarios y secundarios), estado físico (gases, sólidos y líquidos) y/ composición química (orgánicos e inorgánicos).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) dentro de sus directrices propone medir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire tales como: partículas, ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Por otro lado, en México la Secretaría de Salud (SALUD) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se coordinan para evaluar la calidad del aire en el aire ambiente midiendo la concentración de los contaminantes recomendados por la OMS, además de el monóxido de carbono (CO) y el plomo (Pb) (SEGOB, 2020a, 2020b).

La calidad del aire es importante porque representa un riesgo ambiental para la salud, tanto en los países desarrollados como en los subdesarrollados. Las estimaciones de la OMS en 2016 proyectaron 4.2 millones de muertes por año en ciudades y zonas rurales alrededor del mundo. Esta mortalidad se debe en general a las exposiciones de los contaminantes al aire ambiente, provocando enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Las últimas estimaciones de morbilidad reflejan la relación entre la contaminación atmosférica con el riesgo de enfermedades cardiovasculares en zonas altamente contaminadas, principalmente en regiones de Asia Sudoriental y el Pacífico Oriental (OMS, 2021). De acuerdo con la OMS, el 58 % de las muertes en 2016 se produjeron por accidentes cerebrovasculares, el 18 % por enfermedad pulmonar obstructiva e infecciones respiratorias agudas y el 6 % se debió a cáncer de pulmón.

No obstante, no todas las muertes estimadas se pueden atribuir a la contaminación en el aire ambiente ya que existe un factor de riesgo al cual se le puede atribuir, por ejemplo, el consumo del tabaco.

2.1.2 CALIDAD DEL AIRE EN PUERTOS

Los puertos marítimos han sido durante mucho tiempo la puerta de entrada para el comercio mundial y son fundamentales para las economías del mundo. Son centros de actividad económica; pero esta frenética actividad tiene un aspecto poco explorado “la contaminación del aire que generan los buques durante sus operaciones”. Los puertos también son fuentes importantes de emisiones por vehículos, polvo y ruido. Los puertos suelen estar cerca de áreas urbanas densamente pobladas, lo que puede significar exponer a millones de habitantes a una contaminación adicional. A medida que las agencias ambientales buscan mejorar la calidad del aire, la contaminación del aire de los barcos y puertos estimula las medidas de control.

Los puertos reciben cantidades masivas de mercancías cada año a través de carga de buques. Además, cada año aumenta el comercio internacional, la globalización y el crecimiento empresarial, lo que lleva a más buques, más combustible y más puertos. Ciudades portuarias como la de la Bahía de San Pedro, Los Ángeles, California., están experimentando un aumento en el tráfico marítimo interno a medida que los buques traen más cargamento. Estudios de Moretti & Neidell (2011) y Mousavi et al. (2018) demuestran que las emisiones liberadas por el tráfico interior de los puertos de Los Ángeles y de Long Beach están afectando de manera negativa la salud ambiental, marina y humana en la bahía de San Pedro, así como las de la ciudad de Los Ángeles.

Es importante reconocer que los puertos por sí solos no causan toda la contaminación del aire, ya que las actividades que los rodean son la causa principal: incluidos el transporte marítimo, las carreteras concurridas y la actividad industrial. En cuanto al transporte marítimo, los buques utilizan un combustible diferente al combustible de gasolina que se utiliza para los vehículos terrestres. El contenido de azufre del combustible utilizado por buques es 2,700 veces mayor que el combustible usado en carretera (Transport & Environment, 2012). Los buques, por lo tanto, emiten contaminantes tóxicos como el dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO_x), partículas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) (Lonati et al., 2010).

Estas emisiones causan un problema importante para la calidad del aire de los puertos cuando hay una intensa congestión portuaria. La intensa congestión portuaria significa que los buques pueden esperar anclados fuera de un puerto hasta dos semanas antes de atracar (Lonati et al., 2010). Cuanto más tiempo esperen fondeados los buques, más emisiones de combustible y contaminantes liberarán, por lo tanto, la contaminación portuaria y marítima están muy entrelazadas. Incluso las ciudades costeras que no están necesariamente cerca de un puerto se ven afectadas por las emisiones de los buques (SINAY, 2021).

El transporte marítimo internacional crea hasta el 4 % de los niveles de CO₂ emitidos en el mundo y consume el 3 % del consumo mundial total de energía (Soares et al., 2021). En general, los puertos y las operaciones de transporte marítimo provocan contaminación y contaminantes nocivos que conducen a importantes problemas de salud humana y marina. La principal fuente de SO₂ en los puertos proviene de las actividades de los buques (Agrawal et al., 2008; Corbett et al., 2007; Murena et al., 2018; Song, 2014; Toscano et al., 2021). Sin embargo, la relación entre la cantidad de buques y la contaminación no es lineal. Los buques afectan la calidad del aire de los puertos y las comunidades costeras dependiendo de varios factores, no solo de la cantidad de barcos. La contaminación de los barcos depende de parámetros ambientales, como el viento, la temperatura y la precipitación, y el tipo de buque.

Los puertos están adoptando sistemas de monitoreo de la calidad del aire para tener información en tiempo real sobre la calidad del aire actual de su puerto y sus alrededores. Con los sistemas de monitoreo ambiental, las autoridades portuarias pueden monitorear los impactos en la calidad del aire en tiempo real y, a su vez, ayudar a las comunidades circundantes. Para mejorar la calidad del aire, los puertos necesitan conocer la causa de la contaminación. Una vez que se identifica la fuente, los puertos pueden desarrollar una estrategia para reducir la contaminación. Por ejemplo, el Puerto de Los Ángeles utiliza cuatro estaciones de monitoreo del aire que les brindan mediciones en tiempo real de contaminantes clave (Fu et al., 2017).

Reducir la contaminación del aire de los buques y los puertos es una prioridad para muchos gobiernos, sin embargo, puede generar costos significativos y, a menudo, un desafío político. Entonces, el primer paso es cuantificar el problema y comprender completamente el tipo y las fuentes de contaminación. Para hacer eso, se debe poner en marcha un programa de monitoreo de la calidad del aire.

El monitoreo de la calidad del aire en tiempo real en las áreas que rodean directamente las operaciones portuarias es la forma más efectiva de estudiar el impacto de las emisiones relacionadas con el puerto. Al proporcionar datos continuos en tiempo real, una red de estaciones de monitoreo de la calidad del aire puede ser útil para determinar qué días experimentan niveles elevados de contaminación generada por el puerto. Los datos de contaminación también se pueden combinar con parámetros meteorológicos para ayudar a identificar a los más afectados por las operaciones portuarias y explicar por qué algunos sitios de monitoreo experimentan días con mejor o peor calidad del aire (Mousavi et al., 2018). Esto permite que las autoridades portuarias realicen un seguimiento de las tendencias históricas de la contaminación del aire, cuantificar los efectos de las emisiones relacionadas con los puertos y proporcionar un punto de referencia para medir la eficacia de las medidas de reducción de la contaminación. También permite a las autoridades gubernamentales comparar la calidad del aire local con los estándares de calidad del aire estatales o nacionales.

Descarbonizar y mejorar la calidad del aire en los puertos es una tarea urgente. Una de las tendencias que está surgiendo con fuerza es la “Puerto Verde”. Su objetivo es reducir el impacto ambiental sobre la atmósfera, los recursos marinos, la biodiversidad y las áreas habitadas más cercanas. Una métrica clave en estos portales de sustentabilidad es el monitoreo continuo de la atmósfera en tiempo real. El uso de medidores de calidad del aire permite a las autoridades portuarias:

- Detección de la presencia de puntos de acceso
- Configurar alertas para niveles altos de contaminación
- Implementación de medidas basadas en información real de contaminación

Sin duda, una de las decisiones más importantes es la entrada en vigor de la nueva normativa sobre emisiones de SO_x , impuesta a través del convenio MARPOL y adoptada por la Organización Marítima Internacional (OMI). Sin embargo, la respuesta de muchas compañías navieras ha sido instalar scrubbers o lavadores de gases. Alternativa que les permite seguir comprando el mismo combustible, pero con menores emisiones de azufre.

2.1.2.1 PUERTO VERDE

“Puerto Verde” es una certificación que se les otorga a los puertos que cumplen con aspectos ambientales de alta calidad y que implementa medidas de mejora y control a la contaminación del aire, agua, suelo y residuos (Antonio, 2019; Zamora, 2019). La certificación es otorgada por la Organización Europea de Puertos Marítimos (ESPO), por sus siglas inglés. Esta certificación es reconocida por la entidad certificadora de Lloyd’s, sistema de gestión ambiental para el sector portuario internacional. De acuerdo con el último informe de puertos verdes de Ecoports/ESPO en el 2021, México cuenta con cinco puertos con esta certificación siendo el primero del país y segundo en Latinoamérica (después de Santa Martha en Colombia) el puerto de Ensenada. Los otros puertos verdes en México son: Dos Bocas, Lázaro Cárdenas, Veracruz y Puerto Vallarta, siendo el puerto de Vallarta el último en certificarse.

La SCT y la Comisión Interamericana de Puertos (CIP) en el 2021, se plantearon el objetivo de certificar los 16 puertos federales de México al término del actual sexenio (2018-2024), lo cual consiste en otras palabras en la reducción de emisiones a la atmósfera, así como renovar la certificación ISO 14001 de gestión ambiental. Con estas certificaciones, los puertos demuestran su compromiso con el ambiente, logrando un manejo sustentable en sus operaciones.

Otra certificación en la que se ha trabajado es de “Marca de Calidad”, esta certificación la emite la Autoridad Portuaria de Barcelona. La Marca de calidad es una herramienta que permite una mejora continua en los servicios que ofrece el puerto, ofreciendo mejores tiempos y seguridad en los traslados de mercancía. El objetivo de esta certificación por el RPV es el posicionamiento nacional e internacional como un puerto competitivo con los mejores estándares de calidad en el manejo de mercancía (ASIPONA-VER, 2021). En noviembre del 2021, el RPV obtuvo la recertificación de “Marca de Calidad” con una vigencia hasta noviembre del 2023.

2.1.2.2 CONVENIO MARPOL

El convenio MARPOL, es un acuerdo internacional para prevenir accidentes de embarcaciones. Dicho convenio fue adoptado en 1973 por la Organización Marítima Internacional (IMO), por sus siglas en inglés (IMO, 2020a). A lo largo de los años, el convenio MARPOL ha introducido nuevas enmiendas (Anexo I-VI, del convenio) por lo que ha sufrido diversas actualizaciones. Estas actualizaciones se describen a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Actualizaciones del convenio MARPOL

Anexo	Título	En vigor desde
Anexo I	“Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos”	2 de octubre de 1983
Anexo II	“Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel”	2 de octubre de 1983
Anexo III	“Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos”	1 de julio de 1992
Anexo IV	“Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques”	27 de septiembre de 2003
Anexo V	“Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques”	31 de diciembre de 1988
Anexo VI	“Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”	19 de mayo de 2005

El anexo VI de mencionado convenio y de mayor interés en este tema de investigación menciona lo siguiente:

“Se establecen los límites de las emisiones de óxido de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono. Para las áreas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de SO_x, NO_x y partículas. En un capítulo adoptado en 2011 se establecen medidas técnicas y operacionales obligatorias de eficiencia energética encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques” (IMO, 2020, pp.33).

México actualmente tiene obligaciones de los Anexos I, II y V del convenio, dichas obligaciones entraron en vigor el 20 de diciembre de 1991 de acuerdo al Diario Oficial de la Federación (DOF) del 28 de enero de 1992 (Garza, 2019).

Hoy en día México no ha realizado la ratificación del Anexo VI, el cual considera el establecimiento de una Áreas de Control de Emisiones (ECA) por sus siglas en inglés. No obstante, en la XI sesión ordinaria de la Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas (CIMARES) en el 2019, se abordó el proceso de adhesión de ECA en aguas marinas nacionales (SEMARNAT, 2019).

La implementación de ECA contribuiría a mejorar la salud humana y reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos, los cuales contribuyen al cambio climático.

2.2 DIÓXIDO DE AZUFRE

2.2.1 CARACTERÍSTICAS

El dióxido de azufre (SO_2) es un gas denso, incoloro, tóxico y no inflamable, compuesto por un átomo de azufre unido a dos átomos de oxígeno. Es un gas ácido y corrosivo que reacciona fácilmente con otras sustancias para formar compuestos nocivos como ácido sulfúrico, ácido sulfuroso y partículas sulfatadas. El SO_x se encuentra de forma natural en el aire ambiente a muy bajas concentraciones, alrededor del 99 % del SO_2 es emitido a la atmósfera mediante las actividades antropogénicas (Rígido, 2020). El tiempo de vida del SO_2 en la atmósfera es relativamente corto (25 horas) debido a que reacciona con otros compuestos (Cuesta-Mosquera et al., 2018). En la atmósfera puede reaccionar para formar trióxido de azufre (SO_3), que a la vez se disuelve rápidamente con el vapor de agua, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) que se condensa en las nubes y acidifica la lluvia. Dentro de sus características se destaca que se puede adherir a las partículas de polvo o el hollín.

2.2.2 FUENTES DE EMISIÓN

Los altos niveles de SO_2 con frecuencia se encuentran en zonas industriales o en ciudades densamente pobladas. Los SO_x se liberan de forma natural durante las erupciones volcánicas, pero específicamente el SO_2 se libera al quemar combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, el diésel o cualquier otro compuesto que contenga azufre. (Figura 1). La mayor fuente de SO_2 es la quema de combustibles en las centrales eléctricas y otras zonas industriales como la minería, metalurgia, refinación de petróleo, plantas de celulosa y emisiones de vehículos, barcos y locomotoras que utilizan combustibles que contienen azufre.

Los vehículos y equipos que usan combustibles con alto contenido de azufre han sido últimamente regulados, no obstante, se debe mantener una mejora significativa en las emisiones de los sectores industriales, centrales eléctricas y refinerías.

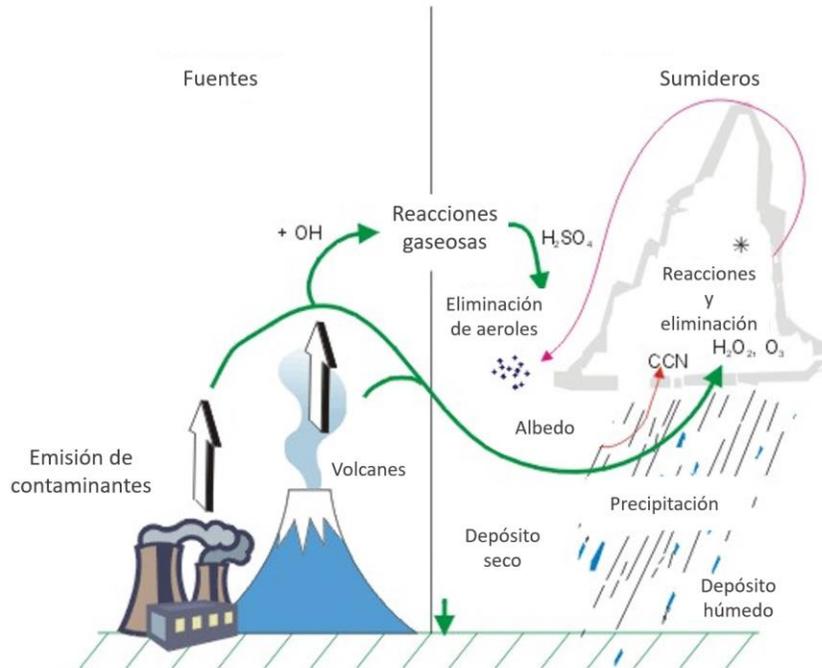


Figura 1. Fuentes de emisión de SO_x
Referencia: (Rígido, 2020)

2.2.3 IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE

Debido a que el SO_2 es soluble en medios acuosos, cuando se inhala, puede afectar las membranas mucosas de la nariz y el sistema respiratorio. La repercusión del SO_2 en el sistema respiratorio también pueden provocar tos y secreción de mucosidad, exacerbación del asma y un mayor riesgo de enfermedades respiratorias inflamatorias (OMS, 2021). Las exposiciones más extensas pueden provocar afecciones cardíacas y causar irritación ocular (OMS, 2021; Rígido, 2020).

El SO_2 se combina en el aire ambiente con vapor de agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) uno de los principales compuestos de la lluvia ácida, causando daños a los árboles y plantas en el follaje y limitar su crecimiento. La lluvia ácida también puede afectar a los medios acuáticos como arroyos y lagos volviéndose ácidos provocándose tóxicos para la vida acuática. También afecta la composición del suelo influyendo en su calidad y fertilidad (CeMCAQ, 2017; Rígido, 2020). La deposición de partículas sulfurosas en conjunto con la lluvia ácida afecta las piedras y otros materiales de importancia cultural y monumentos arqueológicos, además las partículas sulfatadas contribuyen a la formación del smog reduciendo la visibilidad en el ambiente.

2.2.4 NORMATIVIDAD MEXICANA E INTERNACIONAL

Las estrategias exitosas para mejorar la calidad del aire ambiental generalmente utilizan un enfoque dual. Por un lado, los estándares de emisión establecen límites máximos para las emisiones atmosféricas de un proceso de un país o región en su conjunto, por otro lado, los estándares de calidad del aire ambiente establecen un punto de referencia para lo que se considera una calidad del aire aceptable (De Leeuw et al., 2016). A nivel nacional y regional se dedican esfuerzos considerables en establecer estándares de calidad del aire ambiente para los contaminantes seleccionados, teniendo como objetivo general la protección de las personas. Aunque la protección a la salud es el factor común a nivel mundial, las normas establecidas por varios países u organismos internacionales pueden mostrar una amplia gama en el nivel de umbral de exposición, período promedio y número de superaciones permitidas. Las diferencias dificultan una comparación directa de estándares, por ejemplo, dos estándares de calidad tienen un nivel de umbral de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero uno se define como el percentil 98 de la concentración diaria promediada y el otro como una concentración máxima diaria de 8 horas (De Leeuw et al., 2016).

El nivel de umbral similar sugiere que los estándares son equivalentes, pero debido a las diferencias en el tiempo promedio y el indicador estadístico no se puede decir de antemano qué estándar brinda la mejor protección para la salud humana o los ecosistemas. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los diferentes estándares de calidad del aire por SO_2 de México y de otros países/organizaciones del mundo.

Tabla 2. Estándares de calidad del aire para SO_2 en ppb

País	Hora	Día	Año	Días máximos permitidos al año	Referencia
México	-	40	75	0	(DOF, 2019)
Australia	200	80	20	1	(De Leeuw et al., 2016)
China	187	56	22	0	
India	-	30	18	0	
N. Zelanda	181	-	-	9	
Estados Unidos	75	-	-	0	
Unión Europea	181	46	-	3	
OMS	-	7.5	-	0	(OMS, 2021)

1 ppb = $2.6637 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a condiciones estándar (25°C y 1 atm)

2.2.5 MÉTODOS DE MONITOREO

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) por sus siglas en inglés, existen seis métodos generales de medición aprobados y certificados los cuales se enlistan a continuación con algunos ejemplos:

- Métodos de referencia:
 - Método de West & Gaeke
 - Método de peróxido de hidrógeno
 - Método de pararrosanilina
- Métodos equivalentes:
 - Método fotométrico
 - Método potenciométrico
- Método colorimétrico:
 - Método de Stratman
- Método yodo-dimétrico:
 - Método yodo-trisulfato de sodio
- Método cumulativo:
 - Método de tiras de papel de peróxido de plomo
- Método aire ionizado

El método de referencia (método analítico desarrollado en laboratorio) se basa en un examen de características sistémicas tales como: sensibilidad, especificidad, estabilidad de reactivos y productos. Las principales interferencias del método de referencia y equivalente son los óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y metales pesados. La principal ventaja de este método son resultados muy precisos de la medición, además, es relativamente económico y sencillo. El método de referencia es uno de los más utilizados en el mundo, aunque requiere procedimientos largos para analizar los resultados.

Por otro lado, el método equivalente (método automático o instrumental) se aplica a la medición en instrumentos con un análisis continuo. Los parámetros importantes en el método equivalente son: las velocidades de reacción, coeficiente de temperatura, desviación del instrumento, regulación de flujo o presión y mantenimiento del instrumento. Las ventajas de este método es su sensibilidad para medir concentraciones muy bajas, su rentabilidad y fácil uso hacen de este método el más utilizado en el mundo de acuerdo con Rígido en el 2020. Los métodos equivalentes más comunes son los fotométricos (fluorescencia ultravioleta) y potenciométricos (semiconductores y electroquímicos) cuyas características se muestran a continuación.

Fluorescencia ultravioleta: El monitor de SO_2 que trabaja con fluorescencia UV se basa en la emisión de una fluorescencia característica cuando las moléculas de SO_2 son irradiadas con luz UV. Cuando la muestra de aire tomada por el monitor de SO_2 se expone al haz de radiación UV en la región de 190-230 nm, el gas SO_2 presente en la muestra se excita por la absorción de esta luz emitiendo una radiación de fluorescencia característica de 320-380 nm cuando regresan a su estado fundamental, que pasa a través de un filtro que solo deja pasar la radiación a esta longitud de onda particular y es registrada por el detector (tubo fotomultiplicador). Cuanto mayor sea la concentración de SO_2 en la muestra de aire, mayor será la fluorescencia.

Semiconductores: Cuando un monitor de SO_2 basado en semiconductores de óxido de metal se expone a una muestra de aire, las moléculas de dióxido de azufre reaccionan en la superficie de óxido de metal del sensor y se disocian en iones cargados que alteran la resistencia de la película. Esta interacción se mide como una señal y se convierte en la concentración de gas correspondiente. Sin embargo, en comparación con otros monitores de SO_2 , el consumo de energía de dichos monitores de óxidos de azufre es mayor.

Electroquímico: Los monitores de SO_2 que funcionan según el principio electroquímico se basan en la difusión de gas de dióxido de azufre en el sensor respectivo, lo que da como resultado la producción de señales eléctricas proporcionales a la concentración de SO_2 . Permite la medición precisa incluso de concentraciones bajas de SO_x , lo cual es esencial en el monitoreo de SO_2 para el aire ambiente.

2.3 PARTÍCULAS

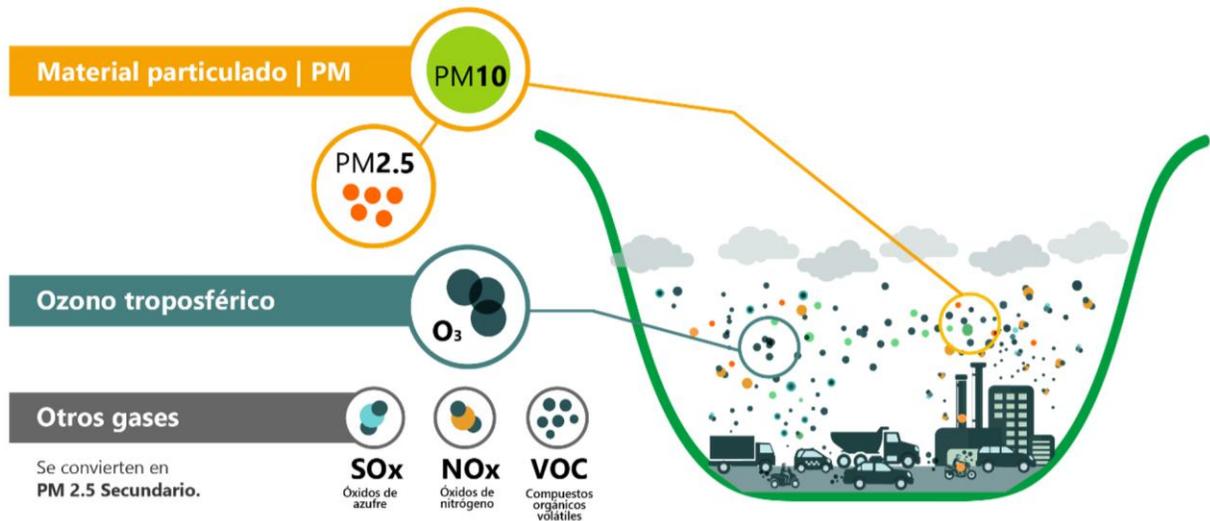
2.3.1 CARACTERÍSTICAS

Las partículas, son una mezcla compleja de elementos sólidos y líquidos que se encuentran en el aire y su composición química muestra una mayor complejidad (Suárez et al., 2017). Las partículas pueden clasificarse según su tamaño aerodinámico: partículas suspendidas totales (PST), PM_{10} y $PM_{2.5}$. Las PST tienen un diámetro aerodinámico $< 100 \mu m$, PM_{10} con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu m$ y $PM_{2.5}$ con un diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu m$. Las partículas suelen tener formas irregulares y diferentes densidades, por lo que se acuñó el término de diámetro aerodinámico para proporcionar una clasificación simple e independiente de la forma y la densidad. Este concepto se refiere a una partícula esférica con una densidad de 1 g/cm^3 que tiene las mismas propiedades de inercia y sedimentación determinadas por la US EPA.

Las partículas es el indicador más común de la contaminación en el aire ambiente, los principales compuestos son los nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), amonio (NH_4^+), cloruro de sodio (NaCl), polvo mineral, carbono elemental y vapor de agua.

2.3.2 FUENTES DE EMISIÓN

Las partículas se emiten directamente desde una fuente o se forman a través de reacciones químicas de gases como los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Las fuentes naturales de partículas son el polvo arrastrado por el viento de forma abierta (erosión eólica del suelo), polen, esporas, moho e incendios forestales (Karmakar, 2020; Rígido, 2020). Mientras tanto, las fuentes antropogénicas de las partículas se deben a las actividades de quema de combustibles fósiles, quema de residuos, resuspensión de polvos en carreteras pavimentadas y sin pavimentar, trituración de rocas, polvo de fábricas cementeras, agricultura, vertederos, procesos industriales, generación de energía, carga y descarga de granel, gases de escape de vehículos y por último las actividades de construcción no controladas (Figura 2).



*Figura 2. Fuentes de emisión de partículas
Referencia: (CeMCAQ, 2017)*

2.3.3 IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE

Las partículas pueden entrar y depositarse principalmente en los pulmones, aunque las $PM_{2.5}$ son las más dañinas para la salud humana. Las $PM_{2.5}$ pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en contacto con el sistema sanguíneo, lo que provoca enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón (OMS, 2021). La correlación cuantitativa entre la exposición a las partículas y el aumento de la mortalidad y morbilidad es ampliamente estudiada debido a los daños a la salud ya mencionados. La contaminación por partículas lleva a efectos a la salud incluso en concentraciones bajas, incluso, aún no se ha identificado algún umbral mínimo el cual no se observen agravio a la salud humana (OMS, 2021). Cuando se inhala las PM_{10} estas se depositan en los pulmones causando inflamación pulmonar agravando enfermedades como el asma.

Las exposiciones a $PM_{2.5}$ en periodos largos (años) pueden causar problemas permanentes como la bronquitis, asma, enfermedades cardíacas y reducir el desarrollo de los pulmones en niños (Karmakar, 2020). En los últimos años a las $PM_{2.5}$ se le ha relacionado con el aumento de las muertes debido al coronavirus COVID-19, estudios de la Universidad de Harvard han afirmado que un aumento de tan solo $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ corresponde a un 8 % más de muertes por COVID-19 (OMS, 2021).

Los impactos ambientales por partículas principalmente son la reducción de la visibilidad, la disposición y el smog. Además, las partículas pueden causar afectaciones nocivas a los ecosistemas acuáticos como por ejemplo su claridad y calidad. Los compuestos metálicos y orgánicos en las partículas reducen el desarrollo y productividad de las plantas. En la atmósfera las partículas afectan tanto el calentamiento como el enfriamiento de esta, esto debido a que los compuestos como el carbono negro calientan la atmósfera, mientras que los NO_3^- y SO_4^{2-} la enfrían (Karmakar, 2020).

2.3.4 NORMATIVIDAD MEXICANA E INTERNACIONAL

A nivel nacional y regional se dedican esfuerzos considerables en establecer estándares de calidad del aire ambiente para las partículas teniendo como objetivo general la protección de la salud humana (Rioja & Zúñiga, 2017). Estas estrategias de calidad del aire ambiental generalmente utilizan un enfoque dual al igual que las utilizadas para el SO_2 . Por un lado, los estándares de emisión que establecen límites máximos para las emisiones atmosféricas de un proceso de un país o región en su conjunto y por otro lado los estándares de calidad del aire ambiente establecen un punto de referencia para lo que se considera una calidad del aire aceptable (De Leeuw et al., 2016). A continuación, en la Tabla 3 se muestran los diferentes estándares de calidad del aire para partículas en México y de otros países/organizaciones del mundo.

Tabla 3. Estándares de calidad del aire para partículas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

País	Día		Año		Días máximos permitidos al año	Referencia
	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$		
México	70	41	36	10	0	(DOF, 2021)
Australia	50	-	-	-	5	(De Leeuw et al., 2016)
China	150	70	70	35	0	
India	100	60	60	40	0	
N. Zelanda	50	-	-	-	1	
Estados Unidos	150	35	-	12	1	
Unión Europea	50	-	40	25	35	
OMS	45	15	15	5	0	(OMS, 2021)

Nota: concentraciones a condiciones estándar (1 atm y 25 °C)

2.3.5 MÉTODOS DE MONITOREO

De acuerdo con la US EPA, existen dos métodos generales certificados y aprobados para la determinación de partículas en el ambiente los cuales se enlistan a continuación:

- Método de referencia:
 - Método gravimétrico
- Métodos equivalentes:
 - Método de atenuación beta
 - Método de microbalanza oscilante de elementos cónicos
 - Método de dispersión láser

Los métodos para medir las partículas se basan en general en realizar un análisis a través de sus diámetros aerodinámicos equivalentes. Esta propiedad refleja las esferas de un tamaño igual o menor al determinado por el equipo que tamiza mediante orificios (Noble et al., 2001). El método de referencia tiene la capacidad de medir PM₃₀, PM₁₀ y PM_{2.5} por las dimensiones aerodinámicas de estas. Sin embargo, para las partículas más pequeñas ≤ 2.5 micrómetros se tiende a utilizar otros métodos más complejos como los equivalentes. Los métodos más utilizados alrededor del mundo son los equivalentes debido a que las partículas más finas (≤ 2.5 micrómetros) son las que tienen mayores efectos sobre la salud humana (Cromtek, 2020). Los diferentes principios de los métodos de medición se muestran a continuación:

Método gravimétrico de alto volumen: Los monitores partículas basados en el principio gravimétrico toman el aire ambiente durante 24 horas a un caudal constante a través de una entrada de tamaño selectivo que solo permite el paso de partículas con un diámetro aerodinámico de 10 μm o menos. Asimismo, la recolección del material particulado es sobre un filtro pre pesado en condiciones constantes de temperatura y humedad. Luego, después del período de muestreo de 24 horas, el filtro se vuelve a acondicionar en las mismas situaciones de temperatura y humedad y se vuelve a pesar. Por lo tanto, la diferencia en el peso corresponde a la masa recolectada en el filtro, que, junto con el caudal conocido, el período de muestreo y el volumen total del aire muestreado se usa para calcular la concentración de partículas.

Microbalanza oscilante de elementos cónicos (TOEM): Es un sistema ideal para el monitoreo de partículas, los monitores de PM₁₀ basados en TOEM determinan la concentración de partículas mediante el pesaje continuo de las partículas depositadas en el filtro unido a un elemento cónico hueco que oscila en un campo eléctrico aplicado. Además, la frecuencia de oscilación disminuye con la acumulación de partículas en los filtros. Como resultado, los controladores térmicos de flujo de masa controlan y miden constantemente el caudal del monitor de partículas que, junto con la concentración de masa, la temperatura y otros factores, se usa para calcular continuamente las concentraciones de partículas.

Monitor de atenuación beta (BAM): El monitoreo de partículas basado en el principio BAM mide la densidad de masa de las partículas utilizando la atenuación de la radiación beta, las partículas en el aire ambiente que ingresan al monitor de partículas, se depositan en un filtro de banda de papel y se exponen a los rayos beta (es decir, electrones con energías en el intervalo de 0.01 a 0.1 MeV) que se atenúan en función de la masa de las partículas. Como resultado, el recuento beta se reduce con un aumento en la masa de partículas y el detector lo registra y lo convierte en concentración.

Dispersión láser (OPC): El monitor partículas basado en el principio físico de la dispersión de la luz, también conocido como Contador Óptico de Partículas (OPC), mide las partículas de polvo iluminadas por luz láser en un ángulo de 90°. Mientras que la luz dispersada por cada partícula es recogida a aproximadamente 90° por un espejo y detectada por un fotodiodo. Luego, esta señal se alimenta a un clasificador de tamaño multicanal donde se usa un analizador de altura de pulso para clasificar cada pulso que es proporcional al tamaño de la partícula. Como resultado, los conteos en el canal correspondientes a la concentración de partículas.

2.4 RECINTO PORTUARIO DE VERACRUZ

2.4.1 UBICACIÓN Y LÍMITES

El Recinto Portuario de Veracruz (RPV) se encuentra aproximadamente a 400 km de la Ciudad de México, ubicado en la zona centro del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, con coordenadas 19.208419° N y 96.145798° O (800126.4, 2126349 UTM) y una altura de 10 metros sobre el nivel del mar (Figura 3).

El RPV limita al norte con el municipio de La Antigua y el Golfo de México; al sur con el municipio de Boca del Río y Medellín; al este con el Golfo de México; al oeste con el municipio de Manlio Fabio Altamirano y Paso de Ovejas (SEMAR, 2016). El RPV cuenta con una superficie de almacenamiento operativo de 601,359.6 m², que incluye: canales de acceso, zonas de maniobra, concesionarias, agentes aduanales, transportistas, instituciones y terminales para los diferentes tipos de mercancías (APIVER, 2016). Además, debido a las actividades que desarrolla el RPV se encuentra clasificado como “puerto de altura” (puerto que recibe embarcaciones con grandes cantidades de carga internacional), no obstante, igual desarrolla actividades de cabotaje (recibe embarcaciones de otros puertos nacionales). El RPV posee más de 60 servicios marítimos que cubren puertos en Norteamérica, Sudamérica, Europa y Asia (Díaz, 2020).

Actualmente el recinto ofrece servicios de inspección marítima, supervisión de mercancía exterior, mantenimiento y reparación de embarcaciones y equipo ferroviario, carga y descarga de mercancía en general, lanchaje y remolcaje (SCT, 2015, 2017; SEGOB, 2021).



Figura 3. Ubicación del Recinto Portuario de Veracruz

2.4.3 CARACTERÍSTICAS Y ACTIVIDADES

México tiene acceso al océano pacífico y atlántico (mediante el Golfo de México), por lo tanto, alrededor del territorio nacional se encuentra un total de 102 puertos y 15 terminales (Figura 5) donde se desarrollan actividades enfocadas al comercio nacional e internacional (SCT, 2017; Zamora, 2019). El RPV cuenta con una infraestructura que se divide en diversas etapas de construcción desde el momento de origen y ahora de expansión.

El RPV es el puerto comercial de mayor importancia del país debido a que es el único que manipula 100 % carga comercial en los sectores más importantes a nivel nacional tales como: transporte de contenedores, carga general, carga agrícola, graneles minerales, automóviles, combustibles y productos químicos (APIVER, 2018, 2019). Los tipos de carga que maneja el RPV se describen a continuación:

Carga contenerizada: Carga transportada mediante contenedores de diferentes tamaños y características. La carga contenerizada principalmente contiene autopartes, cerveza, papel, químicos, plásticos, alimentos percederos, café, medicamentos, madera, vinos, etc.

Carga en general: Igual conocida como carga suelta contiene productos como tubos, acero (laminas, vigas, etc.), maquinaria, azúcar, fertilizantes, etc.

Granel agrícola y mineral: La carga agrícola incluye maíz, trigo, soja, sorgo, arroz, semilla de canola, cebada, malta, azúcar, etc. Esta carga opera bajo equipos de succión y bandas transportadoras. La carga mineral está compuesta por fertilizantes, petcoke, chatarra, arrabio de fierro, briqueta de fierro, sulfato ferroso, coke-metalúrgico, etc. La carga se opera bajo la utilización de grúas, almejas o pulpos y se trasladan en camiones.

Combustibles: Carga de petrolíferos como el diésel y gasolina en general. Este tipo de carga se opera bajo bombeo por conductos para su almacenamiento en tanques para su posterior distribución en pipas o camiones especializados.

Fluidos: “Carga no petrolera” igual conocida como “química” que incluye principalmente aceites vegetales, alquilbenceno, etilenglicol, ortoxileno, alcohol láurico, acrilato, alcohol isopropílico, tolueno, xileno, acetona, vinil acetato, varsol, exxol, grasa amarilla, aceite lubricante, etc. Este tipo de mercancía se maneja a través de un sistema de bombeo del buque al tanque de almacenamiento a través de tuberías.

Automóviles: Carga que transporta automóviles y otros vehículos como tractocamiones o dragas.



Figura 5. Sistema Portuario Nacional
Referencia: (SCT, 2017)

En el RPV se cuenta con el siguiente equipo y maquinaria: 65 almejas, 9 bandas transportadoras fijas, 1 barredora, 22 básculas, 2 camiones, 53 camionetas, 18 cargadores frontales, 52 grúas de más de 15 toneladas, 41 grúas de menos de 15 toneladas, 5 grúas de pórtico tipo muelle, 33 grúas de patio, 4 grúas Gottwald, 9 lanchas, 158 montacargas, 112 plataformas, 4 remolcadores de 4000 caballos de fuerza, 2 torres móviles, 55 tolvas, 2 trackmovil, 72 tractocamiones, 16 trascabos, 6 tracto ferroviario y 42 spreader (ASIPONA-VER, 2022). Además, entre sus instalaciones el puerto contiene 26 muelles (21 en la bahía sur y 5 en la bahía norte), 23 empresas cesionarias, 31 empresas prestadoras de servicios portuarios, 61 prestadoras de servicios conexos, 18 líneas navieras, 300 agentes aduanales y 2 empresas de servicio ferroviario (ASIPONA-VER, 2022).

2.4.4 PROYECTO DE AMPLIACIÓN

De acuerdo con la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SCT) el proyecto de ampliación del RPV es el más importante de México en los últimos 100 años. El proyecto de ampliación se construirá sobre terrenos ganados al mar con los procedimientos de construcción de más alto nivel de construcción internacional (SDI, 2019). El proyecto de ampliación del RPV comenzó durante el 2013 y de acuerdo con el Programa Nacional de Infraestructura del 2014-2018, se tiene prevista su conclusión en 2030. La ampliación será (una vez a su término) el triple que el actual puerto de Veracruz. El objetivo de este proyecto es cuadruplicar la capacidad de carga comercial de 23 a 95 millones de toneladas anuales, convirtiendo al puerto de Veracruz en el puerto más importante de México y el más grande de toda América Latina. (SCT, 2017; SDI, 2019).

El proyecto de ampliación está dividido en dos etapas de acuerdo con lo establecido en la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) del proyecto y el Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Veracruz (PMDPV) 2016-2021 (Figura 6). La primera etapa se desarrolló del 2014 al 2019 construyéndose el rompeolas poniente, un muelle de 2.8 km de longitud y 5 terminales especializadas. La segunda fase del 2020 al 2030 se estará realizando la construcción del rompeolas oriente de 3.5 km de longitud, además otras 6 terminales especializadas (APIVER, 2016). La MIA del proyecto cuenta con la propuesta de 92 medidas de mitigación, entre las medidas acordadas se encuentra el establecimiento de un programa permanente de monitoreo y seguimiento ambiental del sitio, antes, durante y después de la obra de construcción (Zamora, 2019). Hasta el mes de diciembre del 2021, las actividades que se han realizado y culminado en la primera etapa son las siguientes:

- Preparación del sitio
- Dragado
- Rellenado
- Obras de protección
- Vialidades y accesos
- Instalación de servicios
- Construcción de terminales

El avance del proyecto de ampliación correspondiente a la primera etapa es del 90 % y se estima que se culmine a mediados del 2022 o finales del mismo año.



Figura 6. Proyecto de ampliación del Recinto Portuario de Veracruz

2.4.4.1 OTROS PUERTOS EN AMPLIACIÓN

Los puertos son piezas claves esenciales para el desarrollo de un país. Debido a que representan una puerta de entrada al mundo para enviar y recibir una variedad de bienes, contribuyendo a la riqueza y el comercio en la región de influencia. En la nueva estrategia geológica del comercio marítimo destacan el desarrollo marítimo y la concentración portuaria, así como su relación directa con la agricultura, la industria y la energía. La importancia de los puertos está determinada por una serie de factores. Entre ellos, los más destacables son su ubicación estratégica, el tamaño y la capacidad para recibir el buque, el volumen de carga que se manipula, la maniobrabilidad flexible del manejo de la carga o la política financiera del país en el que se encuentra, etc. (Hsu et al., 2021; Ziran et al., 2022).

México al contar con diferentes tratados de libre comercio, exige que los puertos cuenten con una mayor eficiencia y capacidad de respuesta. Por estas razones, la SCT juntamente con la SEMAR

han considerado necesario ampliar la infraestructura de los puertos mexicanos acorde a los requerimientos de suficiencia y actividad de cada puerto. A continuación, en la Tabla 4 se muestran los proyectos de ampliación en los últimos años de puertos nacionales e internacionales.

Tabla 4. Puertos nacionales e internacionales en ampliación

País	Puerto	Actividades de ampliación	Referencia
México	Tuxpan	Ampliación de instalación portuaria, construcción de 13 tanques de almacenamiento y dragado en áreas de navegación	(SCT, 2020b)
	Mazatlán	Construcción de rompeolas en la isla “Chivos”, construcción de muelle 8 y dragado en el canal de navegación	(ASIPONA-MAZ, 2021)
	Progreso	Dragado en áreas de navegación y construcción de terminales especializadas	(ASIPONA-PRO, 2021a, 2021b)
	Salina cruz	Ampliación del acceso de navegación, construcción de una nuevo muelle y construcción de escollera de 165 m	(API-SALINA CRUZ, 2019)
	Manzanillo	Construcción de una terminal especializada de contenedores, 3 nuevas posiciones de atraque y nuevas áreas de navegación	(SCT, 2020a)
	Coatzacoalcos	Construcción de un muelle, accesos carreteros, ferroviarios, patio ferroviario y actividades de dragado	(PDIT, 2020)
Argentina	Ushuaia	Ampliación de muelle comercial, crucero y porta contenedores	(AGP, 2020)
	Barranqueras	Construcción de cercado perimetral, talleres, pavimentación de zonas de almacenamiento	
	San pedro	Construcción de muelle 11	
	Quequén	Ampliación y mejoramiento de muelles 1 y 2	
	San Nicolás	Ampliación de terminales	
	Rosales	Modernización de terminales	
	Dock Sud	Retirada y construcción de sitios de amarre	
	Reconquista	Modernización y ampliación de muelles	

Tabla 4. Puertos nacionales e internacionales en ampliación (continuación)

España	Playa blanca	Construcción de aparcamiento de más de 270 plazas	(PC, 2022)
	Sagunto	Nueva terminal de contenedores y dragado en canales de navegación	(VALENCIAPORT, 2020)
India	Kollam	Construcción de oficinas aduaneras	(TENDERS, 2019)
Holanda	Rotterdam	Construcción de un nuevo muelle de contenedores y dragado de una nueva zona de fondeo	(INMOLEY, 2021)
Singapur	Singapur	Construcción de terminales especializadas de contenedores	(MPA, 2019)

Los puertos nacionales e internacionales se encuentran vinculados por planes nacionales o regionales de desarrollo. Los ejes y estrategias que siguen cada uno de ellos es diferente, sin embargo, su meta en común se condiciona en ser competentes a nivel mundial durante sus actividades portuarias.

2.4.4.2 ESTACIÓN DE MONITOREO

Como parte del proyecto de ampliación y seguimiento ambiental durante y después de las actividades de construcción, se instaló la estación de monitoreo de calidad del aire. La estación de monitoreo del RPV está ubicada específicamente en la “Bahía de Vergara”, entre la construcción del proyecto de ampliación del RPV (bahía norte) y el original RPV (bahía sur) (Figura 7). La Estación de Monitoreo (EM) fue instalada durante el segundo semestre del 2017 mediante un convenio entre la Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER), hoy Administración del Sistema Portuario Nacional de Veracruz (ASIPONA-VER) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), hoy Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La EM fue instalada conforme a la normatividad mexicana la NOM-156-SEMARNAT-2012; Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de calidad del aire.



Figura 7. Ubicación de la estación de monitoreo

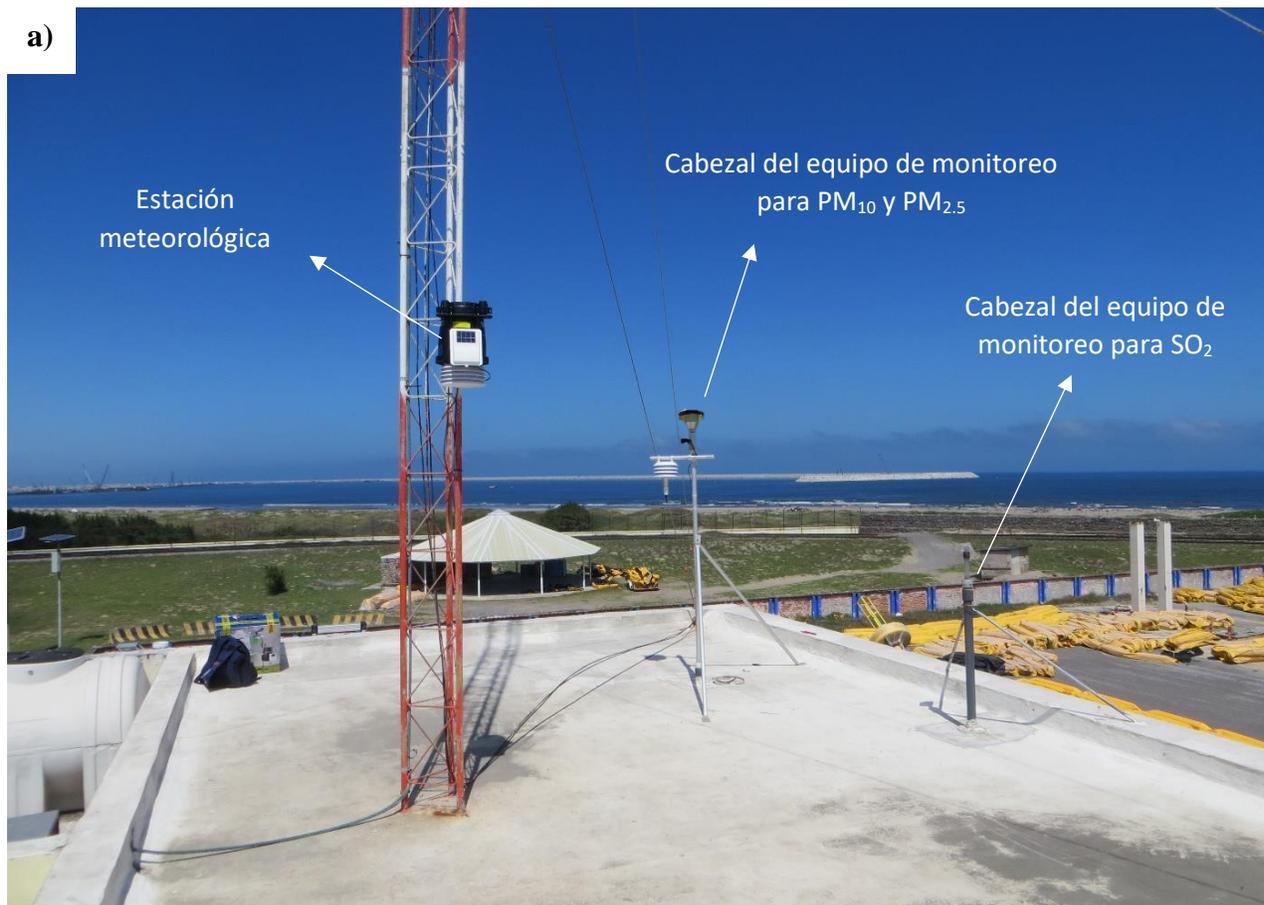
De acuerdo con la normatividad mexicana la NOM-156-SEMARNAT-2012, se determinaron las condiciones mínimas que se deben observar para la etapa de investigación (Zamora, 2019). El objetivo principal de la EM es verificar que no se rebasen los límites máximos permisibles para SO_2 impuestos por la NOM-022-SSA1-2019 y partículas en la NOM-025-SSA1-2021, debido a los efectos causados por las actividades del recinto portuario, así como, la construcción y operación del proyecto de ampliación del RPV. Conjunto al monitoreo de calidad del aire se midieron los siguientes parámetros meteorológicos:

- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Velocidad y dirección del viento
- Radiación solar
- Presión atmosférica
- Precipitación

A causa de los altos costos que representa una estación de monitoreo, se instaló solamente una en el interior del RPV (Figura 7). La ubicación de la EM se estableció de acuerdo con las recomendaciones de la SEMARNAT y la OMS. Además, su ubicación fue seleccionada estratégicamente para la intercepción de las emisiones de la bahía sur (operación del original puerto) y de la bahía norte (zona de ampliación del puerto).

2.2.4.2.1 Equipos de monitoreo

La EM se ubica específicamente en las coordenadas 19.214832° N y -96.161835° O (798427.3, 2127032.5 UTM). En la parte superior de la EM se colocaron los equipos para la medición de parámetros meteorológicos como la temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, además de, los cabezales de los equipos de monitoreo de calidad del aire para partículas y SO_2 (Figura 8-a).



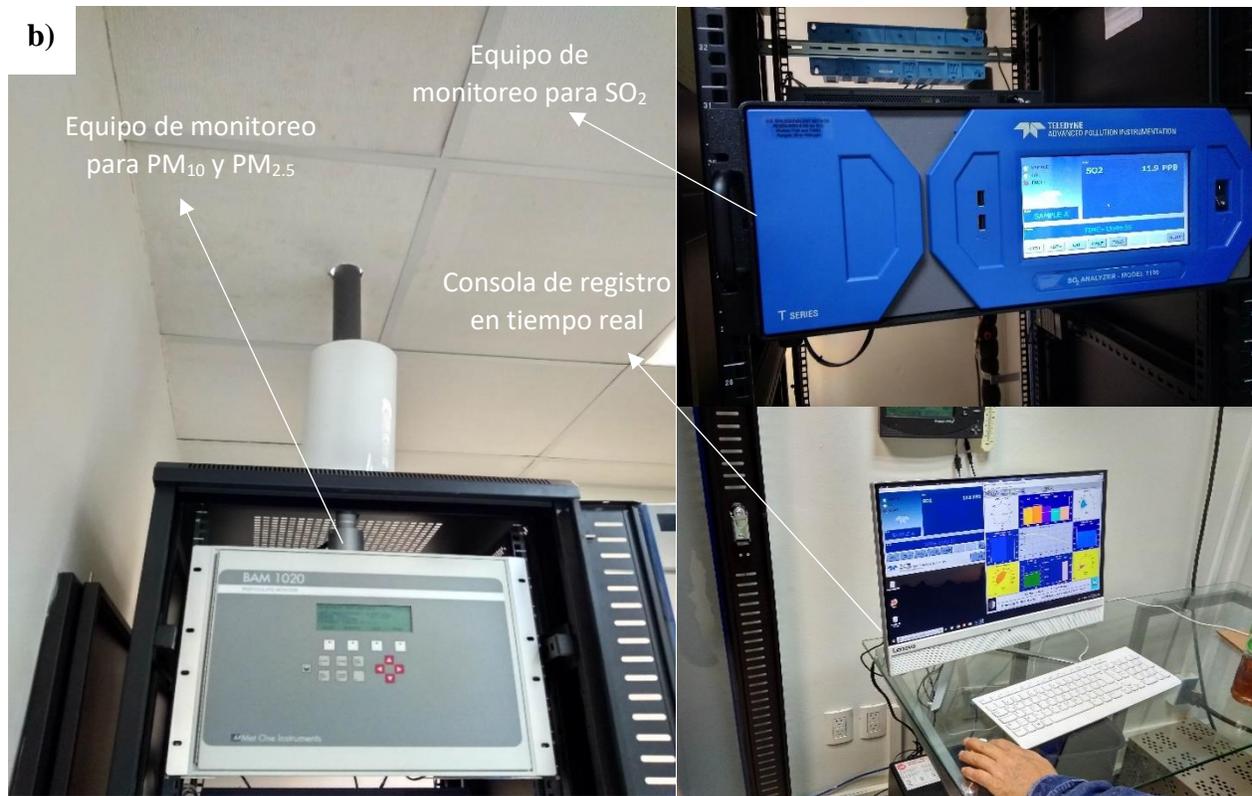


Figura 8. Estación de monitoreo; a) exterior, b) interior

La selección del equipo de monitoreo para la calidad del aire se realizó mediante los criterios y características establecidas en la normatividad mexicana correspondiente a cada contaminante a estudiar. Las características y criterios de cada norma se mencionan a continuación:

Dióxido de azufre (SO₂): La NOM-038-SEMARNAT-1993, establece los métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de azufre en el aire y procedimientos para la calibración del equipo de monitoreo. Esta norma establece la Pararrosanilina como método de referencia y describe el procedimiento para su determinación, el método equivalente aprobado por la US EPA y aprobado por la normatividad mexicana es el de Fluorescencia Ultravioleta (DOF, 1993). El equipo de medición que se utilizó fue un analizador continuo, el cual cumplió con las características definidas por la normatividad. Este equipo es el *Teledyne API-T100 UV Fluorescence Analyzer* (Figura 9).

El equipo determina la concentración de SO₂ a partir de la cuantificación de la emisión de luz, tras ser expuestas a una radiación UV de 214 nm. Tal intensidad proporciona la concentración del compuesto, que se determina mediante la relación de Beer-Lambert (relación de luz absorbida con las propiedades del material atravesado). El sistema de muestreo consistió en un colector de borosilicato conectado al extremo inferior de una trampa de agua y al extremo superior con un tubo de un metro por encima de la estación.



*Figura 9. Analizador Teledyne API-T100
Referencia: (Teledyne, 2020)*

Partículas: Actualmente en México no se cuenta con normativa para la medición de partículas, sin embargo, se considera el método equivalente recomendado por la US EPA de Gravimetría o Atenuación de Radiación Beta (REDMET, 2020).

El equipo que se consideró para la medición fue el equipo *Met One BAM-1020* con una entrada selectiva de 10 μ m y un caudal de 16.67 L/min (Figura 10). Las partículas se muestrean a través de una bomba externa de flujo continuo, la separación de las partículas se produce en el interior del equipo mediante una cinta de material filtrante. La cinta de filtro con las partículas se coloca automáticamente entre la fuente de radiación beta y el detector, provocando así una atenuación, la cual es proporcional a la masa de las partículas depositadas sobre la cinta del filtro. La concentración se determina dividiendo la masa por el volumen de aire muestreado.



*Figura 10. Analizador Met One BAM-1020
Referencia: (Met One Instruments, 2020)*

La instalación de los equipos de monitoreo de calidad del aire los llevó a cabo técnicos especialistas de la empresa distribuidora correspondiente, entre los servicios incluidos se encuentra el soporte técnico y el mantenimiento preventivo para garantizar que los equipos funcionen correctamente.

Estación meteorológica: La estación que se eligió para las mediciones de parámetros meteorológicos fue la *Davis Vantage Weather Station* (Figura 11). La estación se equipó con una amplia gama de sensores como: sensores de temperatura exterior e interior, humedad exterior e interior, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, precipitación y radiación solar. Esta estación tiene la capacidad de determinar los parámetros meteorológicos cada 5-10 min, brindando una alta resolución de los datos en tiempo real.



*Figura 11. Estación de monitoreo meteorológica
Referencia: (DAVIS, 2021)*

2.5 INVENTARIO DE EMISIONES

2.5.1 FACTORES DE EMISIÓN

Los factores de emisión se definen como la relación entre una actividad y la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera que esta genera (EPA, 2015; US EPA, 2020b). Los factores de emisión generalmente se expresan en función del peso del contaminante dividido por su unidad de peso, volumen, distancia y duración de la actividad. Los factores, funcionan como herramientas para elaborar los inventarios de emisiones. Dichos inventarios de emisiones ayudan a la toma de decisiones de gestión de la calidad del aire y al desarrollo de estrategias de prevención, minimización y control de emisiones (US EPA, 2020b). La siguiente expresión (Ecuación 1), se usa generalmente para la estimación de emisiones:

$$E = A \times FE \times \left(\frac{1 - ER}{100} \right) \quad (Ec. 1)$$

Donde:

E= Emisión

A= Tasa de actividad

FE= Factor de emisión

ER= Eficiencia de control de emisiones (%)

2.5.2 AP-42 COMPILACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN ATMOSFÉRICOS

La compilación de factores de emisión de contaminantes atmosféricos (AP-42) fue publicada por primera vez en 1972 por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), por sus siglas en inglés. Esta compilación contiene factores de emisión e información de más de 200 procesos y actividades generadoras de emisiones a la atmósfera.

Los factores de emisión fueron desarrollados a partir de pruebas de origen, estudios de balance de materia y estimaciones. La última edición de AP-42 se publicó en enero de 1995, desde entonces, la US EPA solo ha publicado complementos y/o actualizaciones (US EPA, 2020a). A continuación, en la Tabla 5 se muestran los principales capítulos y anexos que conforman la AP-42.

Tabla 5. *Compilación de factores de emisión: fuentes estacionarias y de área*

Capítulo	Título
Capítulo 1	Fuentes de combustión externa
Capítulo 2	Eliminación de residuos sólidos
Capítulo 3	Fuentes de combustión interna
Capítulo 4	Fuentes de pérdida por evaporación
Capítulo 5	Industria petrolera
Capítulo 6	Industria de procesos químicos
Capítulo 7	Tanques de almacenamiento de líquidos
Capítulo 8	Industria química inorgánica
Capítulo 9	Industria agroalimentaria
Capítulo 10	Industria de productos de madera
Capítulo 11	Industria de productos minerales
Capítulo 12	Industria metalúrgica
Capítulo 13	Fuentes diversas
Capítulo 14	Fuentes biogénicas de gases de efecto invernadero
Capítulo 15	Detonación de artillería
Anexo A	Factores de conversión
Anexo B.1	Distribución de tamaño de partículas y factores de emisión
Anexo B.2	Distribuciones generalizadas del tamaño de partícula
Anexo C.1	Procedimientos para el muestreo de carga de polvo superficial y a granel
Anexo C.2	Procedimientos para el análisis de laboratorio de muestras de partículas

Referencia: (US EPA, 2020b)

Dentro de los capítulos existentes actualmente en el AP-42 no se encuentran los factores de emisión para las actividades de los buques, esto a causa de que en junio de 1998 la US EPA revisara el capítulo 9 “Industria agroalimentaria” y decidiera retirar los factores de emisión propuestos en 1995 para las operaciones de barcazas y buques (NGFA, 2001). La causa de no incluir los factores de emisión por buques en AP-42 se basó en un estudio desarrollado en 1995 por la Fundación Nacional de Granos y Alimentos (NGFA) por sus siglas en inglés, el cual demostró que los niveles de emisión por estas actividades eran sobreestimados (NGFA, 2001).

A partir de los inconvenientes que ha tenido la US EPA en cuanto a los factores de emisión de barcazas y buques, formó un grupo de trabajo con el Subcomité de Revisión Técnica de Fuentes Móviles (MSTRS) y el Comité Asesor de la Ley de Aire Limpio (CAAAC) para desarrollar y evaluar las metodologías de inventarios de emisiones relacionados con las actividades desarrolladas en puertos (US EPA, 2007, 2020c).

2.5.3 INVENTARIOS DE EMISIONES EN EL RPV

La evaluación de la calidad del aire considera el desarrollo de un inventario de emisiones para identificar aquellos contaminantes que pueden influir en el deterioro ambiental. En este caso se cuenta con información previa de inventarios de emisión atmosférica en el RPV por los maestros en ingeniería Tami Pimiento, Leidy M., Diego Santos, Verónica., Zamora Vargas, Eduardo y Antonio Duran, Rafael E., además, del doctor en ingeniería: Fuentes García, Gilberto y colaboradores. Los trabajos de los autores antes mencionados se enlistan en la Tabla 6.

Tabla 6. Trabajos realizados en el RPV que incluyen inventario de emisiones atmosféricas

Trabajo	Título	Referencia
Tesis-Maestría	“Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México”	(Tami, 2013)
Tesis-Licenciatura	“Importancia y aplicación de factores de emisión para las actividades desarrolladas en un recinto portuario”	(Nazario, 2014)
Tesis-Licenciatura	“Análisis de riesgo en las áreas de almacenamiento para combustibles en el recinto portuario de Veracruz”	(Salgado, 2015)
Tesis-Licenciatura	“Estimación de emisiones de partículas por manejo de granel en recintos portuarios. Caso de estudio: recinto portuario de Veracruz”	(Rojas, 2016)
Tesis-Maestría	“Estimación de emisiones y medición de la calidad del aire por benceno y tolueno debido a las operaciones del recinto portuario de Veracruz, México”	(Diego, 2017)
Tesis-Maestría	“Prevención del deterioro significativo por bióxido de azufre por la operación del recinto portuario de Veracruz”	(Zamora, 2019)
Tesis-Maestría	“Evaluación del impacto potencial de la calidad del aire por partículas debido a la operación del recinto portuario de Veracruz”	(Antonio, 2019)
Tesis-Maestría	“Riesgos químicos por manejo de combustibles asociados a fenómenos hidrometeorológicos en el recinto portuario de Veracruz”	(Lara, 2020)
Artículo	“Estimation of atmospheric emissions from maritime activity in the Veracruz port, Mexico”	(Fuentes et al., 2021a)
Artículo	“Atmospheric emissions in ports due to maritime traffic in Mexico”	(Fuentes et al., 2021b)
Artículo	“Review of Top-Down method to determine atmospheric emissions in port. Case of study: port of Veracruz, Mexico”	(Fuentes et al., 2022)

Debido a la temporalidad del último inventario de emisiones se tiene el objetivo de verificar el inventario del 2019 y actualizarlo para el 2020 con la información base diaria de movimiento de buques de ASIPONA-VER. Las principales actividades/procesos de emisión en el RPV fueron identificadas por Tami en el 2013, estas fuentes se indican a continuación:

- Movimiento de buques
- Movimiento de embarcaciones de recreo
- Equipo de manipulación de carga
- Vehículos de transporte personal
- Ferrocarril
- Comedores
- Incineradores

Hay que tener en cuenta que puede haber otras fuentes de emisión atmosféricas como la generación de electricidad, polvo fugitivo, refinerías y almacenamiento de combustibles o productos químicos. De acuerdo con el PMDPV y la MIA del proyecto de ampliación del RPV, se han identificado otras actividades potenciales de generación de emisiones a la atmósfera tales como:

- Preparación del sitio de construcción
- Limpieza del sitio de trabajo
- Planta de trituración de grava
- Planta de fabricación de concreto
- Planta de prefabricados
- Dragado y relleno en áreas marítimas
- Construcción de rompeolas
- Construcción de terminales y/o cesionarias
- Construcción de muelles
- Construcción de accesos y vialidades
- Instalación de servicios

Las fuentes de emisiones en el RPV son abundantes, sin embargo, no se cuenta con la información de cada una de ellas. Por lo tanto, se trabaja con la información disponible: movimiento de buques, dragado y áreas de construcción en general.

2.5.4 ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES

Los puertos son claves para la economía de los países y sirven de puertas de entrada al transporte de combustibles, alimentos, pasajeros, etc. La mayoría de las emisiones por actividades en puertos provienen de los motores diésel, las emisiones de los motores son principalmente SO_x, NO_x, partículas, C₆H₆ y CH₂O. Ben-Hakoun et al. (2022) y Progiou et al. (2021), han demostrado que la mayor parte de las emisiones portuarias a la atmósfera provienen durante las operaciones de los buques.

El inventario de emisiones por el movimiento de buques es una herramienta muy importante para el gobierno federal, estatal, municipal, autoridades portuarias y otras partes interesadas para examinar tendencias de las emisiones e identificar las oportunidades potenciales para reducir las emisiones y priorizar inversiones o cambios operativos. Al planificar un inventario de emisiones relacionado con el movimiento de los buques, es importante considerar los tipos de buques, contaminantes, área geográfica y periodo de tiempo. La US EPA recomienda que se desarrollen los inventarios de emisión basados en la información local más reciente. El uso de la información local actualizada da como resultado un inventario más preciso y representativo, el cual ayuda a la mejor toma de decisiones.

Básicamente, un inventario de emisiones por buques se logra utilizando el número, es decir, la población de las embarcaciones que operan en un área específica, junto con datos sobre su actividad operativa combinados con los factores de emisión apropiados (Z. Liu et al., 2017; Song, 2014). Tradicionalmente, existen dos métodos para la estimación de emisiones por buques (*bottom up* y *top down*), ampliamente utilizados para generar inventarios de emisiones atmosféricas en los puertos.

El método *bottom up* es comúnmente utilizado para estimar las emisiones atmosféricas, debido a que este método genera una alta resolución de datos de emisión. El método *bottom up* considera el tiempo de operación, potencia del motor principal y motor auxiliar, factor de carga, consumo específico de combustible y el factor de emisión de cada motor en cada modo de operación del buque, (Fuentes et al., 2022). Por otro lado, el método *top-down* es el menos utilizado por la comunidad debido a que este método sólo considera el consumo de combustible por tipo de buque, tipo de motor, modo de operación y factores de emisión, obteniendo una resolución de datos menos detallada en comparativa con la generada mediante el método *bottom up* (Fuentes et al., 2022).

Información específica, como el año del modelo o nivel del motor y tipo de combustible permite aplicar los factores de emisión adecuadamente a la actividad de operación de los buques. En general, cuanto mejores sean los datos sobre las fuentes de emisiones y su actividad, más preciso y fino será el inventario de emisiones, lo que lleva a una mejor toma de decisiones. Para el cálculo de las emisiones se deben definir los contaminantes de interés, límites marinos, tiempo del inventario, tipos de buques, modos de operación y tipo de combustible (US EPA, 2007, 2013).

Los contaminantes atmosféricos que se consideraron para el desarrollo del inventario son los siguientes:

- Dióxido de azufre (SO₂)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Partículas menores o igual a 10 micrómetros (PM₁₀)
- Partículas menores o igual a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})
- Compuestos orgánicos volátiles (COV)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Carbón negro (CN)
- Hidrocarburos (HC)

Los límites marinos se establecen de manera que las actividades portuarias de interés ocurran dentro de ellos. Las áreas comunes incluidas en un inventario de emisiones por buques son:

Áreas de tránsito: lugares donde los barcos normalmente viajan a velocidad normal.

Áreas de maniobra: ubicaciones dentro de un área portuaria, donde los buques se mueven típicamente con la ayuda de remolcadores u otras embarcaciones portuarias.

Áreas de estancia: ubicación de atraque, amarre y atraque donde los barcos pueden cargar o descargar carga o personas.

Zonas de fondeo: lugar donde los barcos esperan fondeados para un atracadero abierto.

Los objetivos y el acceso a la información determinaron el dominio, el tiempo y el nivel de detalle utilizado en el inventario. Si bien la mayoría de los inventarios de emisiones de puertos son anuales, para algunos propósitos, puede ser necesario un inventario estacional o diario. En este trabajo el propósito del inventario de emisiones es respaldar el modelado de la calidad del aire, por lo tanto, será necesario un alto nivel de detalle de la actividad temporal (diario). En la Tabla 7 se describen los tipos de buques que se tiene registro en el RPV de acuerdo con los informes de movimiento de buques en ASIPONA-VER del 2019-2020.

Tabla 7. Tipo de buques identificados dentro del RPV

Tipo de buque	Descripción
Granelero	Buque de carga seca (agrícola o mineral)
Fluidos	Buque de carga líquida que transporta productos químicos a granel
Contenedores	Buque que transporta contenedores
Carga general	Buque de carga seca que no están especializados para ningún otro tipo de carga
Combustible	Buque de carga líquida que transporta petrolíferos a granel
Automóviles	Buque que transporta automotores (vehículos, camiones y equipo de construcción)

Los modos de operación son importantes debido a que la potencia de funcionamiento de los motores varía conforme a los diferentes modos de operaciones de los buques. Los principales modos de operación por buques se describen a continuación:

Tránsito: modo de operación de tránsito cubre los buques que se mueven dentro del dominio geográfico, pero fuera del rompeolas. El uso del motor auxiliar es generalmente bajo en este modo de operación.

Maniobra: modo de operación de maniobras cubre los buques que se mueven entre el rompeolas y el muelle o zona de fondeo. Los buques que se mueven en este modo son frecuentemente asistidos por remolcadores o remolcadores. Si un buque se desplaza entre diferentes muelles o zonas de anclaje, generalmente se mueven en este modo de operación. Se espera que el uso de motores auxiliares sea alto en este modo de operación.

Estadía: modo de operación que cubre las embarcaciones que están amarradas, atadas o en un muelle/embarcadero. Cuando se trata de la estancia, un buque utiliza sus motores auxiliares, o utiliza la energía de tierra si está disponible. No se utilizan motores de propulsión en este modo. Se espera que el uso del motor auxiliar sea alto si no se usa la energía de tierra, en particular para embarcaciones de descarga automática.

Fondeo: modo de funcionamiento cubre los buques que están fondeados/anclados. Muchos puertos tienen zonas de anclaje específicas. Mientras está anclado, un barco utiliza sus motores auxiliares, los motores de propulsión no se utilizan en este modo.

Los factores de emisión varían según el motor y tipo de combustible. De acuerdo con la IMO y la US EPA, todas las embarcaciones marinas deben de estar utilizando gasóleo marino (MGO) o diésel marino (MDO) para cumplir con las regulaciones de azufre en el combustible impuestas por la normatividad en vigor del convenio internacional (MARPOL) (IMO, 2015a; Merico et al., 2019). Las regulaciones impuestas por el convenio MARPOL en 2015 son las siguientes:

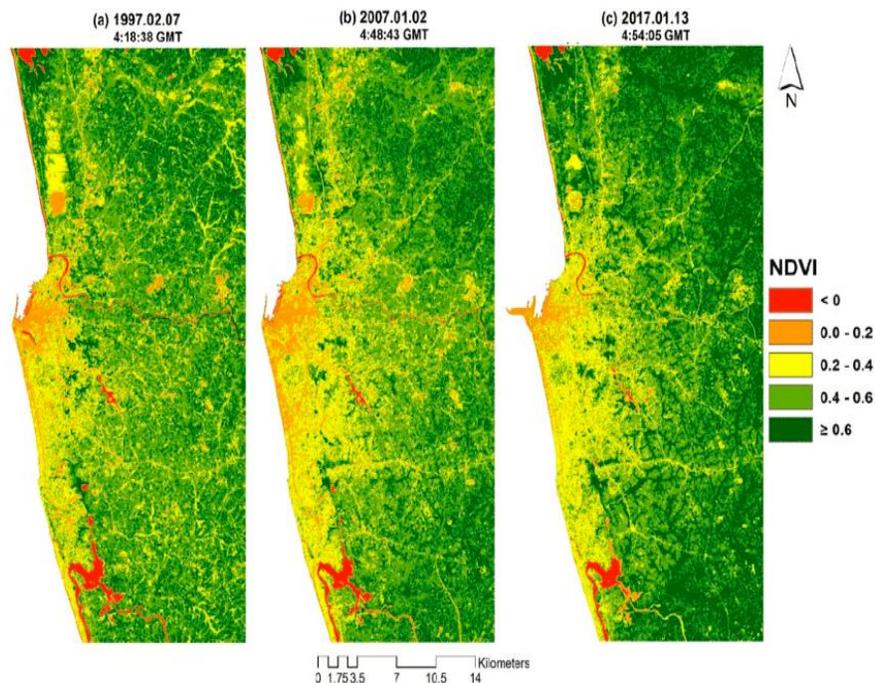
- a) 0.10 % de azufre en los combustibles utilizados **dentro** de áreas de control de emisiones a partir del 1 de enero del 2015 (antes 1 % de azufre en los combustibles)
- b) 0.50 % de azufre en los combustibles utilizados **fuera** de las áreas del control de emisiones a partir de 1 de enero del 2020 (antes 3.5 % de azufre en los combustibles)

Hay que tener en cuenta que al menos que los datos locales indiquen que las embarcaciones están utilizando combustible residual marino (RM) o combustible pesado (HFO), se debe considerar que, las embarcaciones están utilizando combustibles específicos (MDO/MGO) para cumplir las regulaciones de azufre en el combustible impuestas por la IMO.

2.6 ÍNDICES ESPECTRALES

Los índices espectrales son imágenes que se calculan a partir de imágenes multibanda (Ribeiro et al., 2022). La imagen resalta un fenómeno particular que está presente y suaviza otros elementos que impactan en la imagen. Por ejemplo, el índice de vegetación mostrará una planta saludable en color claro en la imagen del índice, mientras que las plantas no saludables tendrán un valor más bajo y el suelo descubierto tendrá un color más oscuro (ESRI, 2022). Dado que el sombreado de los cambios en el terreno (colinas y valles) afecta la intensidad de la imagen, se generan escalas para que se resalte el color del sujeto en lugar del brillo o la intensidad del objeto.

Una forma común de usar estas métricas es comparar el mismo objeto en varias imágenes a lo largo del tiempo. Por ejemplo, se pueden tomar varias imágenes de una tierra de cultivo cada semana desde la siembra hasta la temporada de crecimiento. El índice se calculará para cada imagen, al analizar estos índices de vegetación semanales o mensuales, se espera que las imágenes se vuelvan más brillantes durante un período de tiempo (durante la temporada de crecimiento). Luego, a medida que comienza el otoño, la tasa de senescencia disminuye hasta que las plantas se cosechan o las hojas mueren al final de la temporada. El efecto normalizador del índice aplicado hace que esta comparación sea útil a través del tiempo, tal como se muestra en la Figura 12.



*Figura 12. Índice de diferencial de vegetación normalizada (NDVI)
Referencia:(Gómez, 2020)*

Existe un gran número de índices espectrales que pueden analizar diversos aspectos como la vegetación, recursos hídricos, nieve, suelo, entre otros. Los satélites más conocidos como LANDSAT y SENTINEL ofrecen la oportunidad de realizar diversas operaciones con sus bandas, el resultado puede ser convertido en un índice espectral (ESRI, 2022). A continuación, se enlistan los principales índices utilizados por la comunidad científica.

- Índices de vegetación y suelo
 - Índice de vegetación ajustada al suelo modificado (MSAVI)
 - Índice diferencial de vegetación normalizada (NDVI)
 - Índice de vegetación perpendicular (PVI)
 - Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)
 - Índice de vegetación ajustado al suelo transformado (TSAVI)
 - Índice de resistencia atmosférica visible (VARI)
 - Índice de suelo descubierto (BSI)

- Índices de agua
 - Índice de nieve con diferencia normalizada (NDSI)
 - Índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI)
 - Índice de diferencia de humedad normalizado (NDMI)

- Índices de geología
 - Índice de minerales arcillosos (CMI)
 - Índice de minerales ferrosos (FMI)
 - Índice de óxido de hierro (IOI)

- Índices de paisaje
 - Índice de área calcinada (BAI)
 - Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI)
 - Índice de áreas construidas de diferencia normalizada (NDBI)

2.6.1 CORRECCIONES DE IMÁGENES SATELITALES

Antes de calcular los índices espectrales, los valores de píxeles sin procesar (también llamados números digitales o valores DN) deben calibrarse en unidades físicamente significativas (Nguyen et al., 2021). Esto debido a la obtención de imágenes satelitales se realizan de forma indirecta, y generalmente los satélites o plataformas se encuentran a miles de kilómetros de la superficie terrestre y por ende presentan varios errores que pueden modificar o distorsionar las imágenes. Los errores pueden deberse a fallos técnicos de los sensores, alteraciones de la imagen por el movimiento del satélite, interferencia por las condiciones atmosféricas, entre otros (Basterra, 2011).

Actualmente, existen cuatro correcciones para las imágenes satelitales las cuales son: la geométrica, la radiométrica, la atmosférica y la topográfica (Diek et al., 2017; Manzano & Oña, 2018). Cierta literatura sugiere que los índices espectrales calculados a partir de cualquiera de estos tipos de datos son técnicamente correctos, aunque cada uno arrojará resultados de índice diferentes para las mismas condiciones de superficie. Sin embargo, el consenso general es que la calibración a la reflectancia superficial aparente produce los resultados más precisos con índices espectrales (Nguyen et al., 2021).

A continuación, se describen las diferentes correcciones utilizadas en imágenes satelitales.

Corrección geométrica: La corrección geométrica permite obtener productos con fines cartográficos a partir de una imagen satelital, lo cual se logra a través de la rectificación de diferentes distorsiones que se producen en el momento de la captura de la imagen (Muñoz et al., 2011).

Corrección atmosférica: Este tipo de corrección está diseñada para evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera produce, en especial los fenómenos de absorción y distorsión debido a los gases y aerosoles presentes en la atmósfera (A. Dominguez, 1996; Muñoz et al., 2011). Cuando se pretende obtener cartografía en base a una imagen digital y realizar sobre ella mediciones de parámetros físicos, es preciso establecer la relación cuantitativa entre los ND de la imagen y los parámetros a estudiar, es decir, se necesita convertir los ND en valores de reflectancia para poder modelar dichos parámetros en función a su comportamiento espectral (Arozarena, 2010).

Corrección radiométrica: La corrección radiométrica corrige los valores o niveles digitales (ND) erróneos capturados por sensor en la fase de registro de información. Esta corrección aplica varios modelos matemáticos que relacionan el valor capturado ND con los valores reales sobre el terreno (Arozarena, 2010).

Corrección topográfica: La corrección topográfica permite compensar la variación de la iluminación en el momento de captura de la información, dicha variación se produce por la diferencia en la altitud del terreno analizado (Muñoz et al., 2011). Existen varios métodos para minimizar el efecto de la topografía en la radiancia global, se pueden dividir en dos grupos: métodos empíricos, que no necesitan de datos adicionales y métodos semi empíricos que requieren información como el ángulo de incidencia solar en cada punto y requieren de un modelo de elevaciones (MDE) para corregir la imagen (Riaño et al., 2000).

2.6.2 ÍNDICE DEL SUELO DESCUBIERTO (BSI)

El índice de suelo descubierto (BSI) es un indicador numérico que combina bandas espectrales azul, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta para capturar las variaciones del suelo (Sykas, 2020). El infrarrojo de onda corta y las bandas espectrales rojas se utilizan para cuantificar la composición mineral del suelo, mientras que las bandas espectrales azul e infrarrojo cercano se utilizan para mejorar la presencia de vegetación. El BSI intenta minimizar la influencia de la humedad del suelo debido a lluvia o riego y normalizar las diferencias de iluminación en el suelo debido las condiciones del ángulo del sol al momento de la toma de la imagen (Bhunja et al., 2019). El índice BSI se puede utilizar en numerosas aplicaciones de detección remota, como: mapeo de suelos, identificación de cultivos, áreas en construcción y zonas de deforestación.

Valores bajos de BSI están asociados a suelos cubiertos con vegetación, agua, entre otras coberturas, mientras que los valores altos significan áreas correspondientes a suelo desnudo o descubierto (Kumar et al., 2016).

CAPÍTULO

3

METODOLOGÍA

CONTENIDO:

3.1 METODOLOGÍA GENERAL

3.2 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE BUQUES

3.3 ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR ACTIVIDADES DE
CONSTRUCCIÓN Y DRAGADO

3.4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DEL SUELO DESCUBIERTO

3.5 MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF

3.1 METODOLOGÍA

La metodología que se presenta a continuación (Figura 13), fue la que se implementó para evaluar el impacto en la calidad del aire generado por las actividades de construcción y operación en la zona de ampliación del RPV.

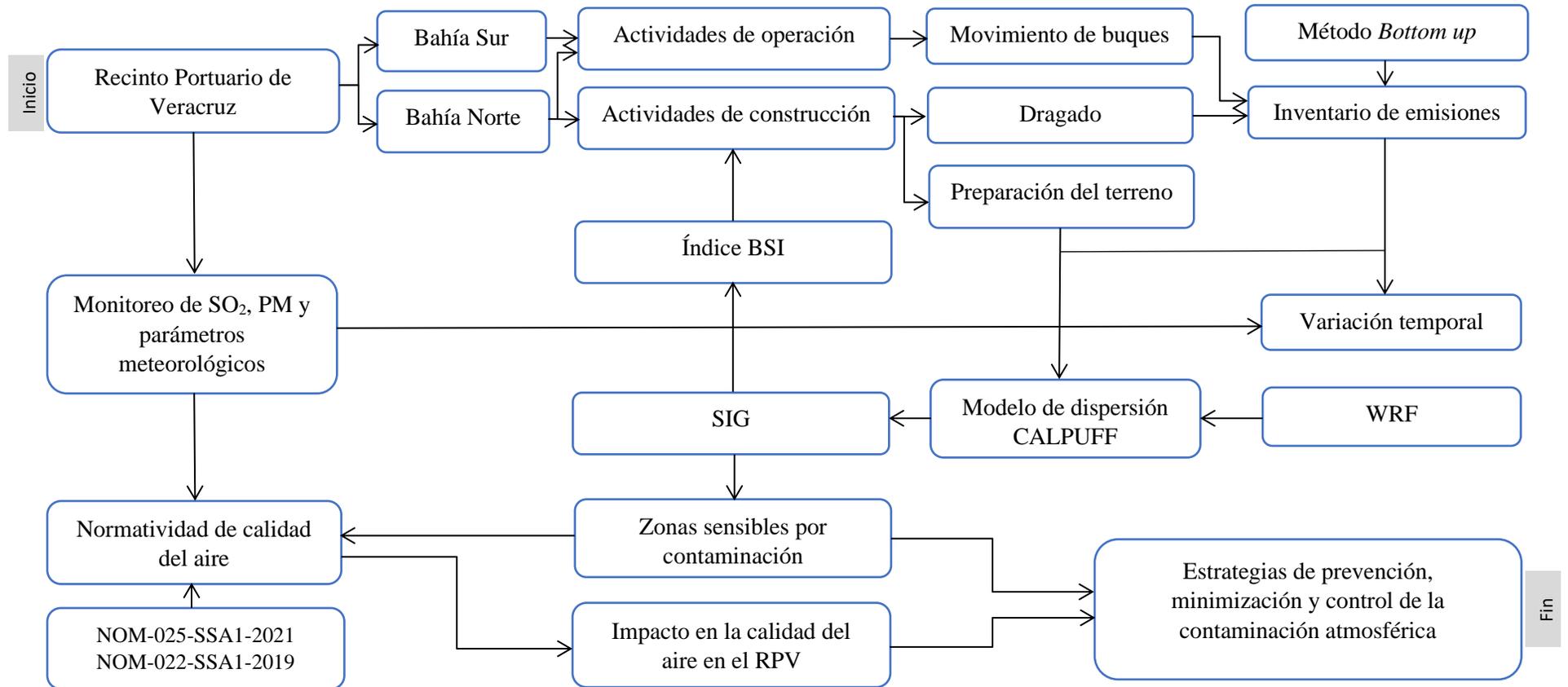


Figura 13. Metodología para evaluar el impacto de la calidad del aire en el RPV

La metodología general (Figura 13), comenzó con la identificación de las características y principales actividades que se desarrollan en el RPV. Una vez caracterizada la zona de estudio, se continuó con la búsqueda de información relacionada con el puerto. Identificadas las fuentes de emisiones, se aplicaron los factores de emisión correspondientes a las diferentes actividades de operación y de construcción que se realizan en el puerto. Se aplicó el método *bottom up* para la generación y actualización del inventario de emisiones por movimiento de buques y de dragado. Los datos del inventario de emisiones generados fueron utilizados para su integración en el modelo de dispersión CALPUFF para la identificación del transporte, dispersión y concentración de SO₂ y partículas. Se identificó la concentración y variabilidad de las emisiones atmosféricas obtenidas mediante CALPUFF, dando lugar a un análisis entre los datos de monitoreo de la calidad del aire y los generados mediante el modelo de dispersión, así como, a la identificando las zonas susceptibles a la contaminación atmosférica al interior y exterior del RPV.

Por otro lado, en la misma metodología general (Figura 13) se observa la realización del monitoreo de calidad del aire, durante y después de las actividades de construcción y operación del RPV. Dando lugar a la verificación de la normatividad vigente para los contaminantes de interés (SO₂ y partículas). Finalizando con la propuesta de medidas de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica para el RPV.

3.2 METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR BUQUES

La evaluación de este estudio integral en calidad del aire considera el desarrollo y actualización del inventario de emisiones por el movimiento de buques. Para este objetivo específico, se consideraron dos metodologías, la primera de la Agencia de Protección Ambiental (US EPA) de 2020 y la segunda de la Agencia Ambiental Europea en conjunto con el Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación (EEA/EMEP) de 2019. En ambas metodologías, se consideraron los cálculos con el nivel de resolución de datos más finos (método *bottom up*), con el objetivo de respaldar el modelo de la calidad del aire y generar el inventario de emisiones diario, mensual y anual con una alta resolución.

3.2.1 METODOLOGÍA US EPA

De acuerdo, con la metodología de la US EPA todos los buques tienen motores de propulsión de categoría 3 (cilindraje ≥ 30 L). Por otro lado, la metodología considera tres tipos de fuentes de acuerdo con la metodología, estas fuentes son: motores de propulsión, motores auxiliares y calderas. Los factores de emisión de cada fuente de emisión en un buque dependen de la categoría y tipo de motor.

Las siguientes tablas (Tabla 8-9) se utilizaron para determinar las características del motor de propulsión de los diferentes buques identificados en el RPV.

Tabla 8. Clasificación de los motores de propulsión por su desplazamiento del cilindro

Categoría del motor	Nivel del motor	Desplazamiento del cilindro
1	Sin control 1,2	< 5 L
	Sin control 3,4	< 7 L
2	Sin control 1,2	>5, ≤ 30 L
	Sin control 3,4	>7, ≤ 30 L
3	Todos	> 30 L

Referencia: (US EPA, 2020c)

Tabla 9. Tipo de motor de propulsión de acuerdo con su velocidad

Tipo de motor	Intervalo de velocidad del motor	Ciclos del motor
SSD	< 500 rpm	2
MSD	500 – 1,400 rpm	4
HSD	> 1,400 rpm	4

SSD= Motor diésel de baja velocidad, MSD= Motor diésel de velocidad media,

HSD= Motor diésel de alta velocidad

Referencia: (US EPA, 2020c)

La falta de datos de los buques es habitual y el RPV no está exento, por ello, se siguieron las recomendaciones de acuerdo con esta metodología de tener en cuenta que los buques del tienen motores diésel de propulsión baja velocidad (SSD) y motores auxiliares diésel de velocidad media (MSD). La información del tipo y subtipo de buques se utilizó para agrupar los barcos similares identificados en el RPV, así como asignar las cargas de los motores y la caldera durante sus modos de operación. Los siguientes campos se utilizaron para clasificar el tipo y subtipo de buques:

- Tonelaje bruto (GT)
- Tonelaje de peso muerto (DWT)
- Unidad equivalente a veinte pies (TEU)

Los subtipos de buques del RPV se asignaron de acuerdo con las especificaciones de la US EPA, obteniendo la Tabla 10. Esto se hace debido a que no se dispone de datos detallados por el RPV.

Tabla 10. Clasificación de los subtipos de buques de acuerdo con su tamaño de envío

Tipo de buque	Tamaño	Unidad	Subtipo
Granelero	0 – 9,999	DWT	1,000 DWT
	10,000 – 34,999		35,000 DWT
	35,000 – 59,999		60,000 DWT
	60,000 – 99,999		100,000 DWT
	100,000 – 199,999		200,000 DWT
	≥ 200,000		>200,000 DWT
Fluidos	0 – 4,999	DWT	5,000 DWT
	5,000 – 9,999		10,000 DWT
	10,000 – 19,999		20,000 DWT
	≥ 20,000		>20,000 DWT
Contenedores	0 – 999	TEU	1,000 TEU
	1,000 – 1,999		2,000 TEU
	2,000 – 2,999		3,000 TEU
	3,000 – 4,999		5,000 TEU
	5,000 – 7,999		8,000 TEU
	8,000 – 11,999		12,000 TEU
	12,000 – 14,499		14,500 TEU
	≥ 14,500		>14,500 TEU
	Carga general		0 – 4,999
5,000 – 9,999		10,000 DWT	
≥ 10,000		>10,000 DWT	
Combustibles	0 – 4,999	DWT	5,000 DWT
	5,000 – 9,999		10,000 DWT
	10,000 – 19,999		20,000 DWT
	20,000 – 59,999		60,000 DWT
	60,000 – 79,999		80,000 DWT
	80,000 – 119,999		120,000 DWT
	120,000 – 199,999		200,000 DWT
Automóviles	0 – 4,999	GT	5,000 GT
	≥ 5,000		>5,000 GT

Referencia: Elaboración propia mediante datos de la US EPA (2020c)

Las emisiones para un año base para cada buque se estimaron de acuerdo con la Ecuación 2.

$$E = P \times A \times FE \times LLAF \quad (Ec. 2)$$

Donde:

E= emisión del buque (g)

P= potencia del funcionamiento del motor (kW)

A= actividad del motor (h)

FE= factor de emisión (g/kWh)

LLAF= factor de ajuste de carga (adimensional), 1 para motores auxiliares y calderas

3.2.1.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

La potencia operativa de los motores varía conforme a los modos de operación de los buques y su cálculo depende de la fuente de datos de la actividad. De acuerdo con la metodología de la US EPA se necesitaron las siguientes características de los buques para calcular la potencia operativa del motor de propulsión:

- Potencia de propulsión total instalada, igual conocida como potencia nominal (kW)
- Velocidad máxima (kn)
- Calado máximo (m)

La potencia de funcionamiento de los motores y el factor de carga se calcularon para cada buque. Existen varios métodos para estimar la potencia operativa de los motores de un buque. Uno de los métodos es el de “la hélice”, que estima la potencia mediante la velocidad del buque (US EPA, 2017a). La falta de datos es una ocurrencia común en los conjuntos de datos de características de los buques. La práctica que se llevó a cabo para llenar los vacíos en los datos característicos de la embarcación de RPV fue, utilizar información de embarcaciones con valores conocidos que operan en el dominio geográfico.

Para llenar los campos categóricos faltantes como el tipo de motor, se tomaron en cuenta los valores comunes de los buques conocidos del RPV. Por otro lado, para valores numéricos como la potencia de propulsión instalada se consideraron los siguientes valores en su lugar (Tabla 11).

Tabla 11. Promedio de la potencia de funcionamiento de los motor y caldera

Tipo de buque	Subtipo	Tránsito			Maniobra		Estadía		Fondeo	
		MP	MA	CA	MA	CA	MA	CA	MA	CA
Fluidos	5,000 DWT	3,000	80	0	110	125	160	125	80	125
	10,000 DWT	3,300	230	0	330	250	490	250	230	250
	20,000 DWT	5,300	230	0	330	250	490	250	230	250
	> 20,000 DWT	9,000	550	0	780	250	1,170	250	550	250
Granelero	1,000 DWT	3,300	190	0	310	50	280	50	190	50
	35,000 DWT	6,900	190	0	310	50	280	50	190	50
	60,000 DWT	8,500	260	0	420	100	370	100	260	100
	100,000 DWT	10,200	420	0	680	200	600	200	420	200
	200,000 DWT	16,400	420	0	680	200	600	200	420	200
>200,000 DWT	17,400	420	0	680	200	600	200	420	200	
Contenedores	1,000 TEU	13,100	300	0	550	120	340	120	300	120
	2,000 TEU	15,600	820	0	1,320	290	600	290	820	290
	3,000 TEU	21,800	1,230	0	1,800	350	700	350	1,230	350
	5,000 TEU	37,000	1,390	0	2,470	450	940	450	1,390	450
	8,000 TEU	55,800	1,420	0	2,600	450	970	450	1,420	450
	12,000 TEU	61,000	1,630	0	2,780	520	1,000	520	1,630	520
	14,500 TEU	65,000	1,960	0	3,330	630	1,200	630	1,960	630
>14,500 TEU	49,000	2,160	0	3,670	700	1,320	700	2,160	700	
Combustible	5,000 DWT	8,700	250	0	375	100	250	500	250	100
	10,000 DWT	12,200	375	0	563	150	375	750	375	150
	20,000 DWT	15,700	625	0	938	250	625	1250	625	250
	60,000 DWT	16,900	750	150	1,125	300	750	1,500	750	300
	80,000 DWT	16,900	750	150	1,125	300	750	1,500	750	300
	120,000 DWT	16,900	750	150	1,125	300	750	1,500	750	300
	200,000 DWT	16,900	750	150	1,125	300	750	1,500	750	300
	>200,000 DWT	16,900	750	150	1,125	300	750	1,500	750	300
Carga general	5,000 DWT	1,100	60	0	90	0	120	0	60	0
	10,000 DWT	3,300	170	0	250	75	330	75	170	75
	> 10,000 DWT	15,900	490	0	730	100	970	100	490	100
Automóviles	5,000 GT	2,300	600	0	1,700	200	800	200	600	200
	> 5,000 GT	15,600	950	0	2,720	300	1,200	300	950	300

MP= motor principal, MA= motor auxiliar y C= caldera

Referencia: Elaboración propia mediante datos de la US EPA (2020c)

3.2.1.2 FACTORES DE EMISIÓN

Los factores varían de acuerdo a la categoría del motor (C2, C3), grupo (MP, MA, CA), tipo de combustible: gasóleo marino (MGO), diésel marino (MDO), residual marino (RM) o combustible pesado (HFO) y tipo de motor: diésel de baja velocidad (SSD), diésel de media velocidad (MSD), turbina de gas (Gt), turbina de vapor (ST) o caldera (CA) (US EPA, 2018, 2020c). Los factores de emisión para NO_x utilizados para los buques se indican a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Factores de emisión de NO_x en buques

Grupo de motor	Tipo de combustible	Tipo de motor	Factor de emisión (g/kWh)	Referencia
Propulsión	MGO/MDO	ST	2.0	(ENTEC, 2002a)
		Gt	5.7	
		SSD	16.0	(Starcrest Consulting Group, 2015)
		MSD	12.2	
	RF/HFO	ST	2.1	(ENTEC, 2002a)
		Gt	6.1	
		SSD	17.0	(IMO, 2009)
Auxiliar	MGO/MDO	MSD	9.8	(Starcrest Consulting Group, 2015)
		RM/HFO	13.0	(IMO, 2015b)
		CA	2.0	(ENTEC, 2002a)
Caldera	MGO/MDO	CA	2.0	(ENTEC, 2002a)
	RM/HFO		2.1	

De acuerdo con la metodología de la US EPA, el Consumo Específico del Combustible (SFC) varía de acuerdo con el grupo del motor, tipo de combustible y tipo de motor. Dada esa situación se calcularon los FE para partículas, CO₂ y SO₂ considerando los valores de la Tabla 13.

Tabla 13. Tasa del Consumo Específico del Combustible (SFC)

Grupo de motor	Tipo de combustible	Tipo de motor	SFC (g/kWh)	Fuente
Propulsión	MGO/MDO	SSD	185	(Cooper & Gustafsson, 2004)
		MSD	205	
		ST	300	
		Gt	300	
	RM/HFO	SSD	195	
		MSD	215	
		ST	305	
		Gt	305	

Tabla 13. Tasa del Consumo Específico del Combustible (continuación)

Auxiliar	MGO/MDO	MSD	217	(Cooper & Gustafsson, 2004)
	RM/HFO	MSD	227	
Caldera	MGO/MDO	CA	300	(Cooper & Gustafsson, 2004)
	RM/HFO		305	

Los factores de emisión de PM_{10} se calcularon para los motores principales, auxiliares y calderas de acuerdo con la siguiente ecuación (Ecuación 3).

$$FE_{PM_{10}} = PM_{base} + (S_{act} \times SFC \times FSC \times MWR) \quad (Ec. 3)$$

Donde:

$FE_{PM_{10}}$ = factor de emisión de PM_{10} ajustado para el azufre en el combustible (g/kWh)

PM_{base} = factor de emisión base asumiendo 0 % de azufre en el combustible; 0.1545 g/kWh para combustible MGO/MDO; 0.5761 g/kWh para combustible RM/HFO (US EPA, 2017a)

S_{act} = nivel real del azufre en el combustible (relación de peso); 0.001 para actividad de buques dentro del ECA en 2015 y adelante; 0.027 para actividad de buques fuera del ECA antes del 2020; 0.005 para actividad de buques fuera del ECA en 2020 y siguientes

SFC= consumo específico del combustible (g/kWh)

FSC= fracción del azufre (S) en el combustible que se convierte en partículas sulfatadas; 0.02247 (US EPA, 2009)

MWR= relación de peso molecular de partículas sulfatadas y azufre; $224/32= 7$ (US EPA, 2017a)

La Ecuación 3 no contempla motores ST y Gt. Sin embargo, los factores de emisión para estos motores se presentan a continuación (Tabla 14).

Tabla 14. Factores de emisión de PM_{10} para motores ST y Gt

Tipo de combustible	Tipo de motor	Factor de emisión (g/kWh)
MGO/MDO	ST	0.16
	Gt	0.01
RM/HFO	ST	0.93
	Gt	0.06

Referencia: (Cooper & Gustafsson, 2004)

Para los factores de emisiones de PM_{2.5} se calcularon como el 95 % de las emisiones de PM₁₀ de acuerdo con la US EPA (2009b). Los factores de emisión para Carbón Negro (CN) se calcularon como el 3 % de las emisiones de PM_{2.5} de acuerdo con la US EPA (2012).

Los factores de emisión de SO₂ se calcularon mediante la siguiente ecuación (Ecuación 4).

$$FE_{SO_2} = SFC \times S_{act} \times FSC \times MWR \quad (Ec. 4)$$

Donde:

FE_{SO₂}= factor de emisión del SO₂ (g/kWh)

SFC= consumo específico del combustible (g/kWh)

S_{act}= nivel real del azufre en el combustible (relación de peso); 0.001 para actividad de buques dentro del ECA en 2015 y adelante; 0.027 para actividad de buques fuera del ECA antes del 2020; 0.005 para actividad de buques fuera del ECA en 2020 y siguientes

FSC= fracción de S en el combustible que se convierte en SO₂; 0.97753 (US EPA, 2009)

MWR= relación entre pesos moleculares de SO₂ y S; 64/32= 2

Los factores de emisión de CO₂ se calcularon mediante la siguiente ecuación (Ecuación 5).

$$FE_{CO_2} = SFC \times CCF \quad (Ec. 5)$$

Donde:

FE_{CO₂}= Factor de emisión del CO₂ (g/kWh)

SFC= consumo específico del combustible (g/kWh)

CCF= factor de contenido de carbono en el combustible (relación peso); 3.206 para combustible MGO/MDO; 3.114 para combustible RM/HFO (IMO, 2015b)

Los factores de emisión de HC y CO utilizados se muestran a continuación (Tabla 15).

Tabla 15. Factores de emisión de HC y CO

Grupo de motor	Tipo de motor	Factor de emisión para HC (g/kWh)	Factor de emisión para CO (g/kWh)	Referencia
Propulsión	SSD	0.6	1.4	(US EPA, 2009)
	MSD	0.5	1.1	
	ST	0.1	0.2	
	Gt	0.1	0.2	
Auxiliar	MSD	0.4	1.1	(Starcrest Group, 2015)
Caldera	CA	0.1	0.2	

Los factores de emisión de COV se calcularon como 1.053 veces los factores de emisión de HC, mientras que las emisiones de CH₄ se calcularon como el 2 % de los factores de emisión de HC de acuerdo con Cooper & Gustafsson (2004).

Los factores de emisión de N₂O utilizados se presentan a continuación (Tabla 16).

Tabla 16. Factores de emisión de N₂O

Grupo de motor	Tipo de combustible	Tipo de motor	Factor de emisión (g/kWh)	Referencia
Propulsión	MGO/MDO	SSD	0.029	(Starcrest Consulting Group, 2015)
		MSD	0.029	
		ST	0.075	
		Gt	0.075	
	RM/HFO	SSD	0.031	(Cooper & Gustafsson, 2004)
		MSD	0.031	
		ST	0.080	
		Gt	0.080	
Auxiliares	MGO/MDO	MSD	0.029	(Starcrest Consulting Group, 2015)
	RM/HFO	MSD	0.031	
Caldera	MGO/MDO	CA	0.075	(Cooper & Gustafsson, 2004)
	RM/HFO		0.080	

3.2.2 METODOLOGÍA EEA/EMEP

De acuerdo con la EEA/EMEP las emisiones en las embarcaciones surgen de los motores principales (de propulsión) y de los motores auxiliares. Los buques atracan y permanecen amarrados (estadía) mientras descargan y cargan la mercancía transportada, para después maniobrar y zarpar lejos del puerto (EEA/EMEP, 2019b).

De acuerdo con la metodología de la EEA/EMEP los motores diésel se deben clasificar de la siguiente manera:

- Motor diésel de baja velocidad (SSD); 18 % de los motores
- Motor diésel de velocidad media (MSD); 55 % de los motores
- Motor diésel de alta velocidad (HSD); 27 % de los motores

Los diferentes motores se clasificaron de acuerdo con el combustible que usan: Aceite pesado (BFO), gasóleo marino (MGO) y diésel marino (MDO) (EEA/EMEP, 2019b; Karanassos, 2016).

La metodología de la EEA/EMEP contempla una metodología con tres niveles diferentes para estimar las emisiones de las embarcaciones. Los niveles son los siguientes:

- Nivel I: basado en el consumo del combustible específico
- Nivel II: basado en el consumo del combustible específico y tipo del motor
- Nivel III: basado en el consumo del combustible específico, tipo del motor y modos de operación de las embarcaciones

La metodología de la EEA/EMEP Nivel III utiliza el movimiento de los buques cuando se dispone de los datos, así como la información técnica de ellos (por ejemplo, tamaño, tipo de motor, potencia total instalada, uso de combustible y tiempo en cada modo de operación o actividad). La EEA/EMEP proponen un cálculo diferente, en función a la potencia instalada en los buques y el tiempo en los modos de operación. Las emisiones del RPV se calcularon de acuerdo con la siguiente ecuación (Ecuación 6) debido al acceso a la información:

$$E_{T[i,j,m]} = \sum_p [T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times FE_{e,i,j,m,p})] \quad (Ec. 6)$$

Donde:

$E_{T[i,j,m]}$ = emisión total de un viaje (toneladas)

T= tiempo (h)

FE= factor de emisión (kg/tonelada de combustible (g/kWh)

LF= factor de carga del motor (%)

P= potencia de funcionamiento instalada (kW)

e= categoría del motor (principal o auxiliar)

i= contaminante (NO_x, SO₂, partículas, etc.)

m= tipo de combustible (BFO, MDO o MGO)

j= tipo de motor (SSD, MSD, HSD)

p= modos de operación (tránsito, maniobra o estadía)

3.2.2.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

La potencia de funcionamiento del motor principal y auxiliar se obtuvieron mediante la Tabla 17.

Tabla 17. Cálculo de la potencia de funcionamiento del motor en función del GT

Tipo de buque	Flota 2010	Flota 1997	Mar mediterráneo 2006	Relación para Motores auxiliares	
				Flota 2010	Mar mediterráneo 2006
Fluidos/combustible	$14.755 * GT^{0.6082}$	$29.821 * GT^{0.5552}$	$14.602 * GT^{0.6278}$	0.30	0.35
Granelero	$35.912 * GT^{0.5276}$	$89.571 * GT^{0.4446}$	$47.115 * GT^{0.504}$	0.30	0.39
Contenedores	$2.9165 * GT^{0.8719}$	$1.3284 * GT^{0.9303}$	$1.0839 * GT^{0.9617}$	0.25	0.27
Carga general	$5.56482 * GT^{0.7425}$	$10.539 * GT^{0.6760}$	$1.2763 * GT^{0.9154}$	0.23	0.35
Automóviles	$164.578 * GT^{0.4350}$	$35.93 * GT^{0.5885}$	$45.7 * GT^{0.5237}$	0.24	0.39

Referencia: (ENTEC, 2007; Trozzi, 2010)

3.2.2.2 FACTORES DE EMISIÓN

Los factores de emisión de NO_x, NMCOV y PST utilizados mediante esta metodología se muestran a continuación (Tabla 18).

Tabla 18. Factores de emisión de NO_x, NMCOV y PST (g/kWh)

Clase de motor	Modo de operación	Tipo de motor	Tipo de combustible	FE NO _x 2000	FE NO _x 2005	FE NO _x 2010	FE NMCOV	FE PST	SFC (g/kWh)
Principal	Tránsito	HSD	BFO	12.7	12.3	11.8	0.2	0.8	213
			MDO/MGO	12.0	11.6	11.2	0.2	0.3	203
		MSD	BFO	14.0	13.5	13.0	0.5	0.8	213
			MDO/MGO	13.2	12.8	12.3	0.5	0.3	203
		SSD	BFO	18.1	17.5	16.9	0.6	1.7	195
			MDO/MGO	17.0	16.4	15.8	0.6	0.3	185
Principal	Estadía y maniobra	HSD	BFO	10.2	9.9	9.5	0.6	2.4	234
			MDO/MGO	9.6	9.3	8.9	0.6	0.9	223
		MSD	BFO	11.2	10.8	10.4	1.5	2.4	234
			MDO/MGO	10.6	10.2	9.9	1.5	0.9	223
		SSD	BFO	14.5	14.0	13.5	1.8	2.4	215
			MDO/MGO	13.6	13.1	12.7	1.8	0.9	204
Auxiliar	Tránsito, estadía y maniobra	HSD	BFO	11.6	11.2	10.8	0.4	0.8	227
			MDO/MGO	10.9	10.5	10.2	0.4	0.3	217
		MSD	BFO	14.7	14.2	13.7	0.4	0.8	227
			MDO/MGO	13.9	13.5	13.0	0.4	0.3	217

Referencia:(EEA/EMEP, 2019b)

Los factores de emisión para NMCOV se calcularon como el 98 % del valor de HC, de acuerdo con los informes del IPCC (ENTEC, 2002a, 2007).

Los factores de emisión como el de SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} dependen del contenido de azufre en el combustible utilizado. El contenido de azufre puede variar entre lotes de producción o de un año a otro, en consecuencia, los factores de emisión con relación con el contenido de azufre se proporcionan a continuación (Tabla 19).

Tabla 19. Factores de emisión para buques que utilizan BFO, MDO y MGO

Contaminante	BFO	MDO/MGO	Referencia
	FE (kg/Tn-combustible)	FE (kg/Tn-combustible)	
NO _x	79.3	78.5	(ENTEC, 2007)
CO	7.4	7.4	(Lloyd's Register, 1995)
NMCOV	2.7	2.8	(ENTEC, 2007)
SO _x *	20 (s)	20 (s)	(Lloyd's Register, 1995)
PST	6.2	1.5	(ENTEC, 2007)
PM ₁₀	6.2	1.5	(ENTEC, 2007)
PM _{2.5}	5.6	1.4	(ENTEC, 2007)

* S= contenido de azufre en el combustible (%)

Los factores de emisión de la Tabla 19 son valores promediados entre motores de 2 y 4 tiempos, asumiendo una funcionalidad del 75 % de 2 tiempos y el 25 % de 4 tiempos (EEA/EMEP, 2019b). Debido a que la información de maniobra por el RPV es escasa, se tomó la decisión de considerar los tiempos descritos por esta metodología (Tabla 20), al igual que los factores de ajuste para los diferentes modos de operación realizados por los buques (Tabla 21).

Tabla 20. Velocidad promedio en tránsito y tiempos de maniobra y estadía

Tipo de buque	Velocidad en tránsito (km/h)	Tiempo en maniobra (h)	Tiempo en estadía (h)
Fluidos/combustible	26	1	38
Granelero	26	1	52
Contenedores	36	1	14
Carga general	23	1	39
Automóviles	27	1	15

Referencia: (ENTEC, 2002a)

Tabla 21. Factor de carga de capacidad máxima continua (MCR) de los motores

Modo de operación	% de carga MCR del MP	% de tiempo en funcionamiento del MP	% de carga MCR del MA
Tránsito	80	100	30
Maniobra	20	100	50
Estadía ^a	20	5	40
Estadía ^b	20	100	60

^a Estadía para buques diferente al tipo combustible

^b Estadía para buques de tipo combustible

Referencia: (ENTEC, 2002b)

3.3 ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN

3.3.1 EMISIONES POR ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN

Las actividades de construcción son una fuente de emisión de partículas que pueden tener un impacto temporal en la calidad del aire local. La construcción de edificaciones, por ejemplo, contribuye a emisiones elevadas de partículas durante la construcción debido al movimiento de tierras, perforaciones, excavaciones u operaciones de corte y relleno. Las emisiones de partículas varían durante el día, de acuerdo al nivel de actividad y condiciones meteorológicas del sitio (US EPA, 2020b).

La estimación de emisiones por actividades de construcción consta de diferentes operaciones. Cada actividad tiene una duración propia y generación de partículas diferente. En otras palabras, las emisiones se pueden generar en cualquier sitio de construcción. La cantidad de emisiones de partículas de las operaciones de construcción es proporcional al área que se trabaja y al nivel de actividad de construcción (US EPA, 2020b).

Con frecuencia es necesario estimar las emisiones por actividades de construcción en toda un área, sin tener en cuenta las actividades específicas del proyecto de construcción. Por estas razones y a continuación, se muestra el método mediante el cual se estimaron las emisiones en el área de construcción del RPV.

3.3.1.1 FACTOR DE EMISIÓN

El valor que se presenta a continuación, fue obtenido mediante estudios de campo por Jutze & Axettell (1986) que relaciona las emisiones por actividades de construcción directamente.

FE= 2.69 Mg/hectárea-mes de actividad

De acuerdo con las mediciones de campo las concentraciones del factor de emisión corresponden a las concentraciones de Partículas Totales Suspendidas (PST). El factor de emisión es útil para desarrollar estimaciones totales de actividades de construcción esparcidas en la zona de ampliación del RPV debido a que el valor es aplicable en operaciones con las siguientes características:

- Nivel de actividad medio
- Contenido de limo moderado
- Clima semiárido

Debido a que el factor de emisión se refiere a las PST, se usaron parámetros de corrección para estimar PM_{10} y $PM_{2.5}$. 0.6 y 0.5 para PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente de acuerdo con la (US EPA, 2020b).

Aunque el factor de emisión anterior representa un medio relativamente sencillo de realizar el inventario de emisiones para toda el área, al menos dos características limitan su utilidad para sitios específicos de construcción.

- a) La naturaleza conservadora del factor de emisión puede resultar en una sobreestimación para PM_{10} o $PM_{2.5}$
- b) El factor de emisión no proporciona información sobre qué actividades de construcción en particular tienen el mayor potencial de emisión en el sitio

Por estas razones, el uso de este factor de emisión solo se utilizó para el sitio de construcción en general del RPV. Cabe señalar que el factor de emisión no considera medidas de control de emisiones en el área de construcción (US EPA, 2020b).

3.3.2 EMISIONES POR ACTIVIDADES DE DRAGADO

Las embarcaciones portuarias, como las dragas, suelen pasar la mayoría de tiempo de funcionamiento cerca del puerto. Estas embarcaciones suelen tener motores de categoría 2 (C2) y utilizan diésel (US EPA, 2020c). Las emisiones de este tipo de embarcaciones deben estimarse dentro de todas las embarcaciones portuarias que operan dentro del puerto. Sin embargo, no siempre se consideran debido a que sus actividades son consideradas de paso, en otras palabras, fuera del dominio geográfico.

Las dragas suelen tener dos tipos de fuentes de emisión de acuerdo con la US EPA. Estas fuentes son:

- Motores de propulsión
- Motores auxiliares

Al estimar las emisiones por dragas, se consideraron dos modos de operación (estadía y tránsito), modos contemplados de acuerdo con la metodología de la US EPA (2020). Cuando la draga se encuentra en estadía, se consideró que el motor auxiliar está en marcha, pero no sus motores de propulsión. Por otro lado, cuando se está en tránsito se considera que los motores principales y auxiliares están en funcionamiento. Las emisiones por la draga se estimaron para cada modo de operación con las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 7-8).

$$E_T = (P_p \times LF_p \times FE_p + P_a \times LF_a \times FE_a) \times A_T \quad (Ec. 7)$$

$$E_E = P_p \times LF_p \times FE_p \times A_E \quad (Ec. 8)$$

Donde:

E_T = emisiones en tránsito (g)

E_E = emisiones en estadía (g)

P_p = potencia total instalada del motor de propulsión (kW)

LF_p = factor de carga del motor de propulsión

FE_p = factor de emisión del motor de propulsión (g/kWh)

P_a = potencia total instalada del motor auxiliar (kW)

LF_a = factor de carga del motor auxiliar

FE_a = factor de emisión del motor auxiliar (g/kWh)

A_T = actividad en modo de tránsito

A_E = actividad en modo de estadía

Los factores de emisión para dragas dependen de la categoría y nivel de motor. La Tabla 22 muestra cómo determinar si un motor de propulsión de una draga es C1 o C2 a partir del desplazamiento del cilindro en el motor.

Tabla 22. Clasificación de motores C1 y C2

Categoría del motor	Nivel del motor	Desplazamiento del cilindro
1	Sin control 1,2	< 5 L
	Sin control 3,4	< 7 L
2	Sin control 1,2	>5, ≤ 30 L
	Sin control 3,4	>7, ≤ 30 L

Referencia: (US EPA, 2020c)

3.3.2.1 POTENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

La categoría del motor, la potencia instalada y las horas de funcionamiento son datos importantes para calcular la actividad. Debido a que solo se dispone de datos locales sobre el tipo de draga (tolva), pero no el tamaño del motor de la draga utilizada en el proyecto, se utilizó la siguiente clasificación de potencia total promedio en los diferentes tipos de dragas (Tabla 23).

Tabla 23. Potencia total promedio instalada por tipo de draga (kW)

Tipo de draga	Potencia total instalada
Pala	1,600
Tolva	7,272
Succión	2,093
Arrastre	7,161
Indefinida	5,028

Referencia: (US EPA, 2014)

3.3.2.2 FACTORES DE EMISIÓN

Los factores de emisión varían de acuerdo a la categoría del motor (C1 o C2), el grupo (principal o auxiliar), la potencia del motor, año del modelo, y nivel de azufre en el combustible (Anderson & Barkdoll, 2010; US EPA, 2020c). De acuerdo a la Metodología de la US EPA, para los inventarios del 2012 y posteriores se supone que las embarcaciones de categoría C2 están utilizando diésel bajo en azufre (USLD) para cumplir las regulaciones de nivel de azufre en el combustible (US EPA, 2008).

Los factores de emisión que a continuación se muestran (Tabla 24), se utilizaron ya que se desconoce el cilindraje y la potencia total instalada en la draga. Los factores de emisión de COV se calcularon como 1.053 los factores de emisión de HC, los factores de emisión de CH₄ como el 2 % de los factores de emisión de HC de acuerdo con Cooper & Gustafsson (2004).

Tabla 24. Factores de emisión promedio por nivel de motor (g/kWh)

Nivel del motor	FE NO _x	FE PM ₁₀	FE PM _{2.5}	FE COV	FE CO	FE CO ₂	FE SO ₂
Sin control	10.2815	0.2589	0.2511	0.2956	1.6126	679.47	0.0062
1	9.6240	0.2589	0.2511	0.2956	1.6126	679.47	0.0062
2	5.6422	0.1480	0.1436	0.2956	0.9187	679.47	0.0062
3	4.7492	0.0804	0.0804	0.1247	0.9187	679.47	0.0062
4	1.3	0.0291	0.0291	0.1247	0.9187	679.47	0.0062

Referencia: (US EPA, 2017b)

Debido a que los factores de carga locales no están disponibles para los motores de la draga presente en el proyecto, se utilizó un valor medio de 0.66 para los motores principales y 0.43 para motores auxiliares de acuerdo con Anderson (2008).

3.4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DEL SUELO DESCUBIERTO

El índice de suelo descubierto (BSI) es un indicador numérico que combina bandas espectrales azul, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta para capturar las variaciones del suelo. Estas bandas espectrales se utilizan de forma normalizada (Sykas, 2020). El infrarrojo de onda corta y las bandas espectrales rojas se utilizan para cuantificar la composición mineral del suelo, mientras que las bandas espectrales azul e infrarrojo cercano se utilizan para mejorar la presencia de vegetación. El índice BSI se puede utilizar en numerosas aplicaciones de detección remota, como mapeo de suelos, identificación de cultivos, áreas en construcción, deforestación, etc.

En este caso, el índice BSI se utilizó para identificar aquellas áreas en construcción y suelos descubiertos (terreno ganado al mar) dentro del sitio de ampliación del RPV. El índice BSI se calculó mediante la siguiente ecuación (Ecuación 9).

$$BSI = \frac{(R + SWIR) - (NIR + B)}{(R + SWIR) + (NIR + B)} \quad (Ec. 9)$$

Donde:

BSI= índice de suelo descubierto

NIR = valores de píxel de la banda infrarroja cercana

SWIR= valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta

R= valores de píxel de la banda roja

B= valores de píxel de la banda azul

Los datos que se usaron para el cálculo provienen del satélite LANDSAT 8 OLI/TIRS. Se eligió este satélite debido a la accesibilidad de la información y la resolución de sus bandas espectrales (Tabla 25). LANDSAT 8 completa su órbita a la tierra cada 16 días, suministrando la información en escenas de 190x180 km en formato GeoTIFF y un archivo de metadatos MTL (USGS, 2017).

Tabla 25. Bandas espectrales del satélite LANDSAT 8

Banda	Nombre	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
1	Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
8	Pancromática	0.503 - 0.676	15
9	Cirrus	1.363 - 1.384	30
10	TIR 1	10.60 - 11.19	100
11	TIR 2	11.50 - 12.51	100

Referencia: (USGS, 2018)

Los datos fueron descargados desde el portal “Earth Explorer” del Servicios Geológico de Estados Unidos (USGS), por sus siglas en inglés. La descarga se realizó utilizando el área de estudio con los intervalos de fecha del 01-07-2017 al 31-12-2020, con un porcentaje de nubosidad de 0-100 %. Se selecciona este intervalo de nubosidad debido a que en muchas ocasiones la escena puede tener un % alto de nubes, sin embargo, el área de interés no puede estar influenciado por este parámetro.

Cabe señalar que la nubosidad hace que la información obtenida (píxeles) aparezca perturbada y por ende sea errónea (Nobakht et al., 2021).

El procesamiento, tratamiento y corrección de las escenas fueron realizadas mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) “QGIS” en su versión 3.24.0 “Tisler”. La corrección atmosférica se realizó con el complemento de QGIS “Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)” en su versión 7.10.6. El complemento SCP permite la clasificación de imágenes de teledetección, proporcionando herramientas para su descarga, preprocesamiento y postprocesamiento de imágenes satelitales. Las escenas obtenidas (Figura 14-15) permiten visualizar el área de construcción en general (cuadro rojo), así como el área de terreno ganado al mar. Estas áreas son importantes de determinar para su uso en el cálculo de emisiones de área por actividades de construcción en general y a su vez poder sustentar al modelo de dispersión CALPUFF para su simulación.

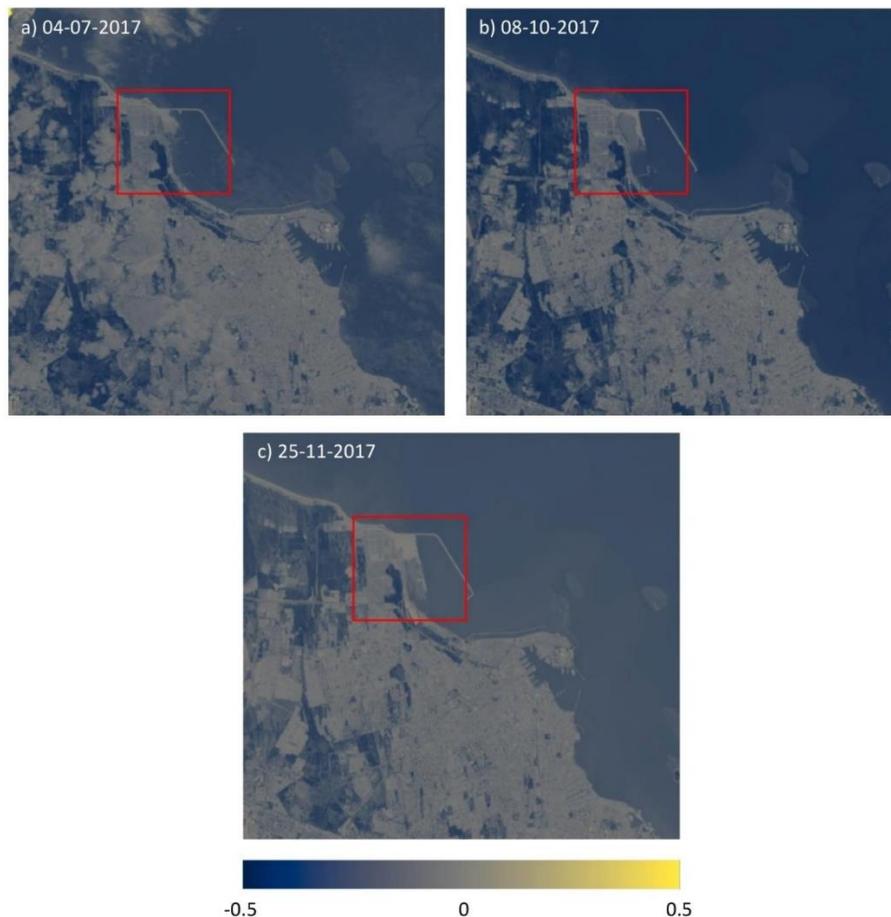


Figura 14. Índice BSI para el RPV (2^{do} semestre 2017)

En la Figura 15 se identifica el sitio de ampliación del RPV, donde se puede apreciar cómo a través del tiempo fue incrementando el área de terreno ganado al mar. El índice BSI permite diferenciar rápidamente entre suelo descubierto o áreas construidas de las áreas con vegetación. Intervalos < 0 muestra las áreas con algún tipo de vegetación (entre mayor sea el valor la vegetación es más abundante). Por otro lado, intervalo > 0 muestra las áreas de suelo descubierto (entre mayor sea el valor el área se considera construida). Valores en el intervalo de 0.15-0.30 indica suelo descubierto.

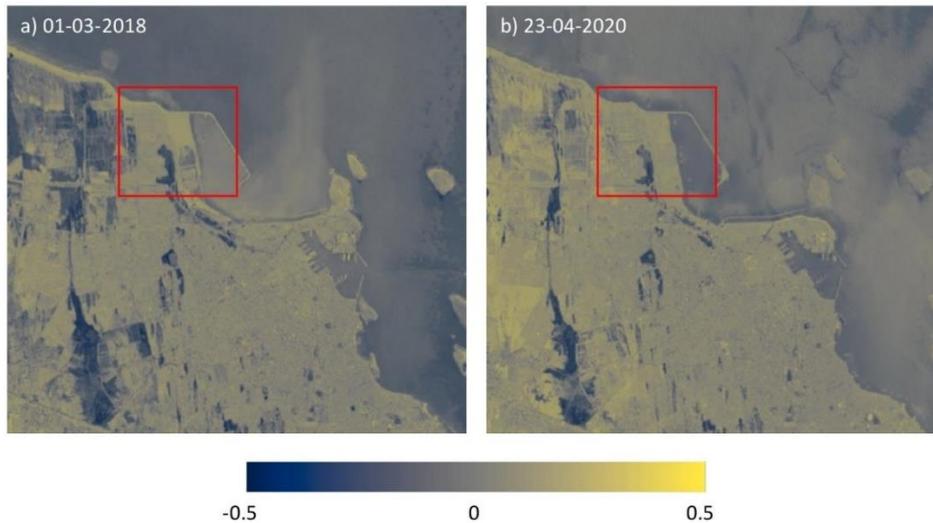


Figura 15. Índice BSI para el RPV (2018-2020)

Hay que tener en cuenta que los valores del índice BSI se ve influenciado por las estaciones del año, principalmente la temporada de “Secas” de octubre-marzo donde la poca precipitación, altas temperaturas y movimiento de tierras en la agricultura se reflejan en las escenas y por ende en el índice espectral. En la Figura 15 se aprecia la evolución en el terreno ganado al mar en el RPV, donde en a) el índice indica que existen áreas de suelo descubierto, sin embargo, no toda el área de terreno ganado al mar se debe considerar debido a que existen “manchas” en el área ($BSI < 0.15$). Estas “manchas” indican que las actividades de terreno ganado al mar y de relleno aún no culminan. En la Figura 15b se puede identificar que las actividades de terreno ganado al mar y de relleno ya finalizaron, debido a que en el área de construcción en general se presenta un índice ≥ 0.15 y constante. Es importante resaltar que el índice BSI ayuda a identificar aquellas áreas de suelo descubierto, en otras palabras, áreas de suelo propenso a erosión eólica (suspensión y resuspensión de partículas).

3.5 MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF

CALPUFF es un sistema de modelado avanzado meteorológico y de la calidad del aire en estado no estacionario (Lagrangiano-Gaussiano) desarrollado por científicos de *Exponent, Inc* (Lakes, 2021). El modelo ha sido catalogado por la US EPA como un modelo para evaluar el transporte de largo alcance, transformación, remoción e impactos de algún contaminante (Zamora, 2019). El modelo consta de tres componentes principales y un conjunto de programas de preprocesamiento y postprocesamiento (Exponent, 2020) (Figura 16).

Los componentes principales del sistema de modelado son CALMET (modelo meteorológico tridimensional de diagnóstico), CALPUFF (modelo de dispersión de la calidad del aire) y CALPOST (paquete de postprocesamiento). Además de estos componentes, hay muchos otros procesadores que se pueden usar para preparar datos geofísicos (uso de la tierra y terreno); datos meteorológicos (superficie, aire superior, precipitación y datos de boyas); e interfaces de modelos como el Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Eta/NAM o RUC de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), Weather Research and Forecasting (WRF) y RAMS (Exponent, 2020; Scire et al., 2000).

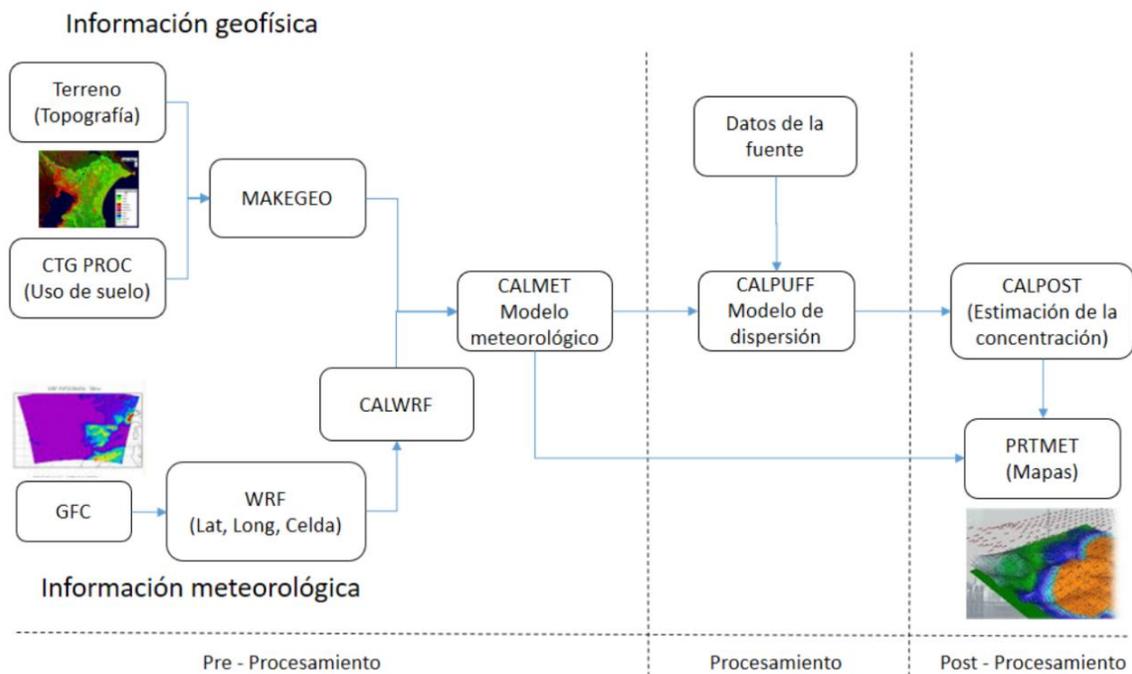


Figura 16. Componentes y procesadores de CALPUFF
Referencia : (Scire et al., 2000)

A continuación, se describen los componentes principales del modelo CALPUFF.

CALMET: es el modelo meteorológico generador de vientos que utiliza los datos de vientos disponibles en el dominio de modelación o modelo MM5, para generar un arreglo tridimensional de las componentes vectoriales del viento a través de la interpolación espacial de los datos (López, 2009). Los campos de viento son ajustados a través de cálculos para simular, efectos cinéticos del terreno, efectos de bloqueo y procesos de minimización de divergencia. La función de CALMET es producir e interpolar los campos de vientos y parámetros meteorológicos. CALMET considera la elevación del terreno en el área modelada de tal forma que los campos de viento consideran la topografía y reproduce las desviaciones del viento por la interacción con el terreno (Cui et al., 2020; López, 2009). Así mismo CALMET genera los campos meteorológicos bidimensionales de la altura de capa de mezcla, características de superficie y propiedades de dispersión.

CALPUFF: es el modelo para simular la dispersión de gases y partículas con variación espacial y temporal. CALPUFF es capaz de simular los procesos de dispersión, transformación y remoción de contaminantes durante su transporte (López, 2009). Tiene la capacidad de calcular las concentraciones de varios contaminantes a diferentes alturas en una sola ejecución. CALPUFF contiene algoritmos para simular los efectos físicos de la pluma de dispersión, así como el arrastre de los contaminantes causados por las interacciones de construcción u obstáculos cercanos. CALPUFF, además puede simular los efectos de remoción seca y húmeda del contaminante, así como estimar contaminantes secundarios como los sulfatos (SO_4^{-2}) y nitratos (NO_3^-) (Scire et al., 2000).

CALPOST: es el modelo de postprocesamiento diseñado para calcular los promedios de concentración y flujos de remoción basados en los datos contenidos en los archivos de salida de CALPUFF (López, 2009; Zamora, 2019). En el componente de CALPUFF se puede determinar el tiempo para obtener las concentraciones de uno o más contaminantes mediante los receptores. CALPOST es capaz de identificar las concentraciones de todo el dominio, junto con sus coordenadas UTM (Jafari et al., 2020). Los resultados se pueden reportar y exportar en diferentes formatos, por ejemplo, shape, jpg, KML, etc., para visualizarlos en programas especializados como los SIG.

3.5.1 SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio son herramientas de gran utilidad dentro de un modelo de investigación que tiene como objetivo recabar, describir, comparar, evaluar y comprender aspectos de un problema o fenómeno (Stott & Ramil, 2014). Un caso de estudio es adecuado cuando se desea obtener información en concreto de un tema específico, el cual permite explorar características y significados claves de los hechos.

En este trabajo, los casos de estudio sirvieron para identificar y comprender el comportamiento del SO₂ y partículas provenientes de las actividades de construcción y operación del proyecto de ampliación del RPV. Para esto se siguió la metodología propuesta por Stott & Ramil del 2004, la cual indica la importancia de dos puntos para la selección de los casos de estudio. Estos puntos fueron los siguientes:

- Entender los objetivos
- Acceso a la información

Stott & Ramil, indican que es esencial que los casos de estudio se deban seleccionar una vez se hayan identificado los objetivos del trabajo en conjunto con los siguientes objetos clave: zona geográfica, tamaño, cobertura, alcance, resultados e impacto. Mientras que el acceso a la información considera la disponibilidad de los datos, información, contactos y facilidad de acceso al área o zona geográfica.

Una de las limitaciones de este tema de investigación, es la confesionalidad de la información de las actividades de ampliación y operación del RPV, sin embargo, se cuenta con la información de la actividad de movimiento de buques, actividades de dragado, área de construcción y el registro del monitoreo de los contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos (Tabla 26).

Para la selección de los casos de estudio igual se consideraron las componentes del viento que provienen de la zona de ampliación (Figura 17). El punto de convergencia de las componentes fue ubicado en la ubicación de la EM, esto con el propósito de comparar las concentraciones de salida del modelo CALPUFF y las observadas por la EM. El delimitar las componentes del viento provenientes de otras zonas, permite reducir la incertidumbre de otras fuentes de emisión de las que no se cuenta información.

Tabla 26. Acceso a la información

Información	Zona geográfica	Cobertura
Movimiento de buques	Bahía norte y Bahía sur	01/01/2019-31/12/2020
Dragado	Bahía norte	13/08/2017-03/12/2017
Área de construcción	Bahía norte	01/08/2017-31/12/2020
Monitoreo de calidad del aire	Bahía norte y Bahía sur	01/08/2017-31/12/2020



Figura 17. Componentes del viento provenientes de la zona de ampliación del RPV

Los casos de estudio obtenidos (Tabla 27) son resultado de combinar el acceso a la información, objetivos, actividades de dragado, movimiento de buques, área en construcción y monitoreo. Los casos de estudio de 2017 corresponden a las actividades de dragado y preparación del sitio en el área de construcción, mientras que los casos estudio de 2019-2020 corresponden a las actividades de operación de los buques en su modo “estadía” (fuente fija) y a actividades de construcción en general en la misma zona de construcción del RPV.

Tabla 27. Casos de estudio para su simulación

Día	Componentes (frecuencia en horas)					Actividad		
	NNE	ONO	NO	NNO	N	Dragado	Construcción	Buques
01/10/2017	0	1	0	4	19	✓	✓	X
05/10/2017	7	0	6	5	6	✓	✓	X
17/10/2017	0	0	3	12	9	✓	✓	X
18/10/2017	0	0	4	9	11	✓	✓	X
24/10/2017	6	0	0	3	15	✓	✓	X
25/10/2017	2	0	1	13	8	✓	✓	X
13/11/2017	2	0	2	6	14	✓	✓	X
07/12/2017	2	0	0	4	18	X	✓	X
08/12/2017	0	0	0	18	6	X	✓	X
03/11/2019	0	0	0	0	24	X	✓	✓
09/11/2019	0	0	0	3	21	X	✓	✓
11/12/2019	0	0	0	1	23	X	✓	✓
22/12/2019	0	0	1	8	15	X	✓	✓
12/01/2020	0	0	0	6	18	X	✓	✓
20/01/2020	0	0	0	15	8	X	✓	✓
13/02/2020	0	0	0	1	23	X	✓	✓
01/06/2020	0	0	0	4	20	X	✓	✓
26/09/2020	0	0	1	15	8	X	✓	✓
30/10/2020	0	0	0	9	15	X	✓	✓
30/11/2020	0	0	1	11	12	X	✓	✓

3.5.2 PREPROCESAMIENTO

3.5.2.1 WRF-ARW

Los datos meteorológicos que se usaron en esta etapa fueron obtenidos por medio de los datos de reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los Estados Unidos (NCEP), por sus siglas en inglés. Los datos de pronóstico y análisis global utilizados fueron los GDAS/FNL a 0.25 grados con número de identificación “*ds083.3*”. Estos datos de pronóstico tiene una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ cada 6 horas (NCAR, 2021). Los datos cuentan con una resolución temporal de las 00:00 UTC del 08-07-2015 al presente.

Para el procesamiento de los datos de pronóstico y reanálisis *ds083.3*, se utilizó el modelo “WRF-ARW” versión 3.9.1.1. Primeramente, se configuró el módulo “WRF Processing System (WPS)” del WRF para la simulación meteorológica con tres dominios anidados con proyección de “Mercator”. El dominio 1 “Dominio madre” (d01) de 125x83 celdas con una resolución espacial de 25 km y centrado en las coordenadas 24.3° N y -101.7° O. Para los dominios anidados “hijos” (d02 y d03) se utilizó una relación 5:1 con respecto al d01, esto se hizo para poder tener una resolución espacial de 1 km por celda en el d03 (Figura 18). El número de celdas para los dominios d02 y d03 es de 81x71 y 61x61 respectivamente.



Figura 18. Configuración utilizada de dominios anidados

En la Figura 18 se puede observar que el d01 abarca toda la República Mexicana, mientras que los dominios d02 y d03 están sobre el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, y los municipios de Veracruz y Boca del Río respectivamente. El objetivo de utilizar dominios anidados es tener retroalimentación de los fenómenos meteorológicos del d01 en los dominios d02 y d03.

En segundo lugar (una vez configurado y ejecutado el WPS), se configura el módulo WRF. La configuración utilizada se muestra en la siguiente tabla (Tabla 28).

Tabla 28. Configuración utilizada en el WRF

Parámetro	Configuración
Uso de suelo	MODIS
Convección de cúmulos	Esquema de Grell-Freitas
Microfísica	Esquema sencillo de 3 clases (WSM 3)
Transferencia de onda larga	Modelo Rápido de Transferencia Radiactiva (RRTMG)
Transferencia de onda corta	Modelo Rápido de Transferencia Radiactiva (RRTMG)
Capa límite	Modelo de Yonsei (YSU)
Superficie del suelo	Esquema Monin-Obukhov
Capa superficial	Modelo NOAH

Los archivos de salida del WRF (wrfout_d01, wrfout_d02 y wrfout_d03), fueron transformados al formato “.dat”, por medio del software CALWRF versión 2.0.3.

3.5.2.2 CALWRF

CALWRF es un software que permite transformar archivos de salida del modelo WRF-ARW en su versión 2 o 3, creando archivos de salida en formato .dat 2D y 3D. Los archivos con formato .dat son los soportados para la entrada del componente CALMET (Exponent, 2020). Los archivos de salida del WRF que se transformaron fueron aquellos correspondientes al dominio hijo d03, dominio en el que se encuentra el área de estudio (RPV).

3.5.2.3 CALMET

En este componente se configuraron las características de la malla de simulación, así como la obtención del uso de suelo, elevación del terreno y extrapolación de parámetros meteorológicos provenientes de los archivos .dat. La descarga del uso de suelo y la elevación del terreno se obtuvieron mediante el procesador geofísico de CALMET.

Para el uso de suelo se eligieron los datos de la USGS para América del Norte a una resolución de 1 km, mientras que los datos de elevación se utilizaron los datos globales de la NASA-USGS (programa SRTM3) con una resolución de 90 m. La información obtenida se puede apreciar en las Figuras 19 y 20.

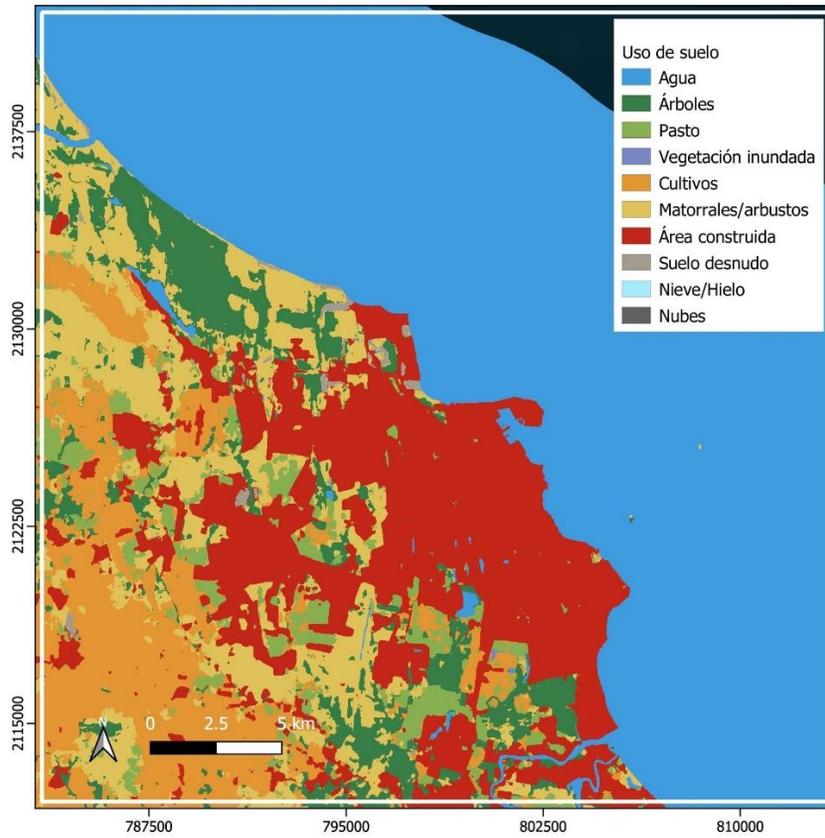


Figura 19. Uso de suelo en Veracruz

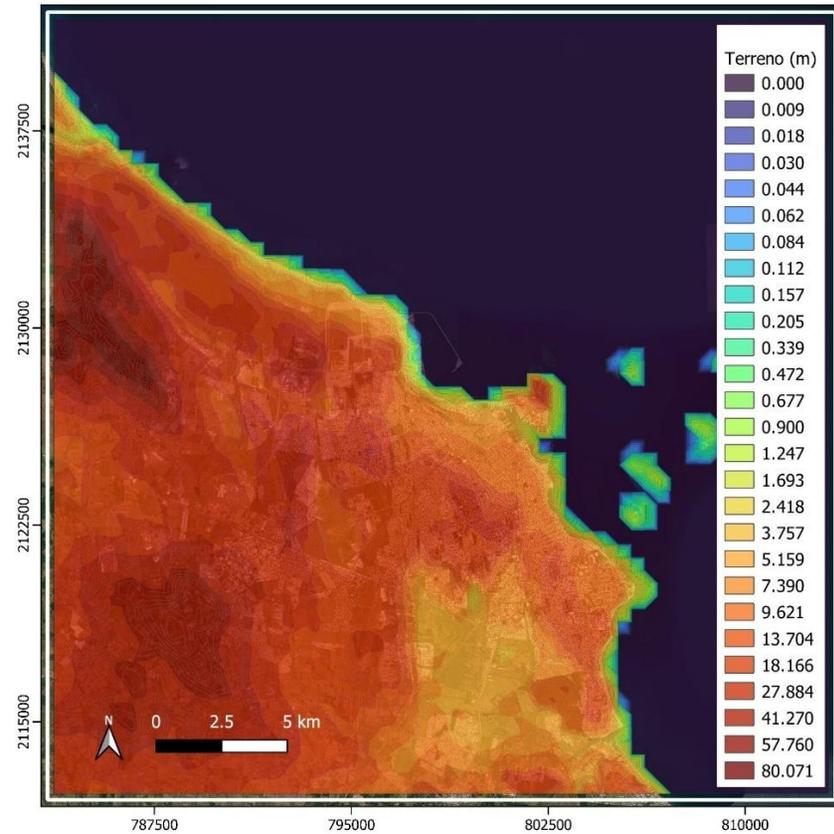


Figura 20. Elevación del terreno en Veracruz

La configuración de la malla que se estableció se describe a continuación (Tabla 29).

Tabla 29. Configuración de la malla para la simulación

Parámetro	Valor
Origen de la malla (centrado)	798427 m, 2127033 m (UTM)
Número de celdas en X, Y	60x60
Espacio entre celdas	500 m
Celdas verticales	10
Altura de la última celda vertical	2500 m
Datum	WGS-84
Zona UTM	14 N

El número de celdas verticales, así como su altura se establecieron de acuerdo con las recomendaciones (buenas prácticas) de la guía de usuario del modelo. El origen de la malla se centra en la ubicación de la EM del RPV. La malla de simulación se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Malla de simulación para los casos de estudio

Una vez configurada la malla para la simulación, y obtenido el uso de suelo y la elevación del terreno se procedió a ejecutar el módulo de CALMET para la extrapolación de los datos meteorológicos (archivos .dat) en promedio diario. CALMET es capaz de extrapolar los siguientes parámetros meteorológicos.

- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura del suelo y del aire ambiente
- Fricción del viento en superficie
- Densidad del aire
- Estabilización atmosférica
- Altura de mezcla
- Velocidad convectiva
- Precipitación
- Radiación solar
- Humedad relativa

A continuación, se muestran como ejemplos las simulaciones promedio diarias para la dirección del viento (Figura 22) y temperatura del aire ambiente (Figura 23) obtenidas mediante CALMET.

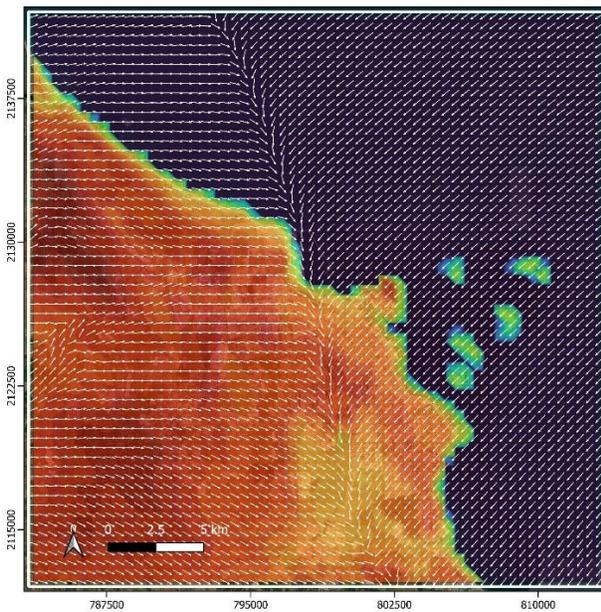


Figura 22. Dirección promedio del viento (03-11-2017)

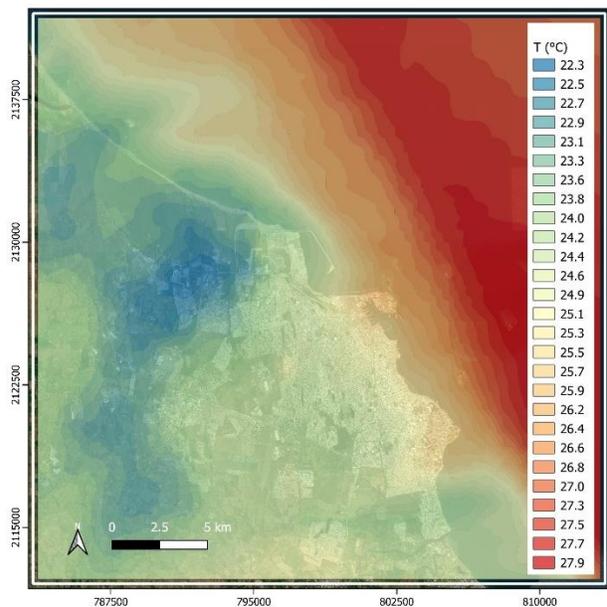


Figura 23. Temperatura promedio del aire ambiente (03-11-2017)

3.5.4 PROCESAMIENTO

3.5.4.1 CALPUFF

En este módulo se ingresaron los datos de las fuentes de emisión para su simulación (Tabla 30) y se configuraron los anillos de receptores (Figura 24). La cantidad de emisión de SO₂ y partículas fueron obtenidos mediante el inventario de emisiones por actividades de construcción (actividades de construcción en general y dragado) y del inventario de emisiones por movimiento de buques. Cabe señalar que existen otras fuentes de emisión en la zona de ampliación del RPV, sin embargo, solo se trabajó con aquellas con las que se cuenta información.

Tabla 30. Datos de las fuentes de emisión para la simulación

Parámetro	Característica/valor
Emisión	SO ₂ , partículas (kg/h)
Tipo de combustible	MDO/MGO (buques), USLD (draga)
Tipo de fuente	Puntual (buques), Área (suelo descubierto)
Ubicación (UTM)	Ubicación del muelle, puntos de dragado (véase Tabla 31)
Altura	Distintas (véase Tabla 32)
Diámetro	Distintos (véase Tabla 32)
Temperatura de gases de salida	500.15 °K (véase Tabla 33)
Velocidad de gases de salida	37.5 m/s (véase Tabla 33)

Tabla 31. Ubicación de las fuentes de emisión identificadas

Tipo de fuente	ID/Nombre	x (UTM)	y (UTM)
Puntual	BN 10/Fluidos	797399.67	2130390.65
	BN 13/Contenedores	797596.94	2129455.55
	BN 14/Contenedores	797661.30	2129124.54
	BN 16/Granel	797761.26	2128589.27
	BN 17/Carga General	797806.99	2128365.47
Área	Q/Estación ferrocarril	794404.23	2130931.78
		795571.38	2130970.76
		795577.35	2130731.94
		794426.01	2130696.24
	W/Zona de logística	795620.54	2130899.68
		796437.98	2130742.31
		796678.52	2130386.67
		796848.18	2129643.27
	796316.79	2129598.77	

Tabla 31. Ubicación de las fuentes de emisión identificadas (continuación)

Área	W2/Zona de logística	796848.18	2129643.27
			796316.79
		796323.14	2128389.18
		795818.98	2128370.87
	E/Terreno ganado	796657.00	2130591.76
		797274.23	2130567.62
		797459.37	2129894.79
		796854.76	2129835.00

Tabla 32. Altura y diámetro de los tubos de escape de buques (m)

Tipo de buque	MP		MA		Referencia
	AC	DC	AC	DC	
Automóviles	26.7	1	-	-	(Díaz, 2020)
Carga en General	27.1	0.8	25.2	0.23	(DISC, 2007)
Combustible	35.75	1.22	31.01	-	(Bedia, 2018)
Contenedores	29	1.5	28	0.34	(Rodríguez & Sánchez, 2011)
Fluidos	35.75	1.22	31.01	-	(Rodríguez, 2018)
Granel	27.2	1.9	21.7	0.65	(Liviano & Rodríguez, 2013)
Draga	28	1.5	-	-	(Bosqued, 2012)

MP= Motor principal, MA= Motor auxiliar, AC= Altura de chimenea, DC= Diámetro de chimenea

Tabla 33. Temperatura y velocidad de los gases de escape en buques

Variable	MP	MA	Referencia
Temperatura (°C)	228	330	(MAN, 2020)
Velocidad (m/s)	35	42.2	

MP= Motor principal, MA= Motor auxiliar

La configuración de los anillos de receptores que se usó fue de 6 anillos con una separación de 4 km entre ellos con una apertura de 15° (Figura 24). El uso de los anillos de receptores es necesario para poder identificar las localidades o zonas aledañas expuestas a las concentraciones provenientes de las actividades de ampliación del RPV.

Los datos de las alturas y diámetro de los tubos de escape de los diferentes motores fueron obtenidos mediante planos de arreglo general. Los datos que se usaron para las simulaciones corresponden a los del motor auxiliar, debido a que los buques en su modo de estaría solo se utilizan estos motores. En los casos donde no se tiene la información de los motores auxiliares se decidió usar la información correspondiente a los motores principales.

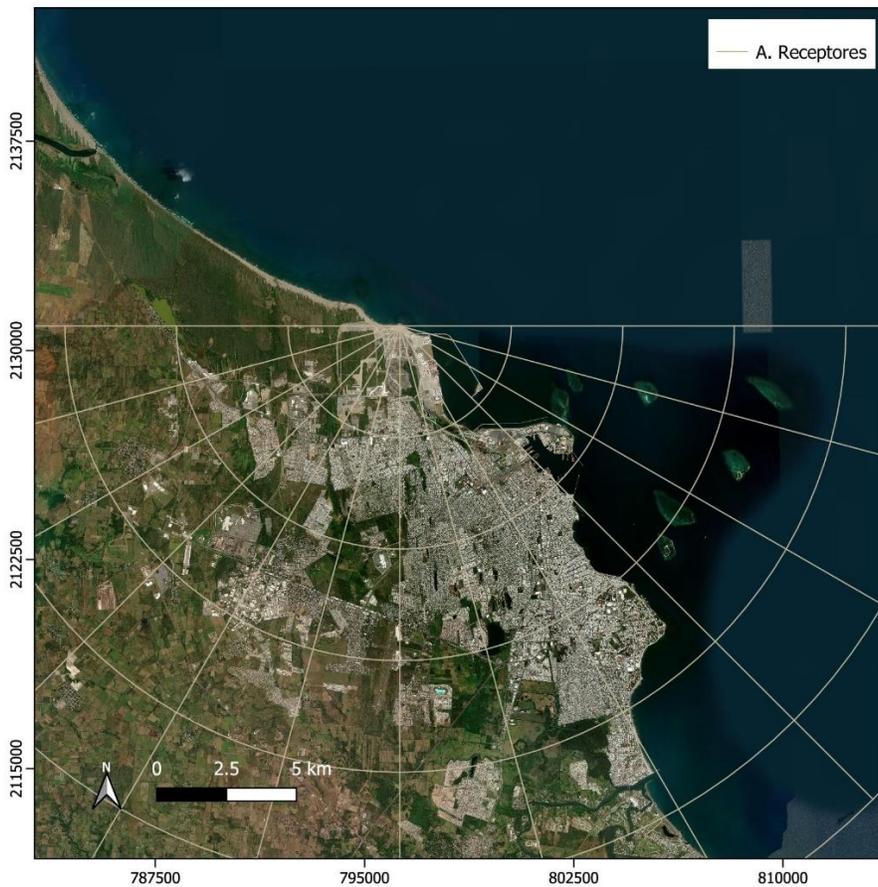


Figura 24. Anillos receptores para los casos de estudio

En la Figura 25 se pueden apreciar las distintas fuentes de emisión identificadas en la zona de ampliación. La ubicación de la draga (DGA) se fue cambiando con respecto a sus actividades realizadas y del cual se tiene registro. La bitácora de actividades del dragado cuenta con información del número de cortes realizados, ubicación UTM del corte y volumen total dragado diario.



Figura 25. Fuentes de emisión en la zona de ampliación del RPV

3.5.5 POSTPROCESAMIENTO

En este módulo se configuró el periodo promedio de salida y las especies para su visualización. El tiempo promedio que se consideró, al igual que en las otras etapas fue de 24 horas. Los resultados en esta etapa se exportaron en formato shape y kml para un mejor postprocesamiento con los SIG. El SIG que se usó fue QGIS en su versión 3.24.0 “Tisler”. Los resultados obtenidos mediante el receptor discreto se exportaron para su verificación con los datos medidos en la EM.

CAPÍTULO

4

RESULTADOS

CONTENIDO:

4.1 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA

4.2 INVENTARIO DE EMISIONES

4.3 CASOS DE ESTUDIO

4.4 VARIABILIDAD DEL DEL MODELO

4.5 ZONAS SENSIBLES A CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

4.6 ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL

4.1 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA

Los resultados que se presentan a continuación fueron obtenidos mediante el monitoreo continuo de SO₂, partículas y variables meteorológicas durante el periodo del 1 de agosto del 2017, al 31 de diciembre del 2020. Durante el periodo de monitoreo las concentraciones de SO₂ y partículas se determinaron cada 1 hora a condiciones climáticas locales, mientras que la meteorología se registró cada 10 minutos.

4.1.1 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA

Durante el período de muestreo, un grupo del instituto de geografía de la UNAM realizó la verificación de los equipos muestreadores al menos una vez cada tres meses, además de, la verificación de los sensores de presión y temperatura. Al menos una vez cada dos meses, el grupo limpió la entrada de tamaño selectivo del equipo Met One BAM-1020 para eliminar cualquier depósito dentro del impactador o las paredes de la entrada para así evitar interferencias durante la medición. La estación de monitoreo cuenta con un sistema de acondicionamiento ambiental que garantiza una temperatura constante entre 20 y 25 ° C (condiciones óptimas para el funcionamiento correcto de los muestreadores de calidad del aire). Simultáneamente, mediciones continuas de variables meteorológicas se determinan a nivel de superficie (10 metros).

Para el análisis de datos, se consideran los promedios de 1 hora calculados a partir de los registros en el equipo de monitoreo de SO₂, mientras que las partículas se toman las concentraciones reportadas directamente en promedios horarios desde el equipo. En cuanto a las variables meteorológicas, se calcularon a partir de los promedios de 10 minutos reportados por la estación de monitoreo. La gestión, procesamiento y análisis de datos se realizó utilizando los paquetes estadísticos: Excel Microsoft 365 y R studio versión 1.4.1717.

En la Tabla 34 se muestra estadística descriptiva, la cual permite darnos una idea inicial del comportamiento de los contaminantes en el periodo analizado. Teniendo medias de PM₁₀ para el 2018 y 2019 por encima de 43 µg/m³, medias para PM_{2.5} para el 2020 de 12 µg/m³. En cuanto al SO₂ se observa un aumento constante en la media a través de los años, cabe señalar que para el 2017 solo se cuenta con un registro de 5 meses. El número de datos hora es importante ya que nos permite validar los datos de monitoreo y poder cumplir con el 75 % de suficiencia de datos anual o trimestral (caso del 2017) de acuerdo con la NOM-156-SEMARNAT-2012.

Tabla 34. Estadística descriptiva para mediciones de SO₂ y partículas

Estadística	2017 ^a		2018		2019			2020	
	SO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (ppb)	PM ₁₀ ^b (µg/m ³)	PM _{2.5} ^c (µg/m ³)	SO ₂ (ppb)	PM _{2.5} (µg/m ³)
No. de datos hora	3485	3492	7702	8218	8294	6523	2107	8784	8784
Media	0.8	34.4	0.7	43.1	0.9	45.4	14.6	0.3	12
Error típico	0.02	0.45	0.16	0.56	0.01	0.40	0.26	0.007	0.14
Desviación estándar	1.4	26.9	1.5	51.4	1.7	32.8	12.1	0.7	13.2
Mediana	0.4	29	0.3	34	0.3	40	10	0.3	12
Moda	0.2	23	0.2	27	0.2	27	6	0.3	9
Mínimo	0	1	0	1	0.1	2	1	0	0
Máximo	16.08	536	32.5	985*	18.5	985*	72	16.8	100

^a Datos del 01 de agosto al 31 de diciembre de 2017

^b Datos del 01 de enero al 03 de octubre de 2019

^c Datos del 04 de octubre al 31 de diciembre de 2019

* Valor máximo de medición del equipo de monitoreo Met One BAM-1020

4.1.2 PARTÍCULAS MENORES A 10 Y 2.5 MICRÓMETROS

Las mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, indican niveles moderados en la mayoría del periodo analizado. El 50 % de los datos por hora de PM₁₀ muestran concentraciones superiores a 35 µg/m³ y otro 25 % concentraciones hasta de 21 µg/m³. Durante abril y mayo de 2019 y 2020 se observan altas concentraciones de partículas, seguido de una disminución gradual para los siguientes meses (Figura 26).

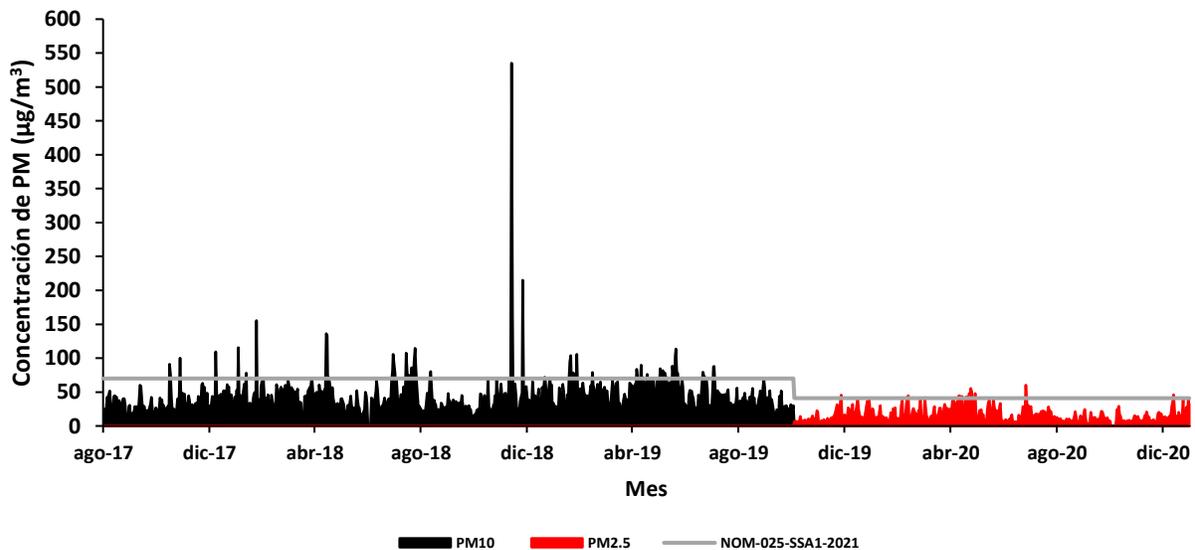


Figura 26. Distribución promedio diario de partículas

En cuanto el cumplimiento de la normatividad de calidad del aire para partículas suspendidas en México existe la NOM-025-SSA1-2021, la cual establece los valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente (DOF, 2021). La normatividad considera que la exposición límite permisible para PM_{10} es de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas y $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. En cuanto a $PM_{2.5}$ la exposición límite es de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio 24 horas y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.

De acuerdo con los resultados de las mediciones obtenidas, el valor promedio de 24 horas de PM_{10} se supera en 4 días durante el 2017, 24 días durante el 2018 y 33 día en 2019 (Figura 27-a), teniendo la concentración máxima registrada de $535 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 13 de noviembre de 2018. Los valores promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ superaron la norma 1 día en 2019 y 12 días en 2020 (Figura 27-b), teniendo la concentración promedio mayor de $60.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 26 de junio de 2020. La Figura 26 muestra el comportamiento para los promedios obtenidos de 24 horas para las PM_{10} y $PM_{2.5}$ y su verificación contra la NOM-025-SSA1-2021. En el caso del promedio anual para PM_{10} el 2018 se tiene una concentración de $43.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el 2019 una concentración de $45.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estas concentraciones por encima del límite máximo permisible anual. Para el caso de las $PM_{2.5}$ igual superan los límites máximos permisibles anuales para el 2020 teniendo una concentración anual de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La meteorología fue muy importante para entender la calidad del aire del área de estudio, en este caso específico el comportamiento del viento (dirección y velocidad) tiene una importante influencia en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo de análisis. Esta relación se evidencia en las rosas de contaminante que se muestra en la Figura 28: donde se observa que las mayores concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ provienen de vientos del norte (N) con frecuencias del 7 % y 6.5 % respectivamente, esto se asocia principalmente a las potenciales fuentes de emisiones por actividades de construcción de la zona de ampliación del RPV. En las Figuras 27 y 28-b/d, se observan las concentraciones que rebasan su norma de calidad del aire con proveniencia del este-sureste (ESE), con frecuencias del 4.8 % y 3 % respectivamente, esto relacionado con las fuentes de emisión por la operación del RPV en la bahía sur. Por último, se pueden observar concentraciones provenientes del oeste (W) y oeste-suroeste (WSW), las cuales se relacionan con el paso de camiones de carga de la avenida de acceso al RPV y a la zona urbana del municipio de Veracruz.

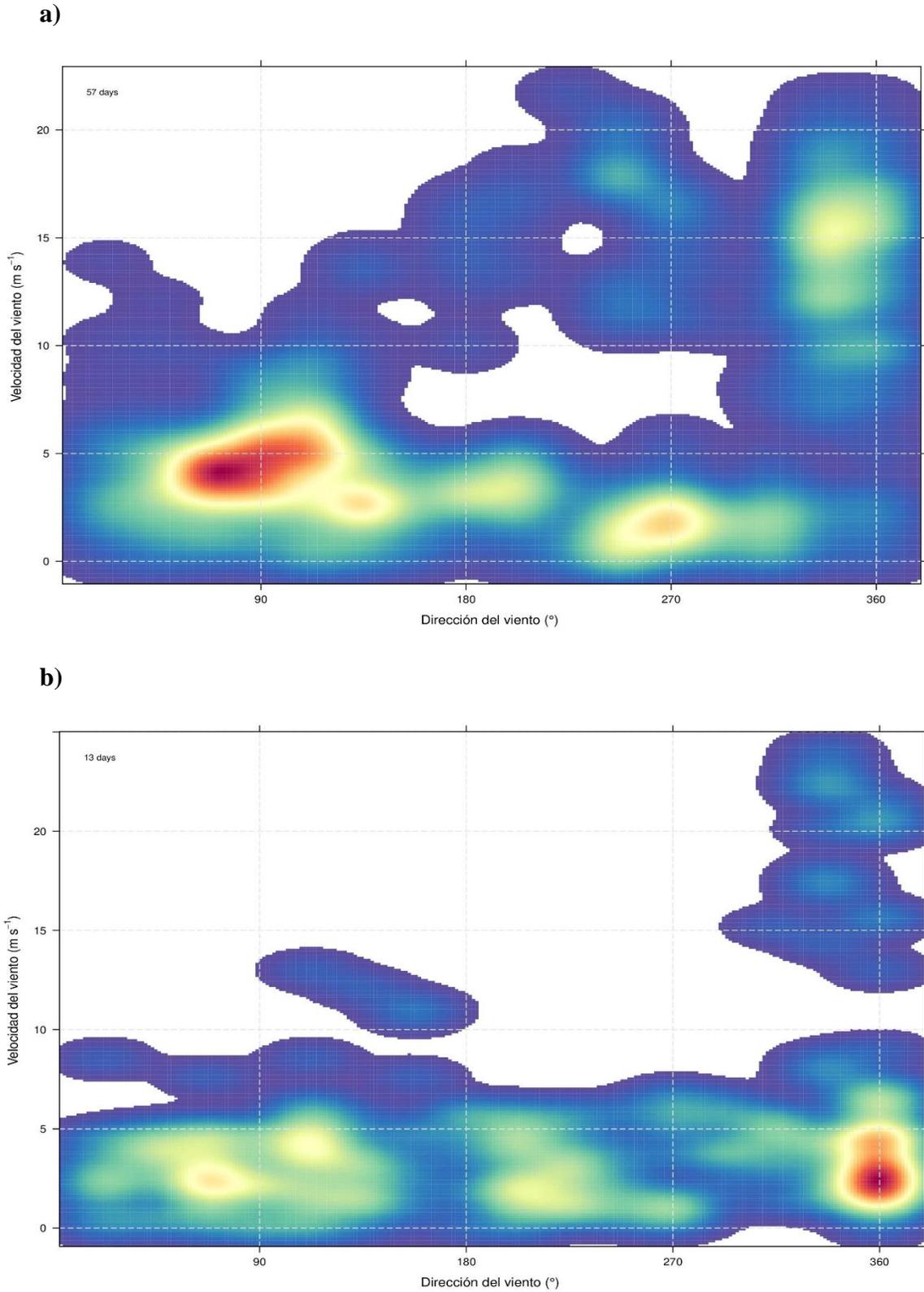
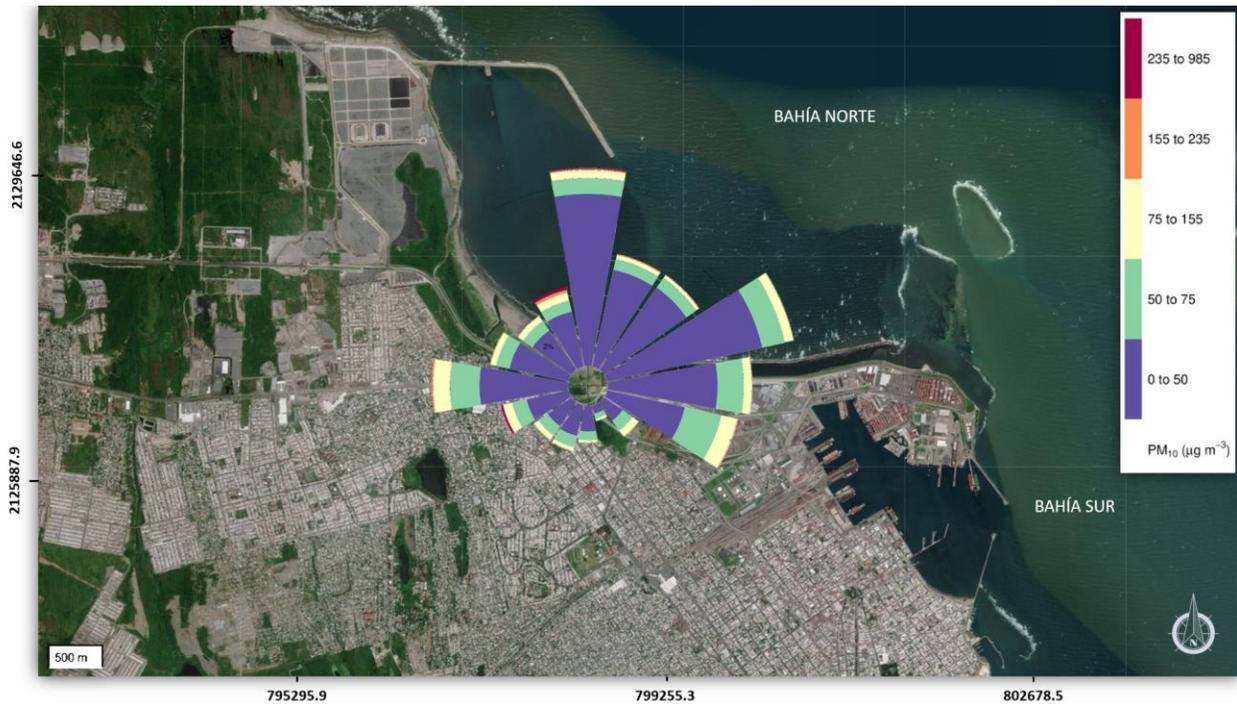
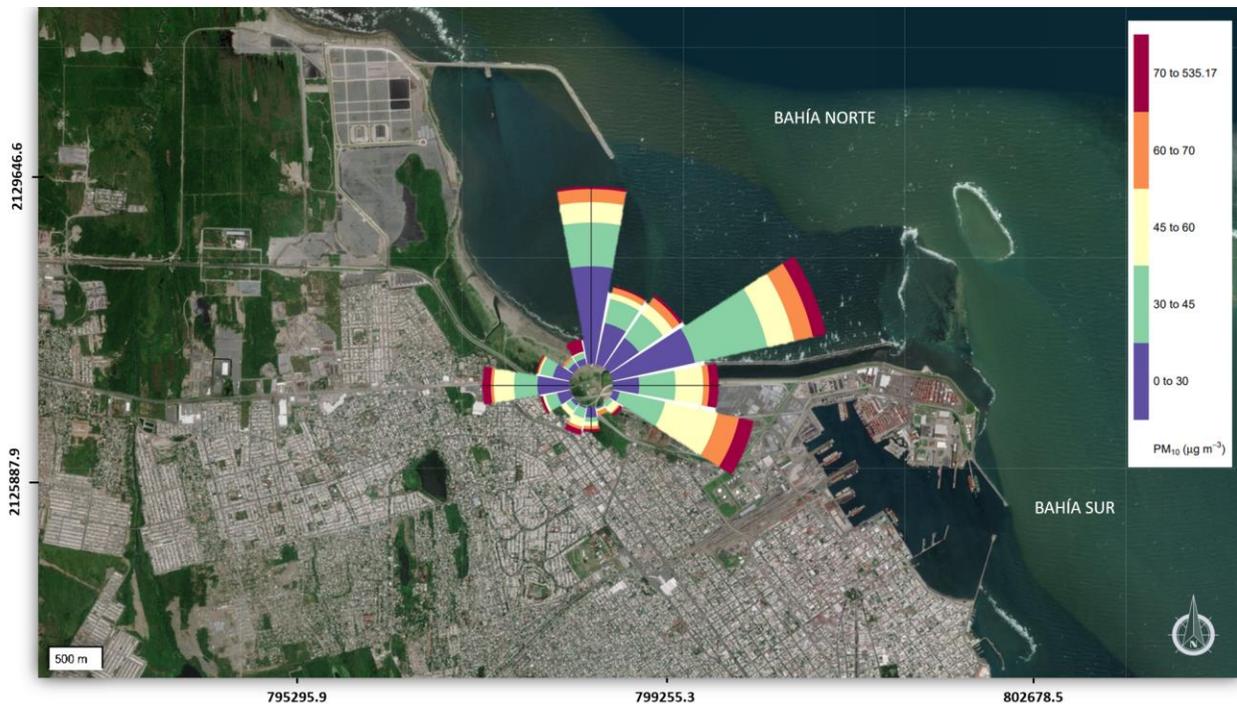


Figura 27. Densidad de Kernel para superaciones promedio diaria de partículas; a) PM_{10} , b) $PM_{2.5}$

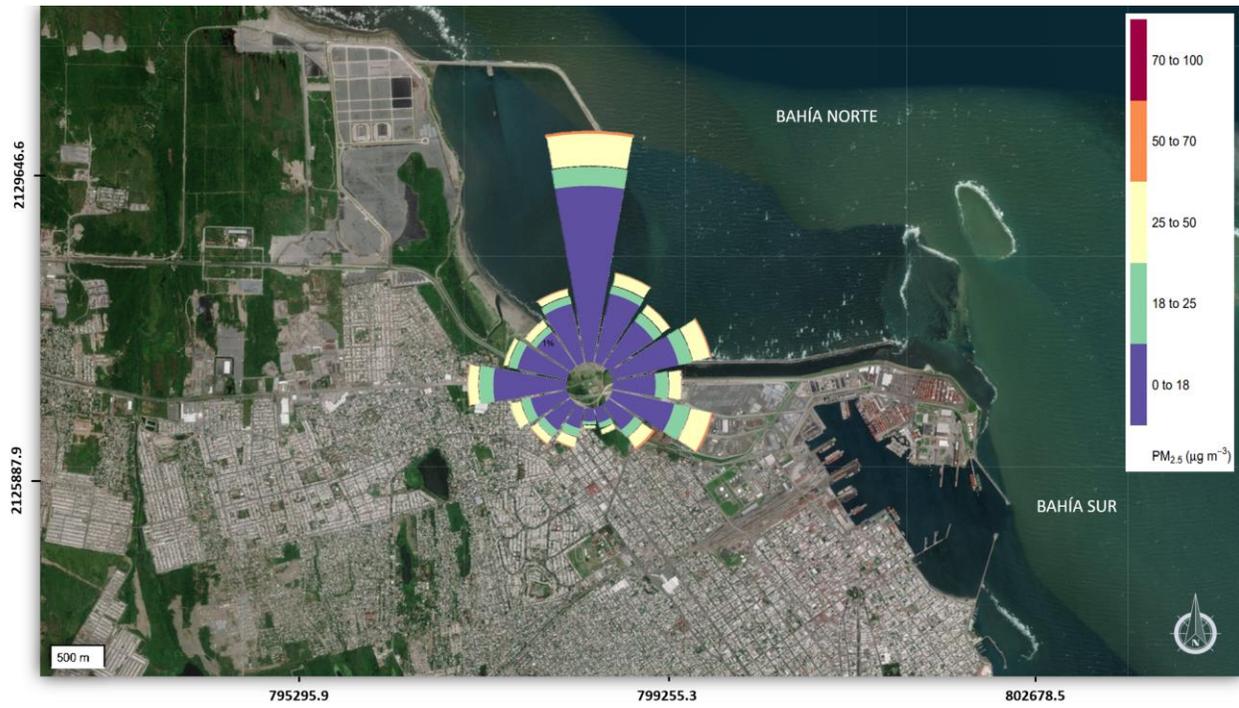
a)



b)



c)



d)

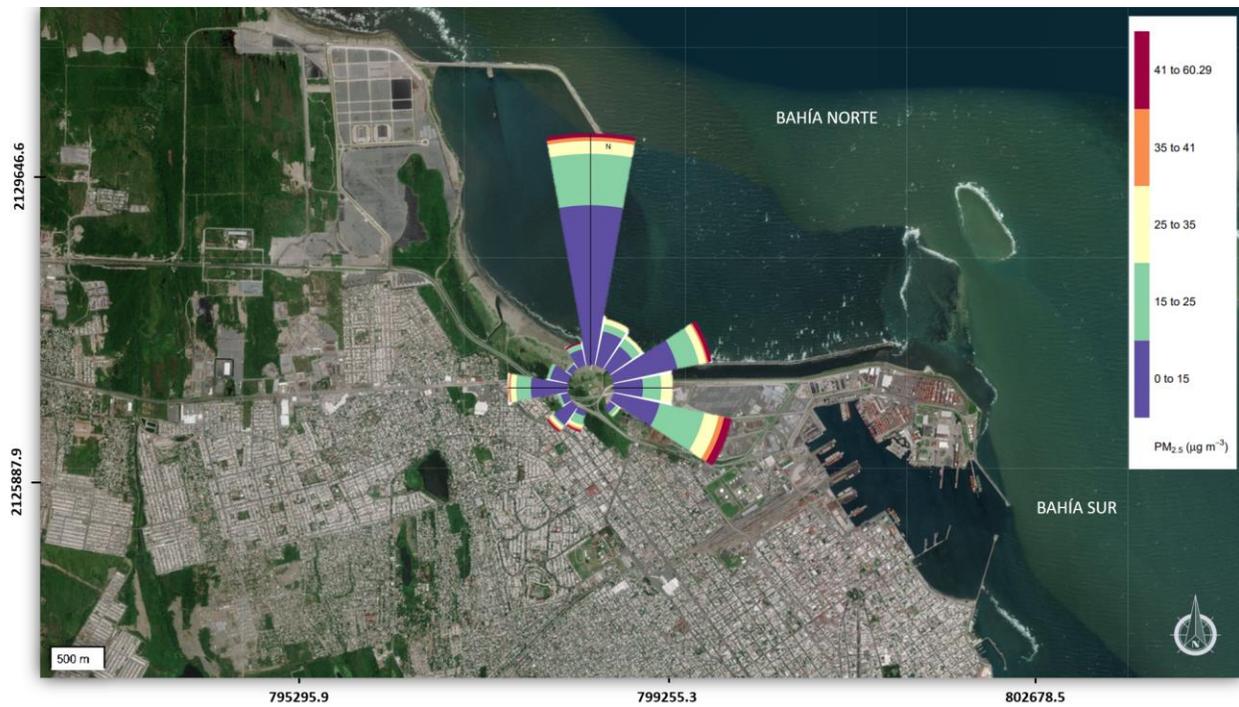


Figura 28. Rosa de contaminante para partículas; a) PM_{10} (H), b) PM_{10} (D), c) $PM_{2.5}$ (H), d) $PM_{2.5}$ (D)
 H= datos hora, D= datos promedio diario

La variabilidad de las concentraciones promedio para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se caracteriza por un aumento de concentraciones durante la mañana entre las 06:00 y 08:00, este comportamiento se le atribuye a la variación en la capa de mezcla y las velocidades del viento (> 2 m/s). La concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ es alta en la mayor parte del día, lo que explica un nivel alto de contaminación de fondo generado por la presencia de polvos en suspensión y reemisión. En la Figura 29 se puede observar estas variabilidades mencionadas, además, se puede ver nuevamente el aumento de las concentraciones de partículas entre los meses de octubre-abril. El aumento de concentraciones en estos meses se atribuye a las masas de aire frío y seco procedentes del norte del Golfo de México (eventos de norte).

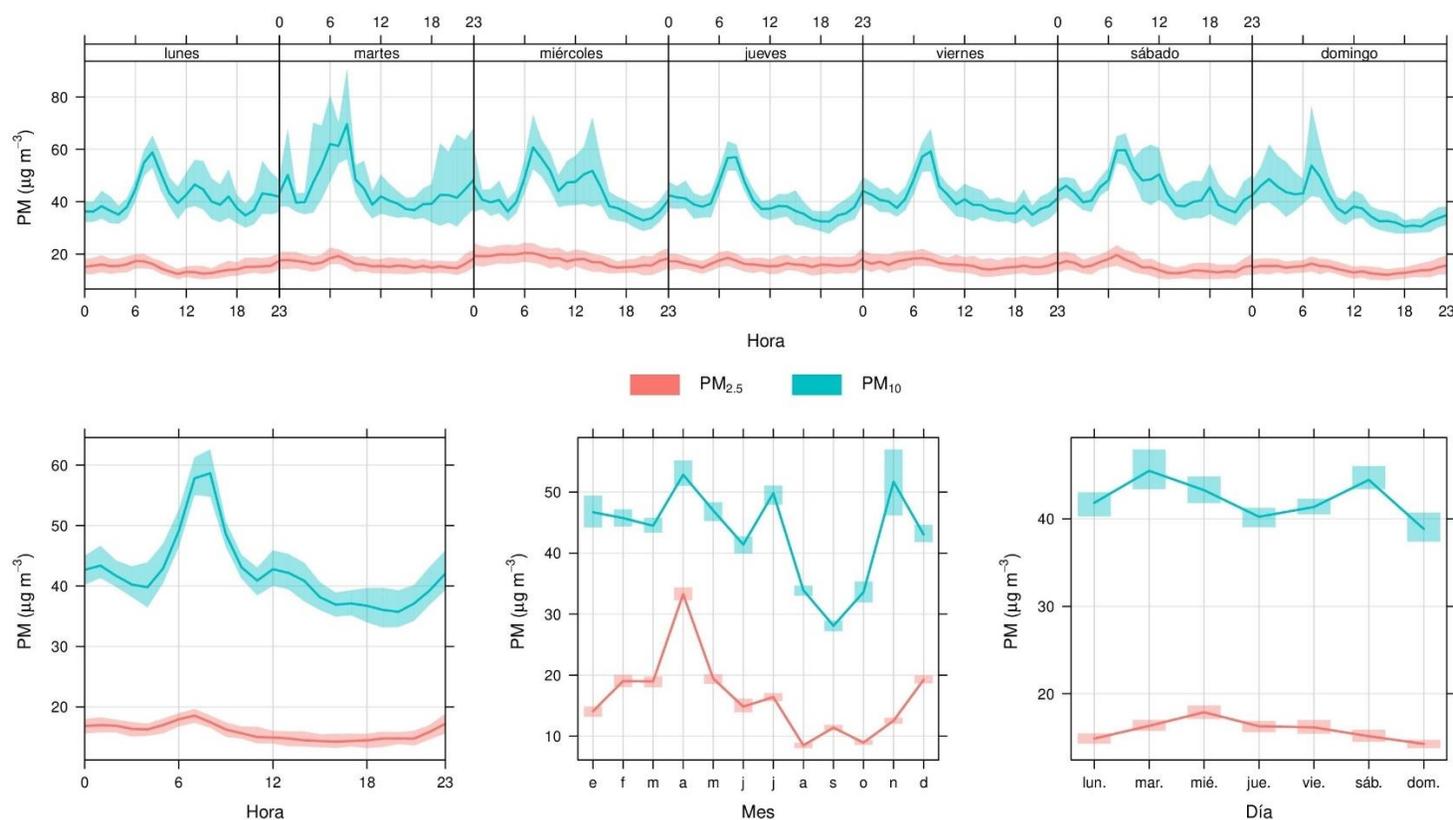


Figura 29. Variación temporal de las partículas con datos horarios (2017-2020)

4.1.3 DIÓXIDO DE AZUFRE

Para el SO_2 las concentraciones son bajas en general comparadas con los límites normados. Para el periodo analizado, el 96 % de los datos se tienen concentraciones menores a 3 ppb y menos del 0.8 % concentraciones mayores a 8 ppb. En la Figura 30 se muestra el comportamiento de las concentraciones promedio diario de SO_2 durante el periodo analizado, donde se puede observar que entre junio y octubre las concentraciones de SO_2 disminuyen significativamente. La disminución de concentración se atribuye a la temporada de lluvia y con esto su transformación del SO_2 a H_2SO_4 . En la Figura 30 se identifica una estacionalidad del contaminante durante los meses de noviembre a abril, donde se observan promedios más altos a causa de la temporada de secas (mayor número de horas luz en el día y grandes temperaturas). En cuanto el cumplimiento de la normatividad de calidad del aire para SO_2 en México, existe la NOM-022-SSA1-2019, la cual establece los valores límites permisibles para la concentración de SO_2 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud poblacional (DOF, 2019). La normatividad establece valores de concentración promedio de 24 horas de 0.040 ppm (40 ppb) y de 0.075 ppm (75 ppb) como promedio horario aritmético de 3 años consecutivos.

Los resultados de SO_2 indican que los niveles promedio de 24 horas (diarios) son inferiores a los valores límites permisibles por la NOM-022-SSA1-2019. En el caso de los promedios diarios, la concentración máxima registrada es de 5.92 ppb el día 6 de abril de 2019, 85 % menor del valor límite diario de 40 ppb. Los resultados sugieren que los niveles en la zona no representan un riesgo para la salud de la población y/o trabajadores dentro del RPV.

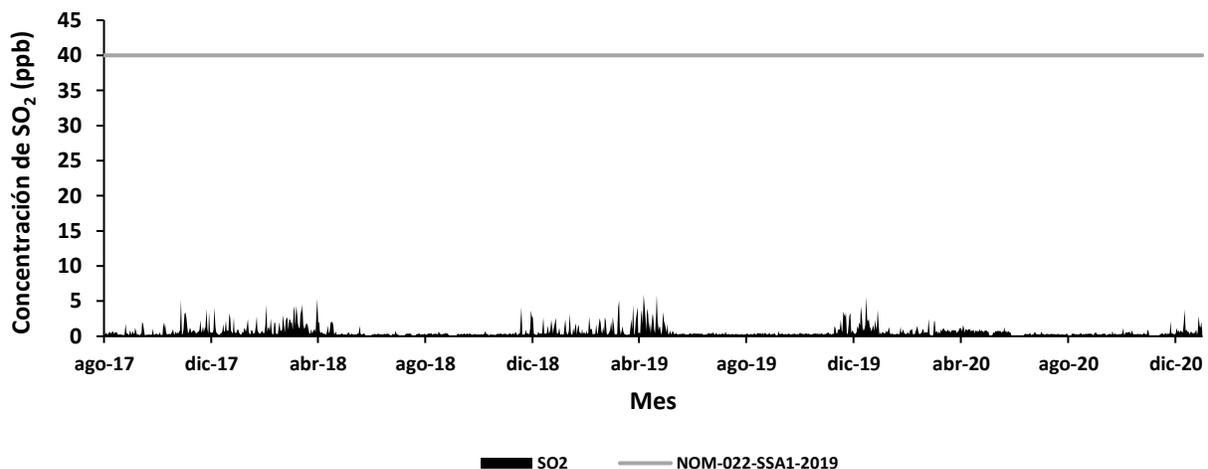


Figura 30. Distribución promedio diario de SO_2

Por otro lado, en la Figura 31 se observan las fuentes de emisión más importante durante el periodo de muestreo provienen de la dirección del este-sureste (ESE), con una frecuencia del 6.5 %, este (E) con una frecuencia de 6.2 % y del sureste (SE) con una frecuencia del 3 %, esto se atribuye que la principal fuente de este contaminante en el RPV son las emisiones por los buques de la bahía sur. El SO_2 está estrechamente relacionado con la quema de combustibles fósiles y por ende durante las operaciones de los buques. No obstante, igual se observan emisiones provenientes del norte (N) y norte-noroeste (NNW), con una frecuencia de 12.5 y 5 %, respectivamente relacionado con la actividad de camiones de carga y descarga en la zona de ampliación (bahía norte). Cabe resaltar que desde julio de 2019 operan buques en la bahía norte, aunque con menor frecuencia a diferencia de la bahía sur donde la actividad marítima de buques es mayor durante este análisis.

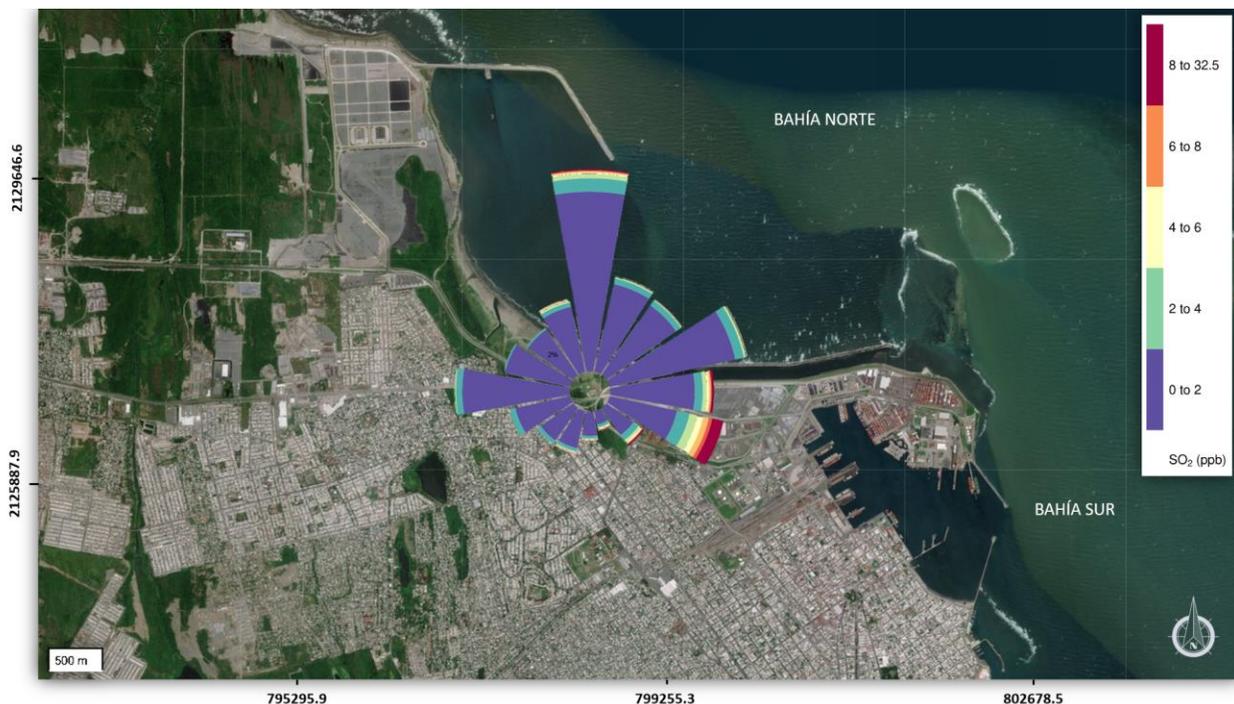


Figura 31. Rosa de contaminante para SO_2 con datos horarios (2017-2020)

La variabilidad del SO_2 se caracteriza por concentraciones bajas en los periodos nocturnos, esto se debe a que el SO_2 es un contaminante fotoquímico, su incremento se ve a partir de las 5:00 con promedios máximos entre las 12:00 y las 14:00 (Figura 32).

Teniendo en cuenta la estacionalidad identificada del contaminante, durante los meses de noviembre a abril se observan promedios más altos, esto a causa de la temporada de secas (mayor número de horas luz en el día y grandes temperaturas) y la influencia de vientos provenientes del sureste (SE). Igual se puede observar, que en temporadas de lluvias (mayo-octubre) el aumento de los promedios es mínimo.

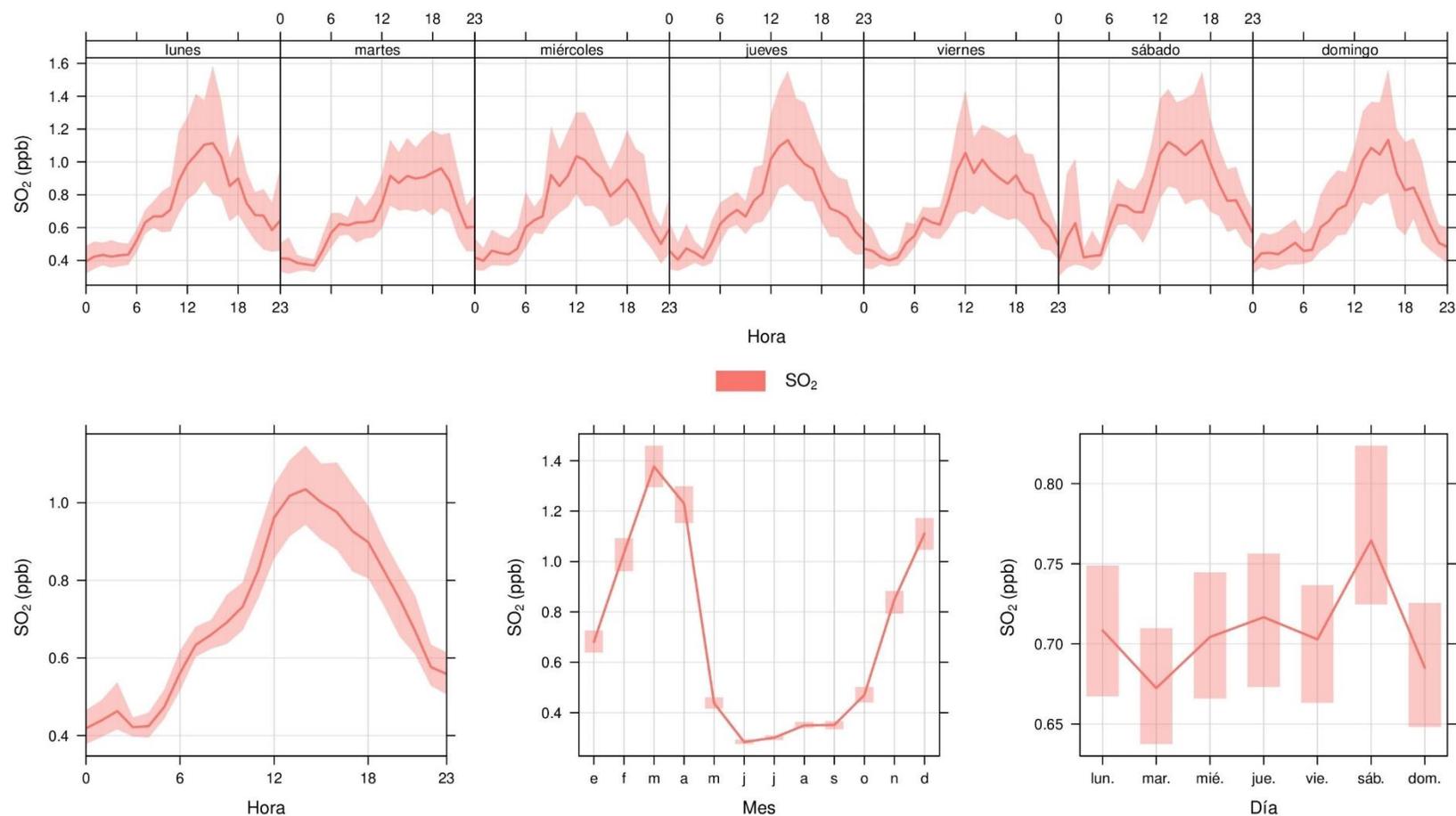


Figura 32. Variación temporal del SO₂ con datos horarios (2017-2020)

4.1.4 METEOROLOGÍA

En la Figura 33 se observan los promedios diarios obtenidos de los diferentes parámetros meteorológicos recopilados a través de la estación meteorológica. En la Figura 33 se destacan cinco periodos donde la estación de monitoreo tuvo deficiencia de datos, el primero de 01-01-2017 a 31-07-2017 debido a que la red de monitoreo meteorológica aun no entraba en funcionamiento, mientras que los siguientes periodos de 01-02-2018 a 19-02-2018, 11-06-2019 a 13-06-2019, 04-2020 a 26-04-2020 y 28-06-2020 a 01-07-2020 a causa de fallas eléctricas en el equipo.

Durante el periodo analizado, el promedio de la temperatura (T) fue de 26 °C, radiación solar (RS) de 204.6 W/m² y precipitación (Prec) de 0.015 mm, manifestando los parámetros una estacionalidad similar, aumentó durante la primavera-verano y una disminución en otoño-invierno.

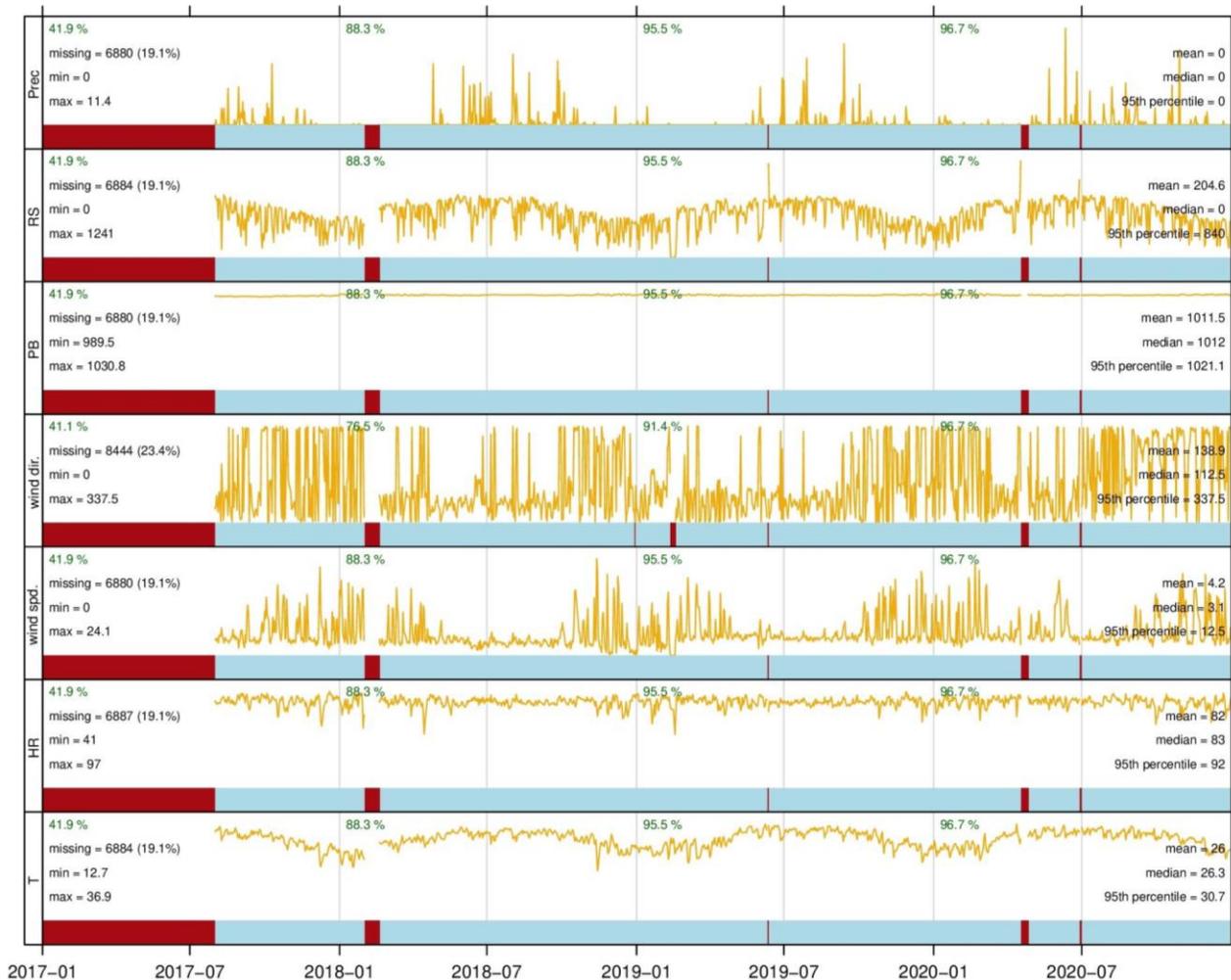


Figura 33. Variabilidad temporal de parámetros meteorológicos en el RPV

Por otro lado, la humedad relativa (HR) y la presión atmosférica (PB) mostraron un comportamiento constante durante su monitoreo. El promedio para la HR fue de 82 %, mientras que la PB fue de 1,011.5 hPa (0.998 atm).

La velocidad del viento (ws) muestra una estacionalidad inversa a las mencionadas por la T, RS y Prec, teniendo aumentos durante otoño-invierno (temporada de nortes) y una disminución en primavera-verano. El promedio del ws fue de 4.2 m/s con un 8.2 % de vientos de calma (< 2 m/s). La dirección del viento (wd) fue el parámetro meteorológico que muestro la mayor variabilidad, sin embargo, se puede apreciar (Figura 33 y 34) que las mayores velocidades del viento provienen de la componente norte (360°, 0° o N) con una frecuencia del 14 % durante el monitoreo. En la Figura 34 también se puede observar vientos provenientes de la componente este noreste (67.5 °, ENE) con una frecuencia del 10 % durante mayo-septiembre.

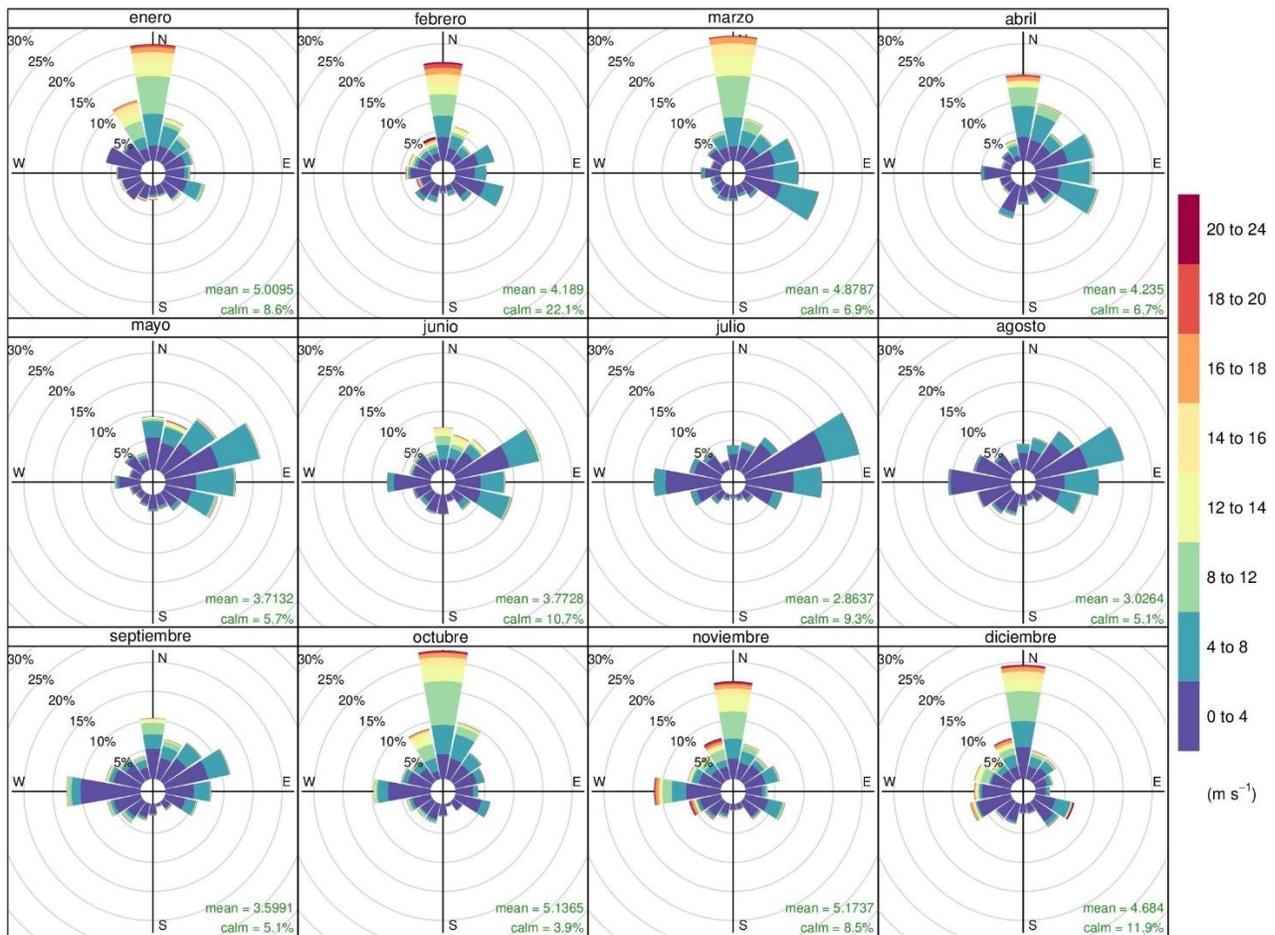


Figura 34. Rosa del viento mensual en el RPV (2017-2020)

4.2 INVENTARIO DE EMISIONES

Las emisiones estimadas para el RPV se hicieron mediante el método “*bottom up*” con la información disponible en los reportes mensuales por ASIPONA-VER (base diaria) de atraque de los buques durante el 2019 y 2020. Por otro lado, se consideraron también las emisiones generadas por la actividad de dragado y actividades de construcción en general. La información del dragado fue obtenida a través de documentación entregada por ASIPONA-VER al ICAyCC por el convenio.

4.2.1 INVENTARIO DE EMISIONES POR MOVIMIENTO DE BUQUES

Se estimaron las emisiones de SO₂, partículas, NO_x, HC, NMCOV, CO y CO₂ con las dos metodologías propuestas (US EPA y EEA/EMEP), además, se estimaron las emisiones de CN, CH₄ y N₂O utilizando la metodología de la US EPA. Las emisiones estimadas para el RPV por movimiento de buques se realizaron para sus diferentes modos de operación de maniobra, estadía y fondeo, aunque esta última sobre una base mensual debido a su resolución en los datos. El modo de tránsito se omitió debido a que no se cuenta con la información necesaria para realizar la estimación de emisiones.

En la Tabla 35 se muestra el registro mensual de los buques que atracaron en el RPV durante el 2019 y el 2020.

Tabla 35. Registro mensual por tipo de buque en el RPV de 2019 a 2020

Mes	Automóviles		C. general		Combustible		Contenedores		Granelero		Fluidos	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Enero	26	20	21	23	20	25	53	62	29	21	16	26
Febrero	22	25	12	18	15	20	42	48	34	9	15	27
Marzo	33	29	27	18	19	16	55	59	25	14	11	32
Abril	29	15	20	23	24	19	51	56	36	16	14	35
Mayo	27	6	24	20	16	16	52	52	38	15	14	36
Junio	29	10	23	16	14	12	55	46	25	15	14	29
Julio	26	18	26	19	17	10	57	51	37	22	17	32
Agosto	25	22	31	13	17	15	62	51	29	12	14	30
Septiembre	26	16	17	29	23	14	61	51	30	14	10	21
Octubre	28	2	21	39	28	19	66	58	34	14	14	39
Noviembre	21	24	29	24	17	15	57	52	22	15	13	23
Diciembre	25	26	26	26	16	15	55	55	27	15	14	25

Nota: total de buques en 2019 = 2,018; total de buques en 2020 = 1,850

Las emisiones se estimaron considerando los siguientes factores de emisiones calculados para los distintos contaminantes atmosféricos y metodologías (Tabla 36).

Tabla 36. Factores de emisión calculados mediante la EEA/EMEP y la US EPA

Contaminante	Factores de emisión (g/kWh)							
	2019				2020			
	EEA/EMEP		US EPA		EEA/EMEP		US EPA	
	MP	MA	MA	C	MP	MA	MA	C
SO ₂	15.61	15.19	11.45	15.84	2.23	2.17	2.121	2.933
PM ₁₀	2.702*	2.629*	1.08	1.43	0.227*	0.221*	0.325	0.39
PM _{2,5}	2.559*	2.49*	0.994	1.316	0.215*	0.209*	0.299	0.359
NO _x	9.9	13	9.8	2	9.9	13	9.8	2
CN	-	-	0.03	0.039	-	-	0.009	0.011
HC	1.531	0.408	0.4	0.1	1.531	0.408	0.4	0.1
NMCOV	1.5	0.4	0.421	0.105	1.5	0.4	0.421	0.105
CH ₄	-	-	0.008	0.002	-	-	0.008	0.002
N ₂ O	-	-	0.029	0.075	-	-	0.029	0.075
CO	1.650	1.606	1.1	0.2	1.650	1.606	1.1	0.2
CO ₂	710*	690*	695.702	961.8	710*	690*	695.702	961.8

MP= motor principal, MA= motor auxiliar y C= caldera

* Factores de emisión de ENTEC (2010)

Los factores de emisión utilizados fueron calculados considerando que los motores principales son de baja velocidad (SSD) y los motores auxiliares de media velocidad (MSD) para ambas metodologías. Se consideró que el combustible utilizado por los buques era gasóleo marino (MGO) o diésel marino (MDO) para los motores y la caldera, este último en el caso de la metodología de la US EPA. En el caso de los factores de emisión de SO₂, partículas y CN se consideraron los niveles máximos de contenido de azufre en los combustibles impuestos por la IMO (3.5 % de azufre en el combustible para inventarios anteriores al 2020 y 0.5 % de azufre en el combustible para inventarios a partir del 2020), con un consumo específico de combustible descrito en la siguiente tabla (Tabla 37).

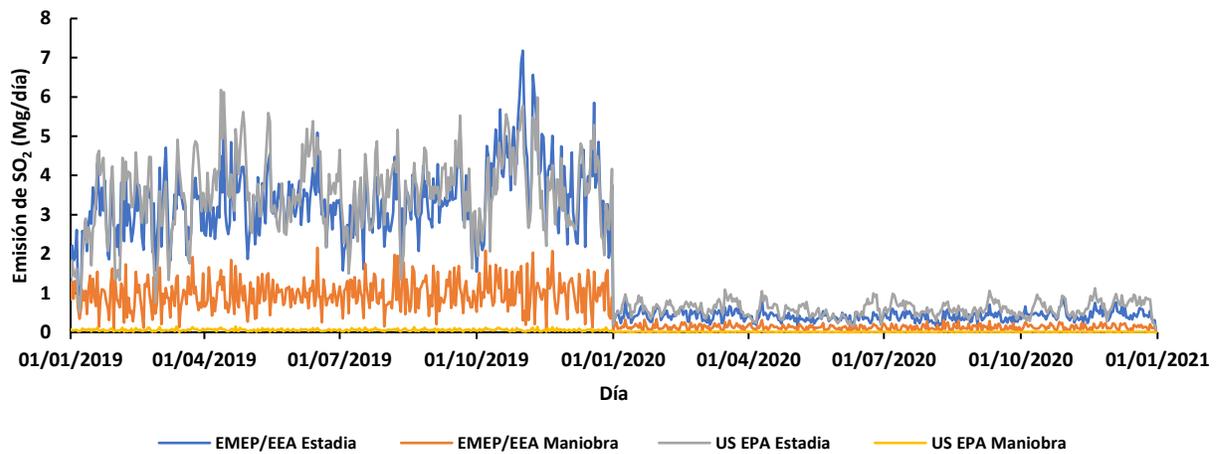
Tabla 37. SFC para motores SSD y MSD

Categoría del motor	SFC (g/kWh)	
	EMEP/EEA	US EPA
MP	223	205
MA	217	217
C	-	305

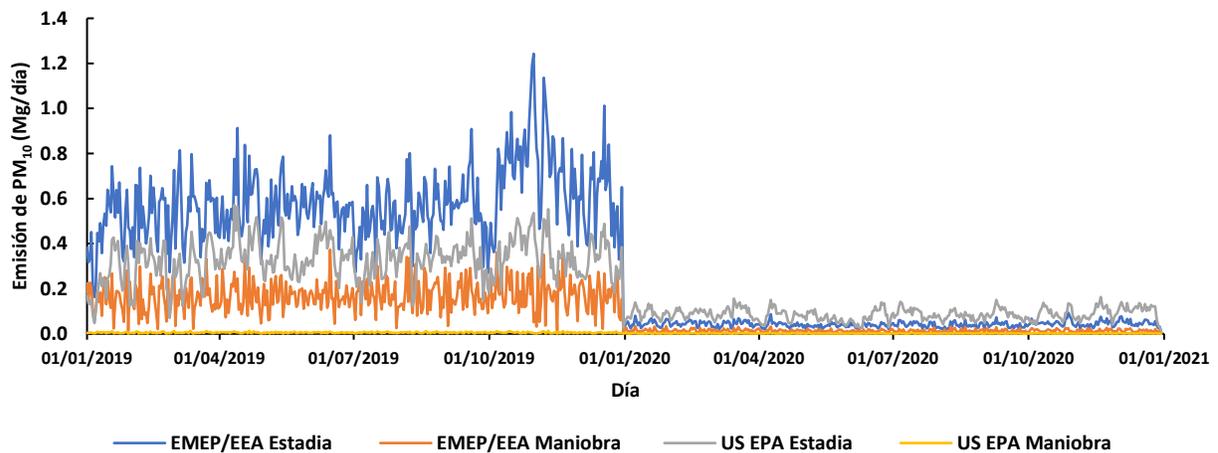
MP= motor principal, MA= motor auxiliar y C=caldera

El inventario de emisiones por actividad diaria de los buques se muestra en la Figura 35 para ambas metodologías y los contaminantes SO₂, partículas, NO_x, HC, NMCOV, CO y CO₂ en su modo de operación de estadía y maniobra. Para las emisiones de CN, CH₄ y N₂O por buques ver Anexo 1.

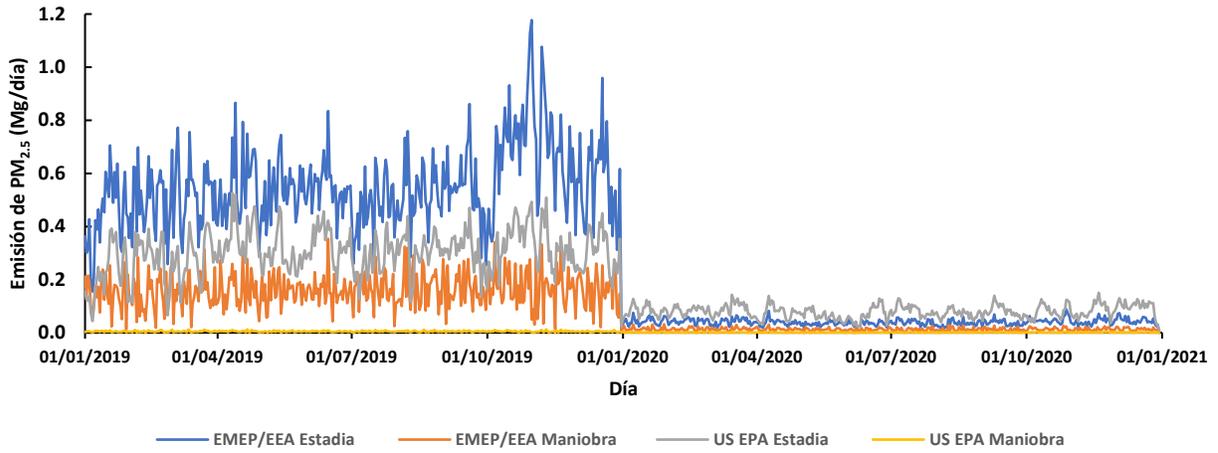
a)



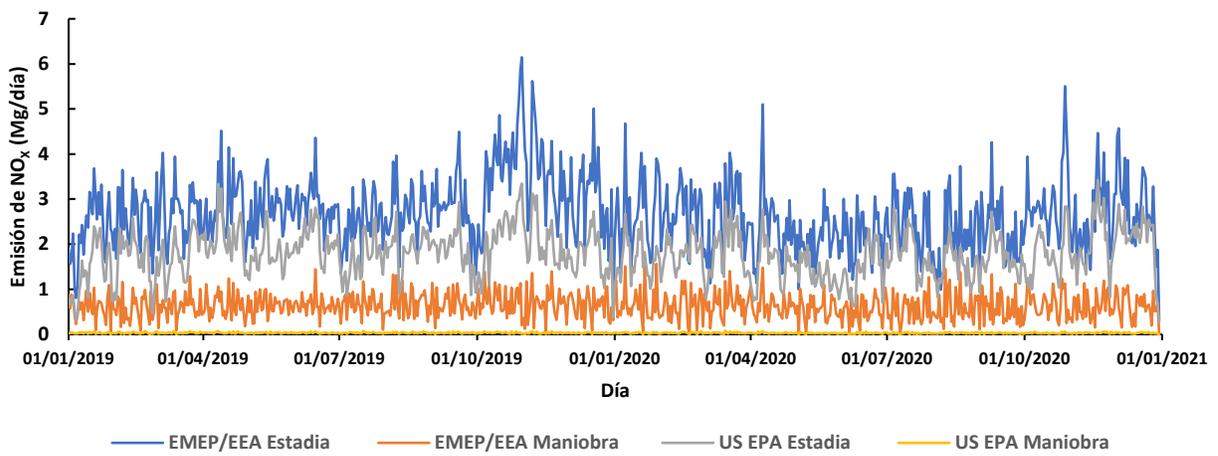
b)



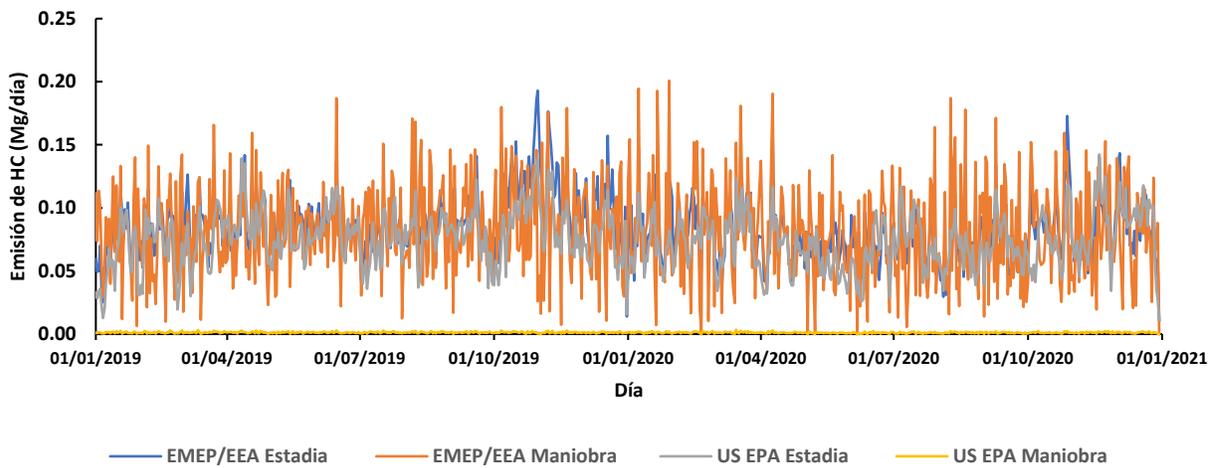
c)



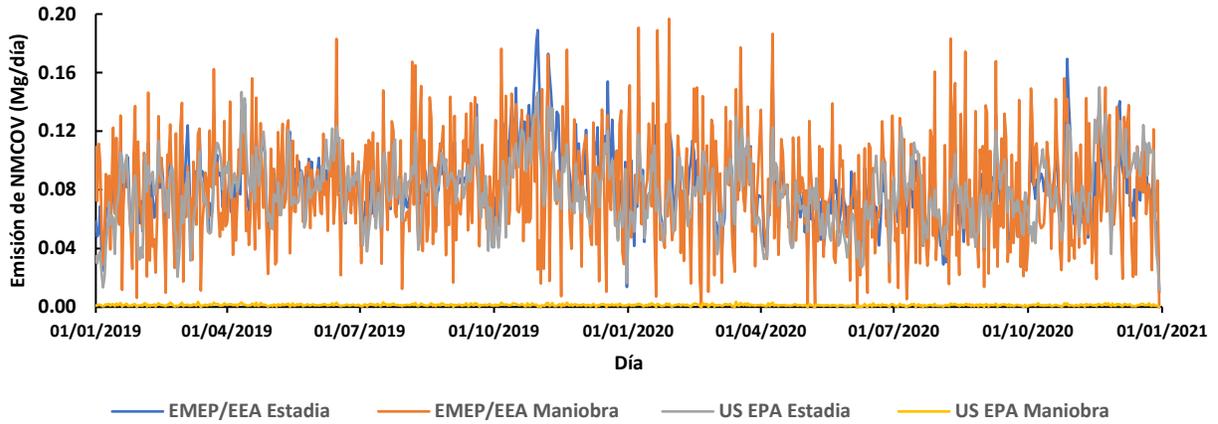
d)



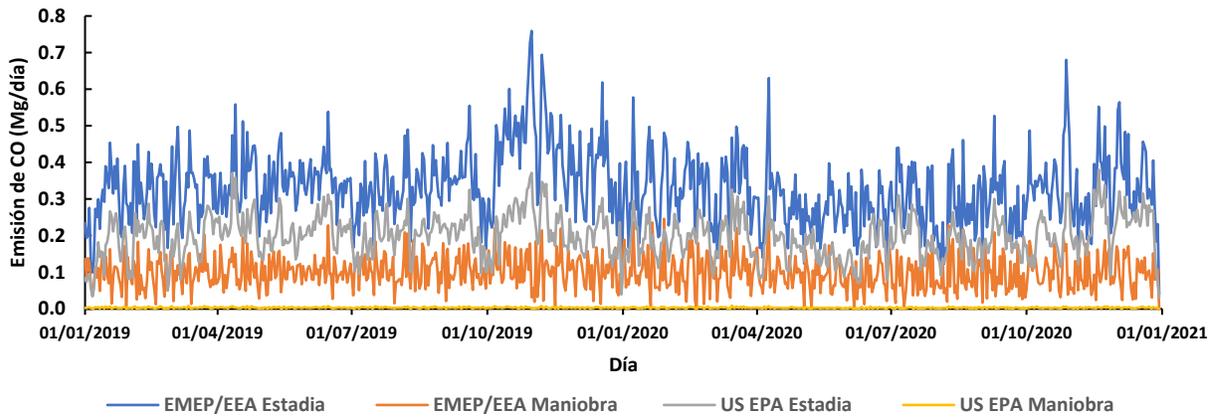
e)



f)



gg)



h)

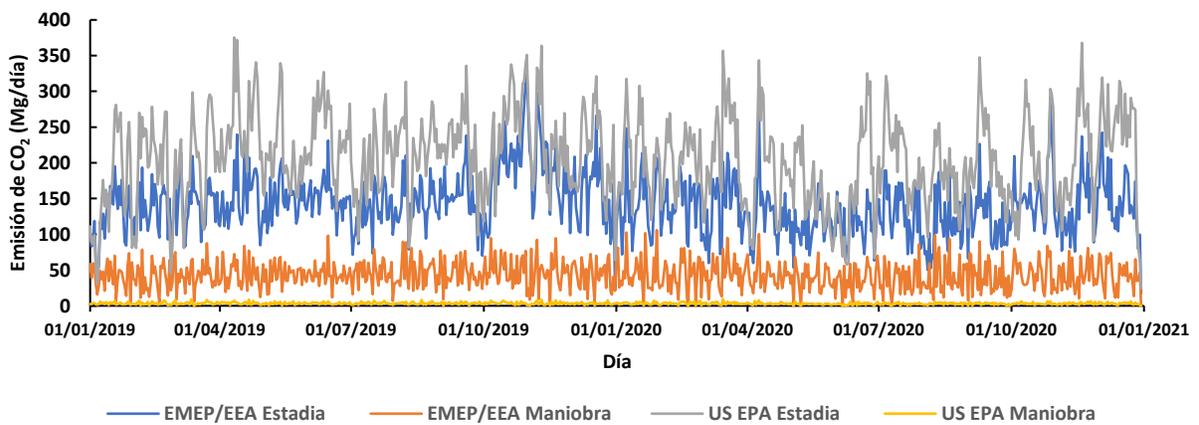


Figura 35. Emisiones atmosféricas; a) SO₂, b) PM₁₀, c) PM_{2.5}, d) NO_x, e) HC, f) COV, g) CO y h) CO₂

En la Figura 35 se observan las emisiones atmosféricas estimadas por el movimiento de buques en el RPV con la metodología de la EEA/EMEP y la US EPA. Se observa que la metodología de EEA/EMEP da los valores más altos en el modo de estadía; PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, HC, NMCOV y CO, con una emisión promedio diaria de 0.31, 0.29, 2.67, 0.84, 0.84 y 0.33 Mg/día respectivamente. Por otro lado, la metodología de la US EPA da los valores promedio diarios más altos para el SO₂ de 2.07 Mg/día y de 205.72 Mg/día en el caso del CO₂.

Las emisiones para el modo de operación de maniobra por la metodología de la EEA/EMEP fueron más elevadas comparadas con las estimadas por la metodología de la US EPA para todos los contaminantes considerados en este inventario. La principal razón de estos resultados se debe a que la metodología de la EEA/EMEP considera el uso de los motores principales y auxiliares en su modo de operación de maniobra, mientras que la metodología de la US EPA solo considera el uso del motor auxiliar y la caldera. La potencia de funcionamiento de los motores principales y auxiliares varía entre los tipos y subtipos de buques (Figura 36), por lo tanto, esto se ve reflejado en las emisiones durante este modo de operación.

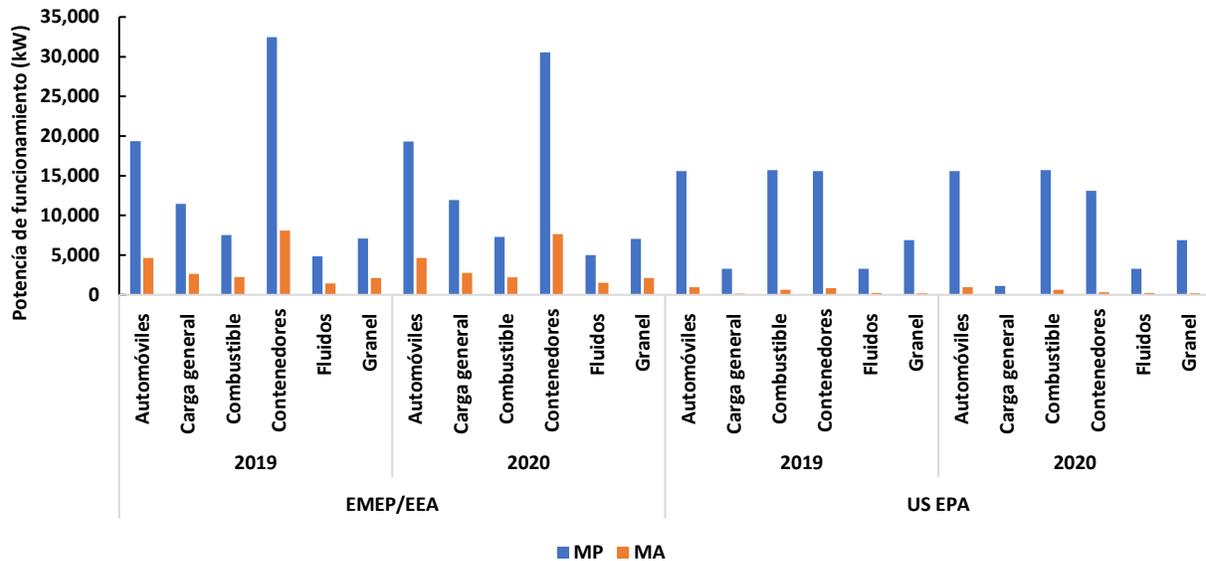


Figura 36. Potencia de funcionamiento de los motores promedio anual para el RPV

La diferencia entre la potencia de funcionamiento de los motores se refleja principalmente en los motores auxiliares y en los buques de tipo “contenedores”. La EEA/EMEP calcula la potencia de motores axilares con respecto a los motores principales mediante una relación (ratio) reportada por Trozzi en 2010. La relación de ajuste para los motores auxiliares se realizó estudiando la flota de buques del mundo de 2010 y para la flota del mediterráneo de 2006 (EEA/EMEP, 2019a). De lado contrario, la US EPA calcula la potencia de funcionamiento de los motores principales y auxiliares mediante un estudio de los buques que navegaron en sus aguas nacionales de Estados Unidos del 2000 al 2019 (US EPA, 2020c).

En la Figura 35 se puede observar la disminución en las emisiones de SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} durante el 2020. Las emisiones pasaron de un promedio diario en 2019 de 3.24 a 0.41 Mg/día en 2020 de SO₂, lo que representó una disminución del 87.35 % en las emisiones debido a las regulaciones del contenido de azufre en el combustible impuestas por la IMO en 2020. En el caso de las PM₁₀ y PM_{2.5} las disminuciones de emisiones pasaron de 0.58 y 0.55 Mg/día en 2019 a 0.045 y 0.04 Mg/día en 2020 respectivamente, lo que representa una baja de emisiones del 92.25 % para PM₁₀ y de 92.73 % en el caso de PM_{2.5}.

A continuación, en las Tablas 38 y 39 se muestra un resumen mensual de las emisiones calculadas por ambas metodologías para los contaminantes atmosféricos derivadas de los modos de operación, estadía, maniobra y fondeo de los buques en el RPV en 2019 y 2020. En la Tabla 38 se presentan las emisiones estimadas por la metodología de la EEA/EMEP, mientras que en la Tabla 39 las calculadas por medio de la US EPA. Las emisiones totales de SO₂ en el 2019 fueron de 1,853.32 Mg/año utilizando la metodología de la EEA/EMEP y de 1,526.26 Mg/año usando la metodología de la US EPA. En 2020 las emisiones fueron de 238.46 Mg/año de SO₂ y de 262.74 Mg/año utilizando las metodologías de la EEA/EMEP y US EPA respectivamente. La reducción del contenido de azufre en el combustible tuvo importante impacto en las emisiones de SO₂ y de partículas en el RPV. Cabe señalar que actualmente el RPV no cuenta con áreas de control de emisiones, sin embargo, las actuales regulaciones por la IMO han tenido un efecto en la zona de estudio. La implementación de las áreas de control se tiene previstas en conjunto con el proyecto de ampliación del RPV, de acuerdo con la CIMARES (SEMARNAT, 2019).

Tabla 38. Inventario de emisiones por movimiento de buques EEA/EMEP (Mg/mes)

Mes	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	CN	HC	NMCOV	CH ₄	N ₂ O	CO	CO ₂
ene-19	125.34	21.69	20.55	102.03	-	5.05	4.95	-	-	13.25	5,695.04
feb-19	132.97	23.01	21.80	109.43	-	4.98	4.88	-	-	14.06	6,041.12
mar-19	147.19	25.47	24.13	120.41	-	5.74	5.62	-	-	15.56	6,687.44
abr-19	148.48	25.70	24.34	121.77	-	5.69	5.58	-	-	15.70	6,745.99
may-19	151.28	26.18	24.80	123.94	-	5.84	5.72	-	-	15.99	6,873.23
jun-19	151.53	26.22	24.84	124.32	-	5.79	5.68	-	-	16.02	6,884.46
jul-19	134.08	23.20	21.98	109.06	-	5.43	5.32	-	-	14.17	6,092.03
ago-19	143.35	24.81	23.50	116.73	-	5.76	5.65	-	-	15.15	6,513.10
sep-19	156.78	27.13	25.71	128.65	-	5.99	5.87	-	-	16.57	7,123.21
oct-19	182.37	31.56	29.90	149.63	-	6.97	6.83	-	-	19.28	8,285.83
nov-19	209.83	36.31	34.40	174.05	-	7.41	7.27	-	-	22.18	9,532.88
dic-19	170.13	29.44	27.89	140.15	-	6.32	6.20	-	-	17.99	7,729.76
ene-20	20.18	2.05	1.95	115.02	-	5.68	5.95	-	-	14.93	6,417.48
feb-20	20.91	2.13	2.02	120.25	-	5.55	5.80	-	-	15.48	6,651.33
mar-20	20.12	2.05	1.94	114.86	-	5.60	5.86	-	-	14.89	6,397.73
abr-20	19.06	1.94	1.84	108.82	-	5.30	5.54	-	-	14.10	6,060.99
may-20	17.39	1.77	1.68	99.49	-	4.78	5.00	-	-	12.87	5,532.00
jun-20	17.26	1.76	1.66	99.08	-	4.64	4.84	-	-	12.77	5,489.55
jul-20	18.67	1.90	1.80	106.94	-	5.09	5.33	-	-	13.82	5,938.14
ago-20	16.52	1.68	1.59	93.91	-	4.72	4.95	-	-	12.22	5,252.82
sep-20	19.11	1.95	1.84	109.53	-	5.19	5.41	-	-	14.14	6,078.57
oct-20	22.27	2.27	2.15	127.72	-	6.02	6.31	-	-	16.48	7,083.88
nov-20	23.68	2.41	2.28	136.82	-	6.07	6.29	-	-	17.52	7,530.43
dic-20	23.29	2.37	2.25	134.21	-	6.09	6.35	-	-	17.24	7,407.85

Tabla 39. Inventario de emisiones por movimiento de buques US EPA (Mg/mes)

Mes	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	CN	HC	NMCOV	CH ₄	N ₂ O	CO	CO ₂
ene-19	95.75	8.86	8.15	51.05	0.24	2.13	2.25	0.04	0.34	5.66	5,816.04
feb-19	107.99	10.00	9.20	58.84	0.28	2.45	2.58	0.05	0.37	6.53	6,559.35
mar-19	117.18	10.85	9.98	62.90	0.30	2.63	2.77	0.05	0.41	6.98	7,118.05
abr-19	145.51	13.46	12.38	76.19	0.37	3.19	3.36	0.06	0.51	8.45	8,838.26
may-19	124.10	11.48	10.56	65.21	0.32	2.73	2.87	0.05	0.44	7.23	7,538.24
jun-19	138.15	12.79	11.76	74.48	0.35	3.11	3.27	0.06	0.48	8.27	8,391.42
jul-19	111.83	10.34	9.52	58.70	0.29	2.45	2.58	0.05	0.39	6.51	6,792.44
ago-19	125.48	11.61	10.68	66.73	0.32	2.79	2.94	0.06	0.44	7.40	7,621.71
sep-19	131.67	12.18	11.20	69.24	0.34	2.90	3.05	0.06	0.46	7.68	7,997.98
oct-19	137.14	12.69	11.67	72.87	0.35	3.05	3.21	0.06	0.48	8.09	8,330.38
nov-19	152.28	14.12	12.99	86.72	0.39	3.61	3.80	0.07	0.52	9.64	9,249.89
dic-19	139.19	12.87	11.84	73.18	0.36	3.06	3.22	0.06	0.49	8.12	8,454.73
ene-20	22.47	3.23	2.97	61.53	0.09	2.58	2.72	0.05	0.43	6.82	7,367.98
feb-20	22.69	3.29	3.02	67.26	0.09	2.81	2.95	0.06	0.42	7.47	7,441.46
mar-20	24.82	3.58	3.29	70.92	0.10	2.96	3.12	0.06	0.47	7.87	8,140.58
abr-20	22.37	3.23	2.97	64.01	0.09	2.68	2.82	0.05	0.42	7.10	7,336.99
may-20	20.35	2.94	2.71	59.33	0.08	2.48	2.61	0.05	0.38	6.59	6,674.50
jun-20	17.49	2.53	2.33	51.07	0.07	2.13	2.24	0.04	0.33	5.67	5,734.78
jul-20	24.24	3.51	3.23	71.54	0.10	2.98	3.14	0.06	0.45	7.94	7,948.37
ago-20	19.30	2.78	2.56	54.99	0.08	2.30	2.42	0.05	0.37	6.10	6,329.57
sep-20	20.81	3.00	2.76	58.76	0.08	2.46	2.59	0.05	0.40	6.52	6,825.46
oct-20	22.02	3.19	2.94	65.70	0.09	2.74	2.88	0.05	0.41	7.30	7,223.26
nov-20	20.71	3.03	2.78	66.82	0.08	2.77	2.92	0.06	0.37	7.44	6,792.07
dic-20	25.48	3.69	3.40	75.68	0.10	3.16	3.32	0.06	0.48	8.41	8,356.75

En la Tabla 40 se muestran las emisiones estimadas por el movimiento de buques en las bahías del RPV durante el 2019 y 2020. Mientras que en la Figura 37 se ilustran las emisiones totales por los buques en los distintos modos de operación considerados en el RPV.

Tabla 40. Inventario de emisiones por bahía en el RPV (Mg/año)

Metodología	Año	Bahía	Buques	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	CN	HC	COV	CH ₄	N ₂ O	CO	CO ₂
EMEP/EEA	2019	Norte	182	219.62	38.14	36.13	175.40	-	10.17	9.96	-	-	23.30	10,014.5
		Sur	1,836	1,357.43	234.79	222.43	1,108.34	-	53.39	52.33	-	-	143.42	61,640.22
	2020	Norte	553	75.42	7.68	7.27	413.11	-	26.61	26.08	-	-	55.81	23,990.49
		Sur	1,297	123.91	12.61	11.95	719.13	-	30.76	30.15	-	-	91.70	39,407.14
US EPA	2019	Norte	182	59.14	5.48	5.04	33.46	0.15	1.39	1.47	0.03	0.2	3.72	3,592.39
		Sur	1,836	1,253.19	115.88	106.61	653.05	3.2	27.32	28.77	0.55	4.44	72.41	76,120.71
	2020	Norte	553	24.89	3.63	3.34	78.76	0.1	3.27	3.45	0.07	0.45	8.76	8,163.62
		Sur	1,297	197.89	28.51	26.23	559.22	0.79	23.39	24.63	0.47	3.78	62.02	64,900.32

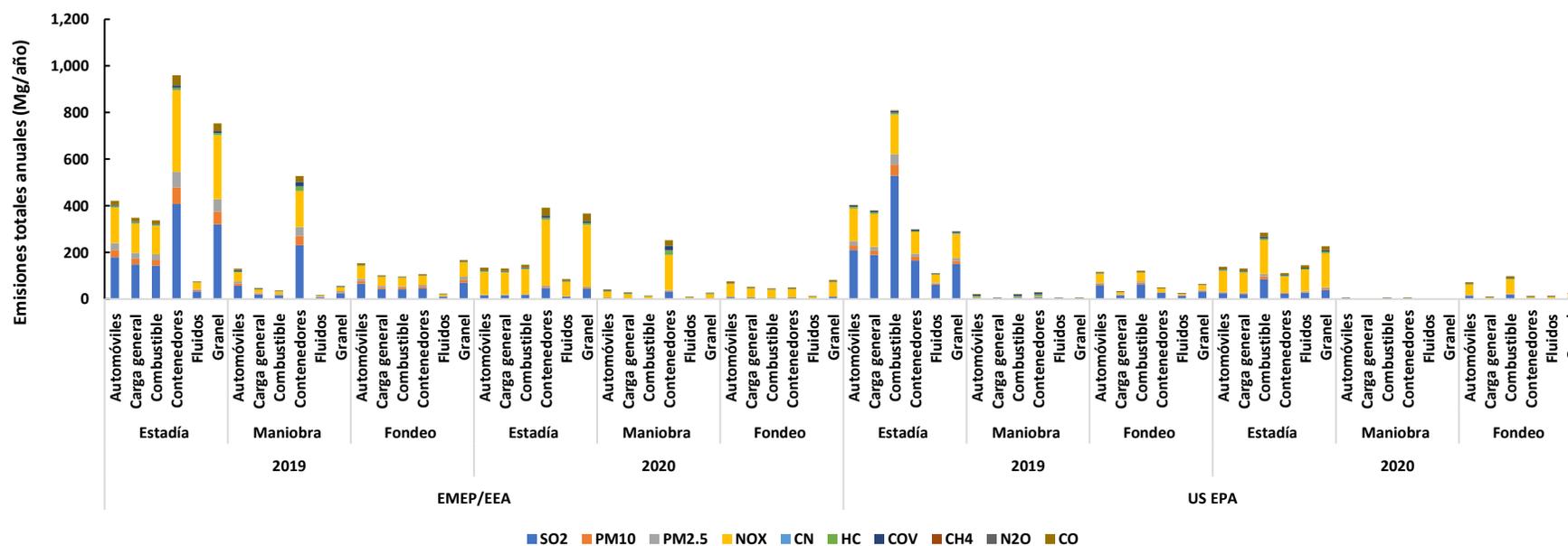


Figura 37. Inventario de emisiones por tipo de buque y modo de operación en el RPV

En la Tabla 40 se observan concentraciones bajas para la bahía norte, esto se debe principalmente a la capacidad actual de operatividad. Hoy en día, en la bahía norte operan 5 muelles comparado con los 21 muelles de la bahía sur. Sin embargo, se tienen considerado un total de 35 posiciones de atraque (muelles) al concluir el proyecto de ampliación del RPV. Las emisiones de la bahía norte representan el 13.93 % de las emisiones totales en 2019 y el 37.84 % en 2020.

En la Figura 37 se pueden ver las emisiones por tipo de buque para los modos de operación considerados en este trabajo. Las emisiones más altas se presentan en el modo de operación de estadía para las dos metodologías utilizadas. Sin embargo, las emisiones por los buques de contenedores en estadía utilizando la metodología de la EEA/EMEP son las más elevadas, seguido de los buques de tipo granelero. Por el otro lado, usando la metodología de la US EPA las emisiones elevadas fueron por los buques de tipo combustible, seguido de los buques tipo automóviles. Las emisiones para el modo de operación de fondeo fueron superiores, comparado con las estimadas para maniobra para ambas metodologías.

4.2.2 INVENTARIO DE EMISIONES POR ACTIVIDAD DE DRAGADO

Las actividades de dragado con las que se contó registro fueron del periodo de agosto a diciembre de 2017. Se identificaron las emisiones de SO₂, partículas, NO_x, NMCOV, CN, CH₄ y N₂O y CO mediante los factores de emisión calculados a partir de la metodología para embarcaciones portuarias de la US EPA. Los factores utilizados para la estimación de emisiones de esta actividad se muestran en la Tabla 41. Las emisiones se estimaron para los dos modos de operación de la draga (estadía y tránsito), considerando una draga de tipo “tolva” con una potencia total instalada de 7,272 kW. El tipo de draga, así como, la potencia total instalada concuerda con las características de la draga propuesta a utilizar en la MIA del proyecto de ampliación.

Las emisiones diarias totales de SO₂, partículas, NO_x, NMCOV, CN, CH₄ y N₂O y CO por la draga se muestran en la Figura 38, por otro lado, en la Figura 39 se muestran las emisiones diarias de SO₂ y PM₁₀ para los modos de operación de la draga durante su actividad.

La actividad diaria de la draga fue calculada considerando una tolva con capacidad de 14,000 m³ y un diámetro de succión de 1,300 mm. Las características de la draga tipo tolva se tomaron de acuerdo con las características de la draga “Pedro Álvares Cabral”. Se consideraron esas características específicas, ya que se tiene registro de la actividad de esta draga en actividades de mantenimiento de los canales de navegación en el RPV de acuerdo con ASIPONA-VER en los últimos años.

Tabla 41. Factores de emisión para la draga

Factores de Emisión (g/kWh)		
Contaminante	MP	MA
SO ₂	0.0062	0.0062
PM ₁₀	0.07	0.08
PM _{2.5}	0.0679	0.0776
NO _x	4.81	4.89
CN	0.0523	0.0598
NMCOV	0.1053	0.1158
CH ₄	0.002	0.0022
N ₂ O	0.0332	0.0332
CO	0.9187	0.9187

MP= motor principal, MA= motor auxiliar

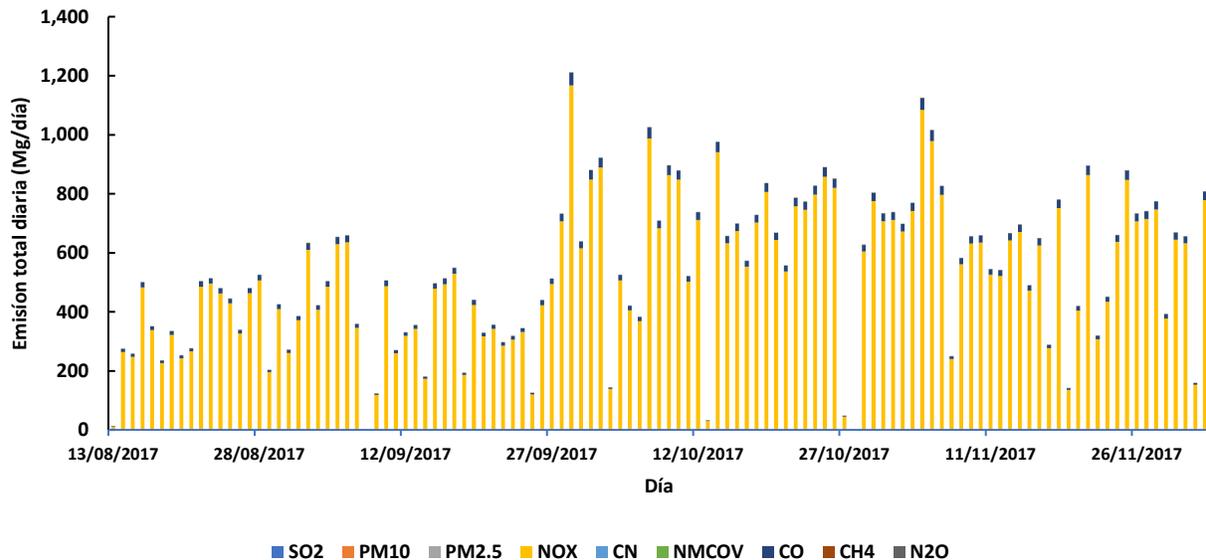
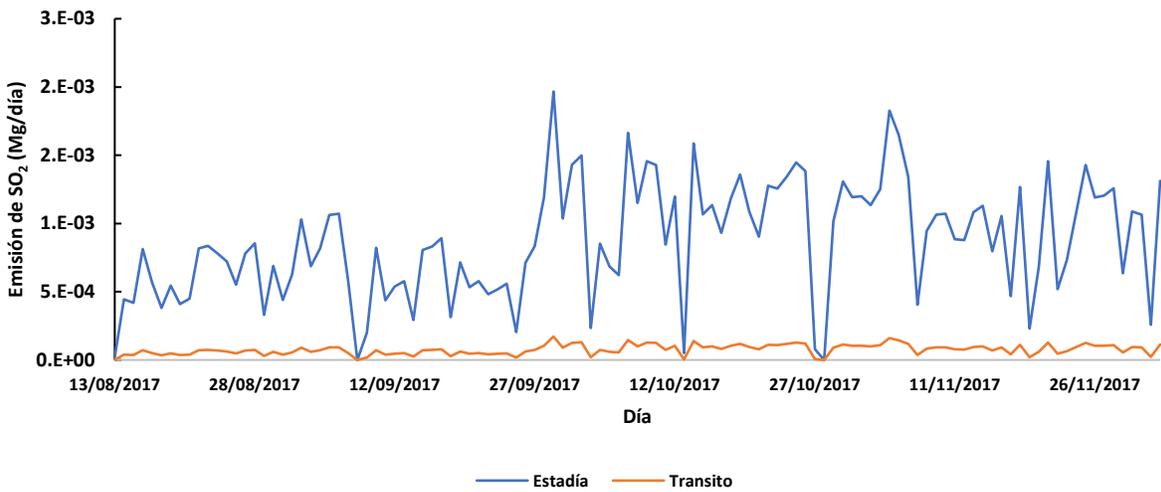


Figura 38. Inventario de emisiones por actividades diaria de dragado en la zona de ampliación

En la Figura 38 se observan las emisiones estimadas por la actividad de dragado en la zona de ampliación del RPV. Se puede apreciar que los valores más altos son de los NO_x con un promedio diario de 514.34 Mg/día, mientras que las emisiones de SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} fueron de 0.001, 0.110 y 0.103 Mg/día respectivamente. A continuación, en la Figura 39 se muestran las emisiones diarias de SO₂ y PM₁₀ durante los diferentes modos de operación considerados para actividades de dragado.

a)



b)

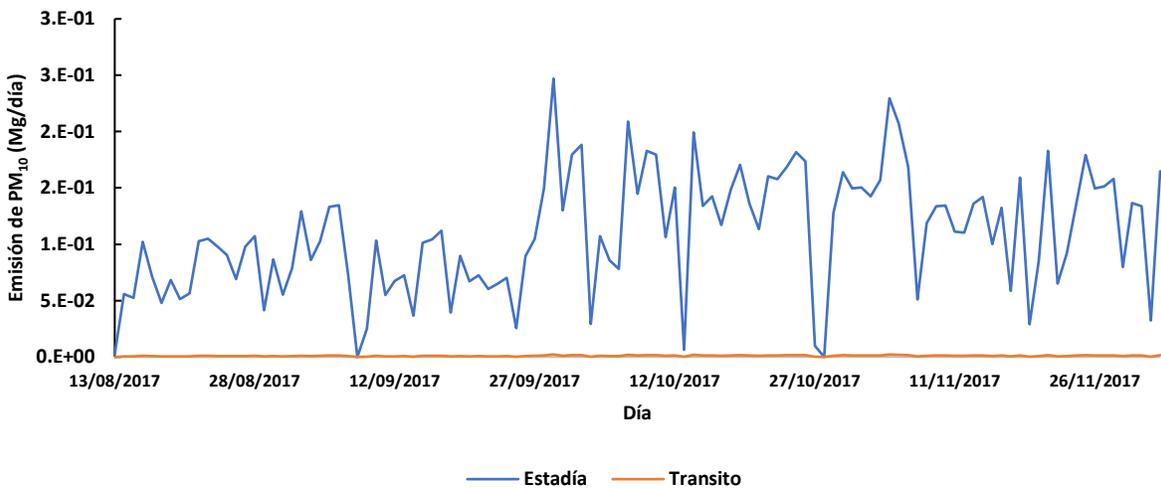


Figura 39. Emisiones atmosféricas por dragado; a) SO₂ y b) PM₁₀

En las Figuras 38 y 39, así como en la Tabla 42 se observan las mayores emisiones por dragado fueron durante el mes de octubre, seguido de noviembre. Las emisiones totales durante los 5 meses de actividad fueron de 0.107 Mg de SO₂, 12.42 Mg de PM₁₀, 11.68 Mg de PM_{2.5}, 58,120.97 Mg de NO_x, 6.96 de CN, 28.01 Mg de NMCOV, 0.013 Mg de CH₄, 2.82 de N₂O y 2,121.42 Mg de CO. En la Figura 40 se muestra un mapa con la actividad acumulada de la draga realizada en la zona de ampliación del RPV.

Tabla 42. Inventario de emisiones por actividad de dragado (Mg/mes)

Mes	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	CN	NMCOV	CH ₄	N ₂ O	CO
ago-17	0.012	1.37	1.29	6,432.74	0.77	3.10	0.001	0.31	234.80
sep-17	0.023	2.65	2.49	12,401.27	1.48	5.98	0.003	0.60	452.65
oct-17	0.036	4.14	3.90	19,372.63	2.32	9.34	0.004	0.94	707.10
nov-17	0.034	3.92	3.69	18,351.76	2.20	8.84	0.004	0.89	669.84
dic-17	0.003	0.33	0.31	1,562.57	0.19	0.75	0.00004	0.08	57.03



Figura 40. Mapa de actividad acumulada por dragado en la zona de ampliación

4.3 CASOS DE ESTUDIO

El modelo de dispersión permitió establecer una relación entre las fuentes de emisión y los receptores. Los receptores pueden ser coordenadas fijas (receptores discretos) y zonas específicas (anillos de receptores) en una zona determinada. En este trabajo se caracterizaron las fuentes puntuales y de área de emisión en la zona de ampliación del RPV. La información necesaria para realizar las simulaciones de los casos de estudio fue la siguiente:

- Información meteorológica, proveniente de datos de reanálisis procesados en WRF para el módulo CALMET
- Información geofísica, descargada directamente del modelo CALPUFF
- Información de las fuentes puntuales y de área, determinados en los inventarios de emisión del RPV.

4.3.1 SIMULACIONES DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Para determinar si las operaciones de construcción y operación de la zona de ampliación del RPV impacta en la calidad del aire negativamente, se aplicó el modelo de dispersión CALPUFF a los casos de estudio seleccionados anteriormente en la Tabla 27. Se decidió estudiar los dos casos más representativos de los considerados para el 2017, 2019 y 2020 (Tabla 43) para un mayor análisis. Los casos de estudio restantes se presentan en el Anexo 2.

Tabla 43. Casos de estudio para su análisis

Caso de estudio	Componentes (frecuencia en horas)					Actividad		
	NNE	ONO	NO	NNO	N	Dragado	Construcción	Buques
05/10/2017	7	0	6	5	6	✓	✓	X
17/10/2017	0	0	3	12	9	✓	✓	X
03/11/2019	0	0	0	0	24	X	✓	✓
11/12/2019	0	0	0	1	23	X	✓	✓
12/01/2020	0	0	0	6	18	X	✓	✓
26/09/2020	0	0	1	15	8	X	✓	✓

En las siguientes simulaciones de los casos de estudio (Figura 41, 43, 45, 47, 49 y 51) se utilizaron los receptores discretos (ubicación de la estación de monitoreo) y anillos de receptores para ver la variabilidad de los datos de concentración del modelo, con la estación de monitoreo y visualizar la dispersión de los contaminantes respectivamente. Esto se realizó con el propósito de observar la dirección y alcance que tiene el SO₂ y las partículas debido a las actividades de ampliación en la bahía norte del RPV. Las simulaciones que se presentan corresponden a simulaciones promedio de 24 horas, se realizaron de este modo para comparar las concentraciones de salida del modelo con la normatividad mexicana en calidad de aire correspondiente de cada contaminante y las mediciones de la estación de monitoreo. Los días seleccionados cumplen con la característica de estar en el intervalo de tiempo en el cual se realizó el inventario de emisiones para la actividad de dragado (agosto de 2017 a diciembre de 2017) y movimiento de buque de (julio de 2019 a diciembre de 2020).

Las simulaciones se realizaron con las emisiones estimadas diarias debido a las actividades de construcción en general, actividad de dragado y movimiento de buques en modo de operación “estadía”. En el caso de las emisiones por movimiento de buques se hicieron las simulaciones considerando solo la metodología de la US EPA (2020), utilizada para el inventario de emisión de esta actividad.

Es importante señalar que las concentraciones máximas obtenidas con el modelo CALPUFF para SO₂ en 2017, son inferiores a las registradas por la estación de monitoreo debido a que solo se consideró la actividad de dragado sin tomar en cuenta otras actividades desarrolladas la zona de ampliación, lo cual representa una limitante en la modelación. Además, de las simulaciones de la dispersión de los contaminantes (SO₂ y partículas) se muestran los flujos de viento y la concentración del contaminante 12 horas antes y 12 horas después del caso de estudio (Figura 42, 44, 46, 48, 50 y 52), con el objetivo de visualizar en qué componente o componentes del viento aumentaron las concentraciones de los contaminantes durante el evento.

En la escala de concentración de las Figuras 41, 43, 45, 47, 49 y 51 se indica el límite normado promedio diario (color gris) correspondiente a partículas, esto a causa, de que en las simulaciones realizadas de los casos de estudio las concentraciones rebasan la normatividad vigente. Las concentraciones promedio diario de salida del modelo CALPUFF y las observadas por la estación de monitoreo se comparan en la Tabla 44.

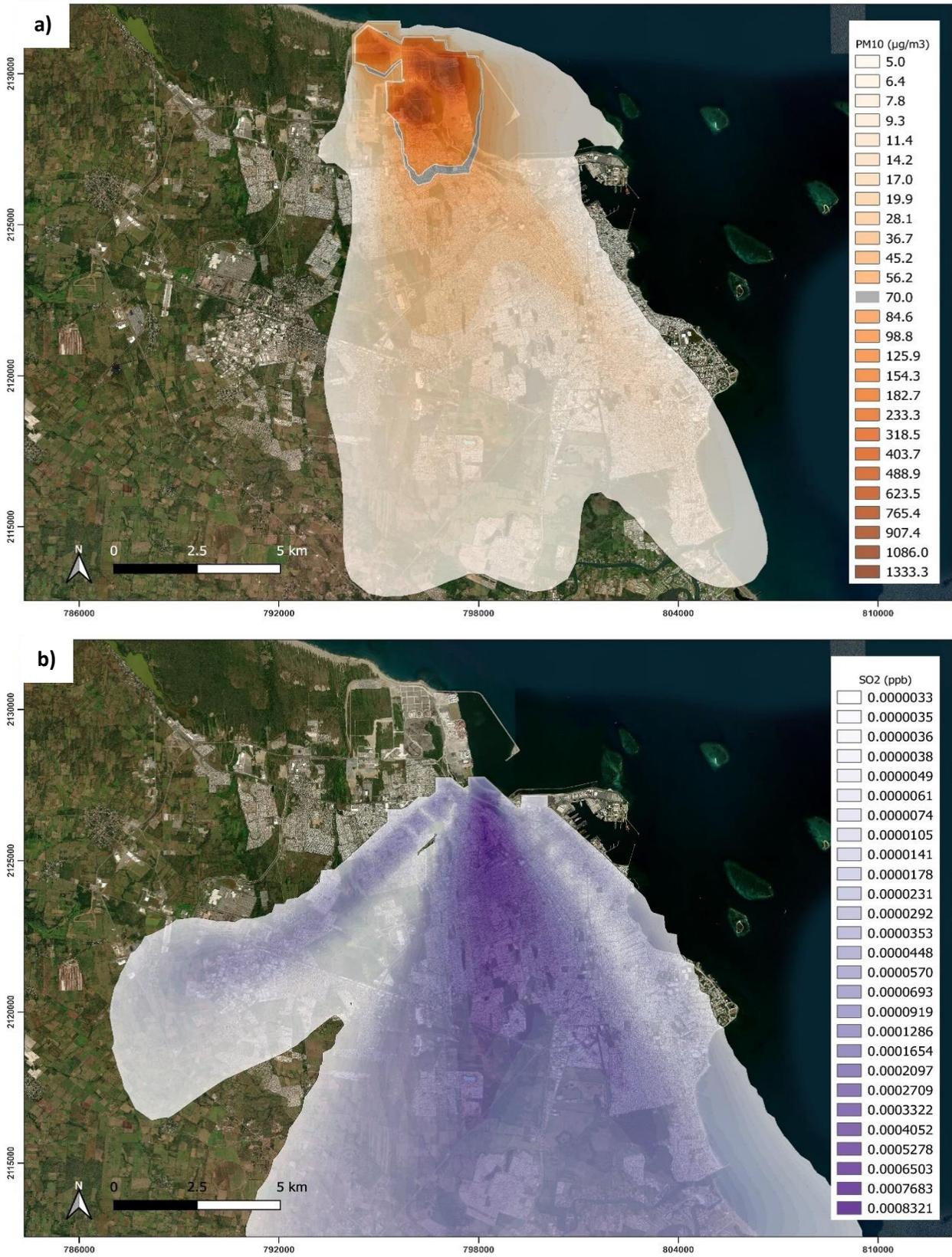


Figura 41. Dispersión promedio diario de PM₁₀ (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 05-10-2017

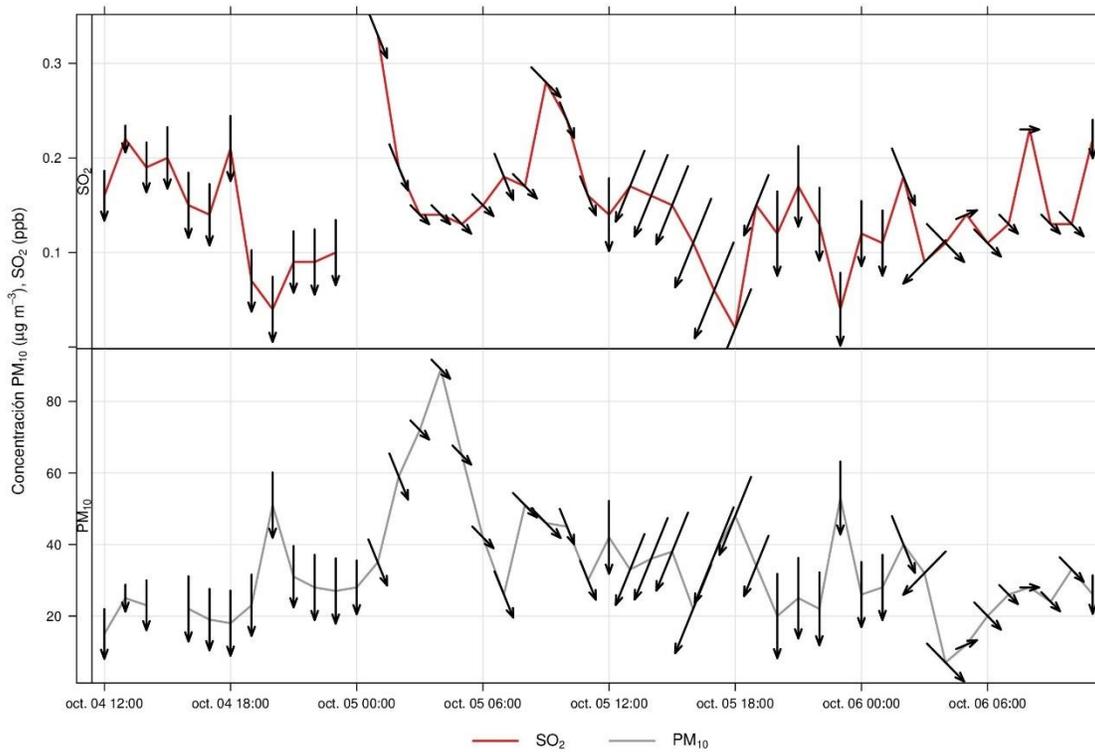


Figura 42. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 05-10-2017

CASO DE ESTUDIO 05-10-2017

En la Figura 41 se muestran los archivos de salida de CALPUFF para los contaminantes de interés en este trabajo. Se observa una dispersión para PM₁₀ con origen en el área de construcción de la zona de ampliación del RPV con dirección hacia el sur sureste (SSE). La concentración promedio diaria para PM₁₀ de acuerdo con el modelo fue de 46.15 µg/m³ en la celda correspondiente a ubicación de la estación de monitoreo, mientras que lo observado en el monitoreo fue de 45.75 µg/m³. Las concentraciones que superan la norma mexicana (>70 µg/m³) de acuerdo con el modelo, se ubican al interior de la zona de ampliación con una concentración de 1,333.33 µg/m³ en la zona de construcción y terreno ganado al mar. Por otro lado, la dispersión del SO₂ se observa con origen en el punto de dragado de ese día con dirección principal al sur (S), sur sureste (SSE) y sur suroeste (SSO) con una concentración mayor de 0.0008 ppb, muy por debajo de límite de la norma (40 ppb). Por otro lado, en la Figura 42 se observa que la concentración de PM₁₀ aumenta cuando la dirección del viento proviene de la coordenada norte noroeste (NNO), mientras que las concentraciones de SO₂ disminuyen.

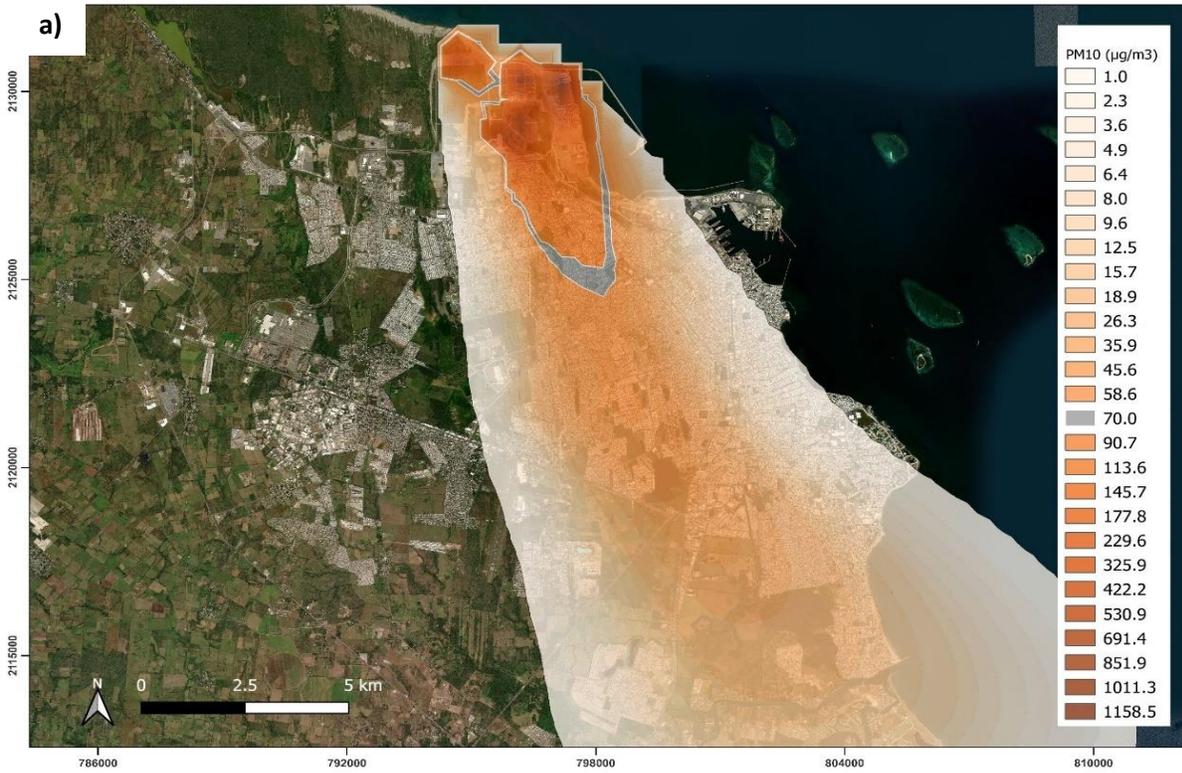


Figura 43. Dispersión promedio diario de PM_{10} (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 17-10-2017

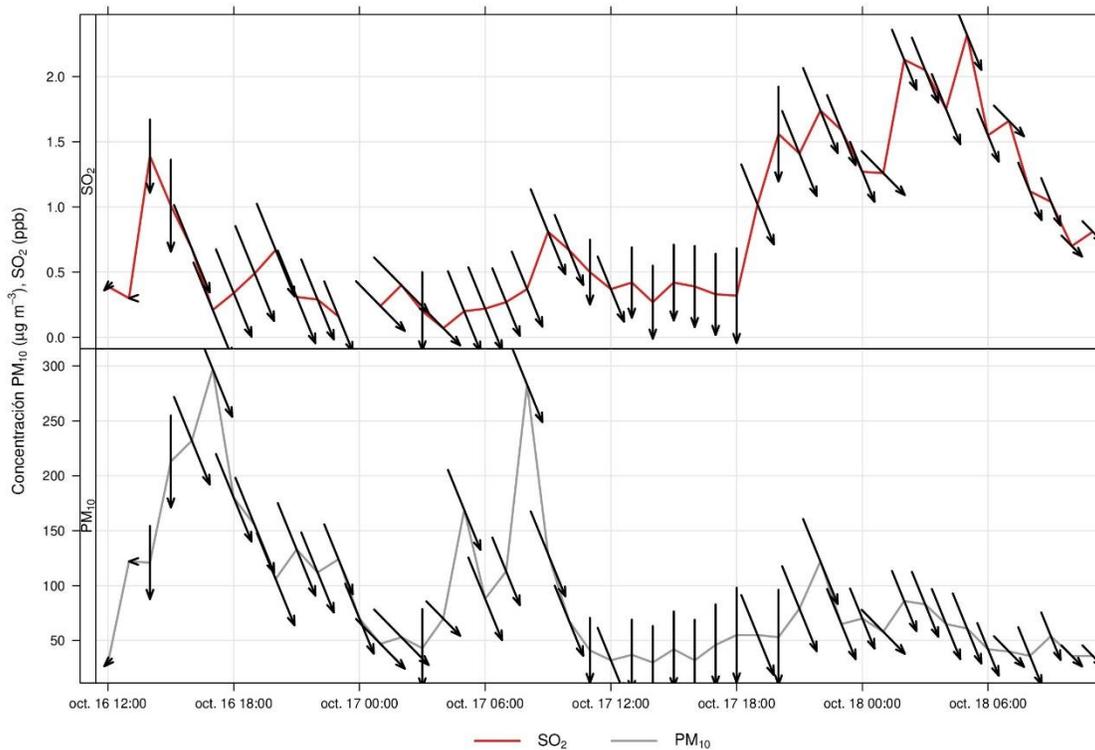


Figura 44. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 17-10-2017

CASO DE ESTUDIO 17-10-2017

En la Figura 43 se observa las dispersiones de SO₂ y PM₁₀ con dirección al sureste (SE) principalmente. La concentración promedio diaria para PM₁₀ de acuerdo con el modelo fue de 70.09 µg/m³, mientras que de la estación de monitoreo fue de 80.62 µg/m³. Por otro lado, la concentración promedio diaria del SO₂ para este caso de estudio en la estación de monitoreo fue de 0.6367 ppb, mientras que la concentración promedio diario del modelo fue de 0.0002 ppb. Las concentraciones de PM₁₀ tanto del modelo, como de la estación de monitoreo superaron los límites de la normatividad vigente de 70 µg/m³ promedio diario. En la Figura 43-a se puede observar que las concentraciones que superan la normatividad se encuentran en su mayoría al interior del RPV, sin embargo, se observan concentraciones que exceden la normatividad al sur del RPV, llegando a localidades aledañas. Por otro lado, en la Figura 44 se observa un aumento en la concentración de las SO₂ y PM₁₀ antes y después de las 06:00 am con vientos provenientes de la zona de construcción (NNO). Esto indica que las fuentes de emisión de los contaminantes tienen el mismo origen o pertenecen a la misma fuente.



Figura 45. Dispersión promedio diario de PM_{2.5} (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 03-11-2019

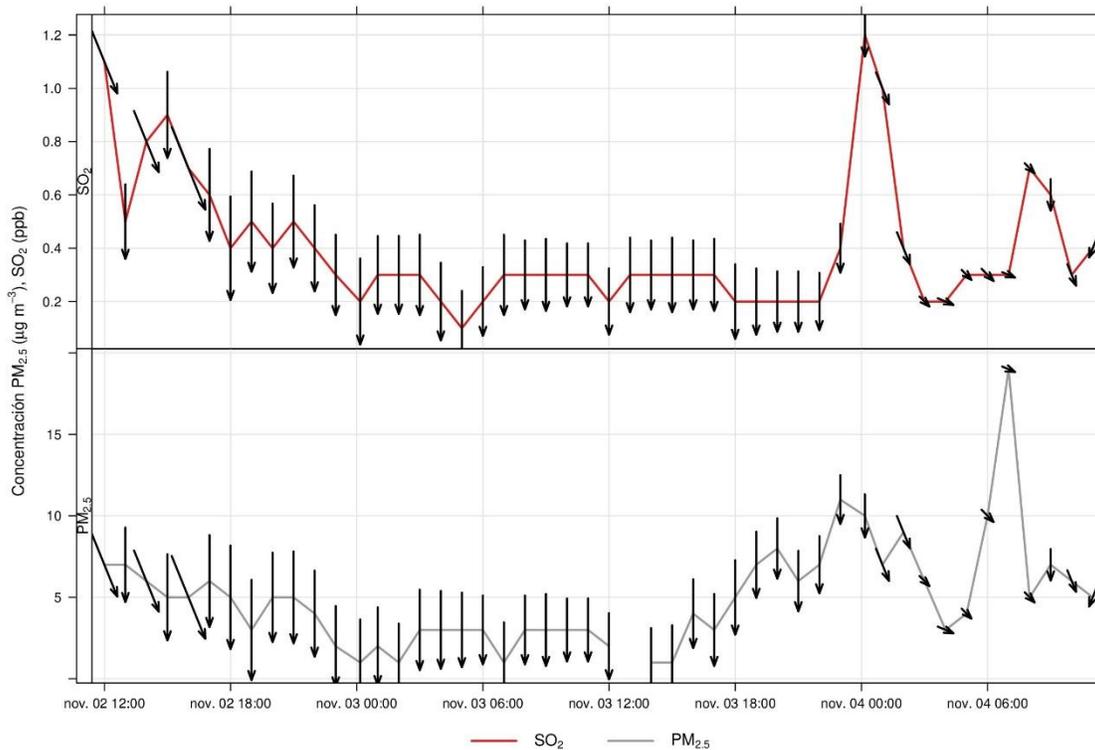


Figura 46. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 03-11-2019

CASO DE ESTUDIO 03-11-2019

En la Figura 45 se observa las dispersiones de $PM_{2.5}$ y SO_2 debido a las actividades de construcción y el movimiento de buques con una dispersión con dirección sur (S) y sur sureste (SSE). La concentración promedio diaria en la celda correspondiente a la estación de monitoreo de acuerdo con el modelo fue de $3.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y de 0.4372 ppb para SO_2 , mientras que lo observado en la estación de monitoreo fue de $3.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y 0.2562 ppb para SO_2 . Las concentraciones promedio diarias del modelo fueron ligeramente sobreestimadas, no obstante, las concentraciones tanto para $PM_{2.5}$ y SO_2 no rebasaron los límites normados correspondientes al punto de monitoreo. Sin embargo, en la Figura 45-a se observan concentraciones $> 41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al interior del RPV y al sur (S), perjudicando la calidad del aire en estas zonas. En la Figura 46 se observa que 12 horas antes del día de estudio las concentraciones de $PM_{2.5}$ como de SO_2 disminuyeron a lo largo de las horas, hasta obtener un incremento parecido en las mismas horas del día. Esto indica que las fuentes de emisión para los contaminantes provienen de una misma fuente y origen.

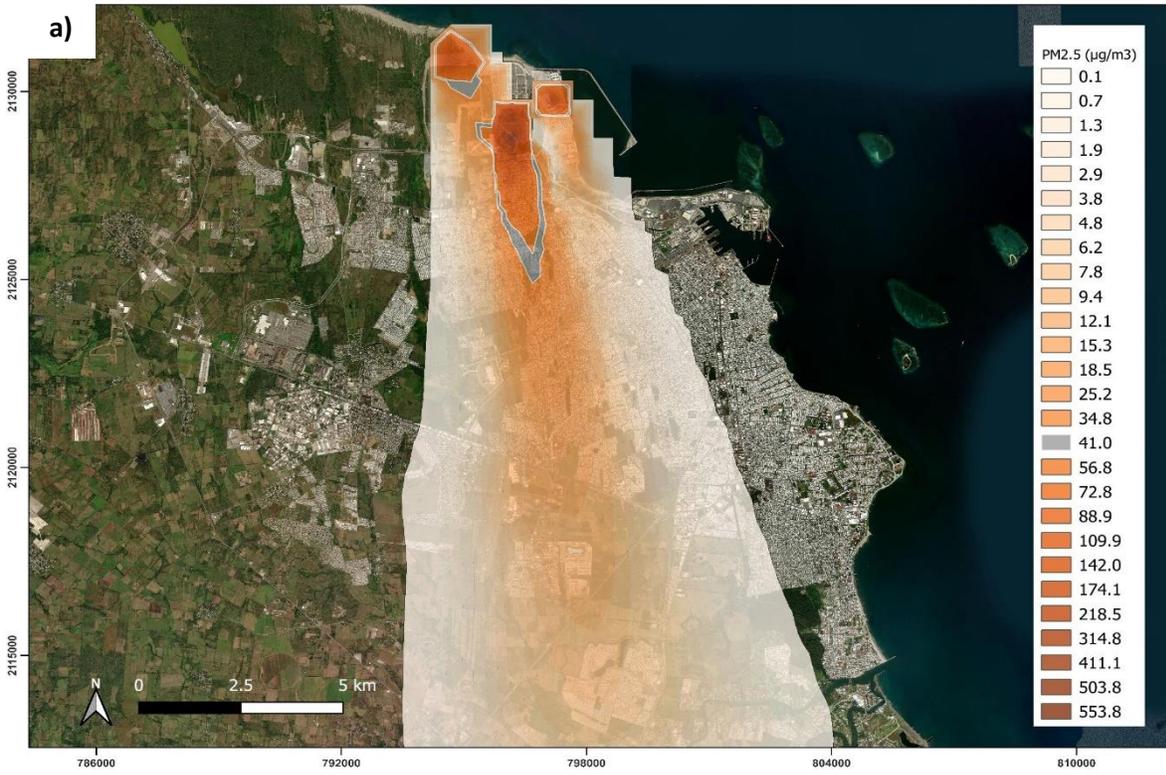


Figura 47. Dispersión promedio diario de $\text{PM}_{2.5}$ (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 11-12-2019

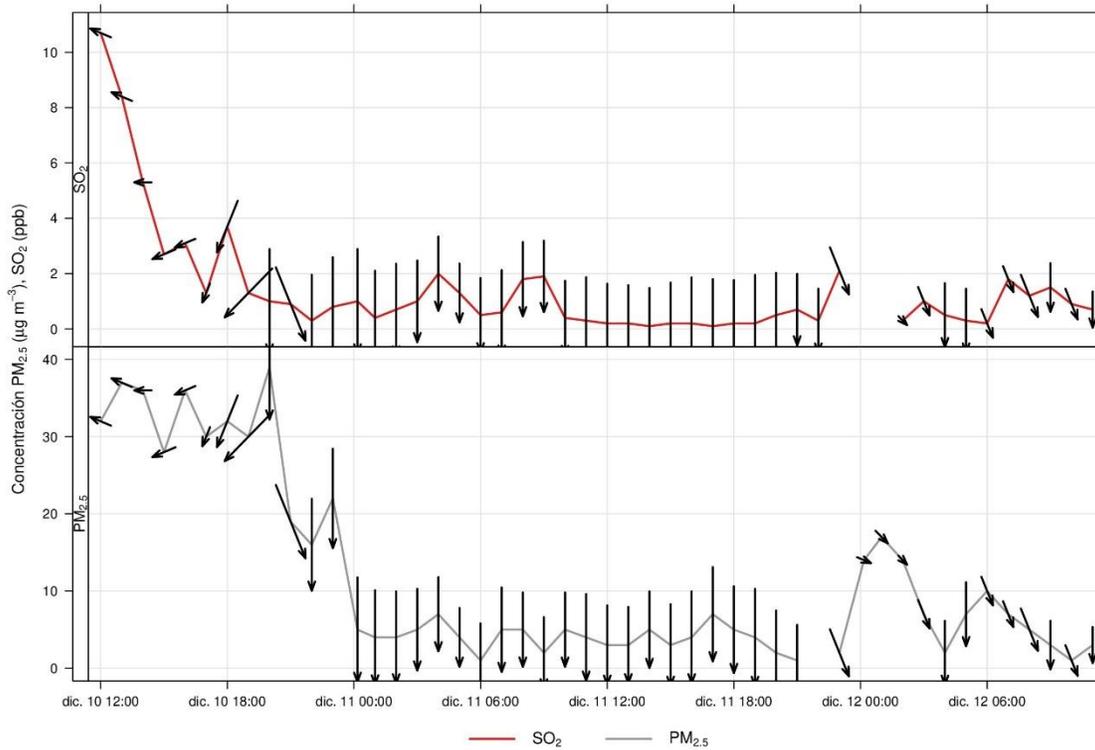


Figura 48. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 11-12-2019

CASO DE ESTUDIO 11-12-2019

En la Figura 47 se observan las dispersiones de SO₂ y PM_{2.5} con una dirección al sur sureste (SSE) principalmente. La concentración promedio diaria en la celda correspondiente a la estación de monitoreo de acuerdo con el modelo fue de 4.3 µg/m³ para PM_{2.5} y de 0.6387 ppb para SO₂, mientras que lo observado en la estación de monitoreo fue de 3.55 µg/m³ para PM_{2.5} y 0.6393 ppb para SO₂. Las concentraciones promedio diarias del modelo fueron ligeramente sobreestimadas para las PM_{2.5}, mientras que para SO₂ fueron subestimadas, no obstante, las concentraciones tanto para PM_{2.5} y SO₂ no rebasaron los límites normados correspondientes en el punto de monitoreo. En la Figura 47-a se observan las concentraciones que superan la normatividad de PM_{2.5} al interior del RPV y al sur, teniendo un impacto en la calidad del aire en estas zonas de acuerdo con el modelo de dispersión. En la Figura 48 se observa como las concentraciones de PM_{2.5} y de SO₂ tienen un comportamiento semejante antes, durante y posterior al día del caso de estudio. Esto indica que las fuentes de emisión para los contaminantes provienen de una misma fuente o actividad en la zona de ampliación del RPV.

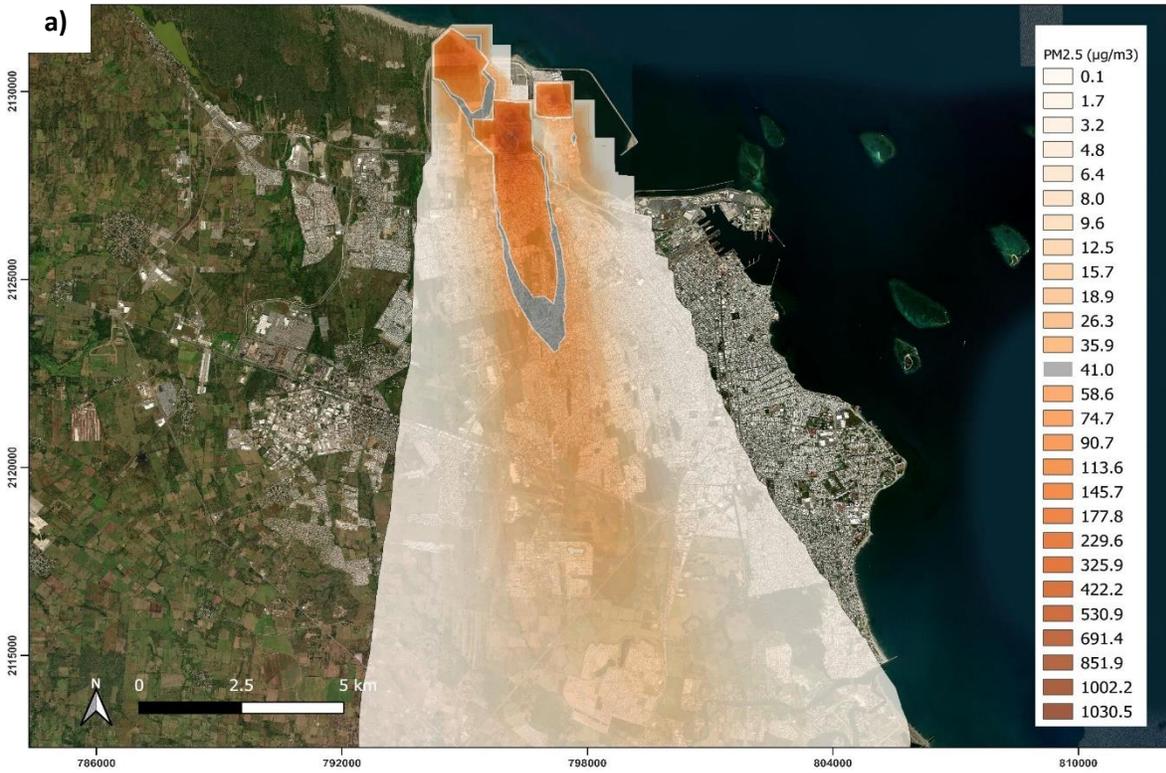


Figura 49. Dispersión promedio diario de PM_{2.5} (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 12-01-2020

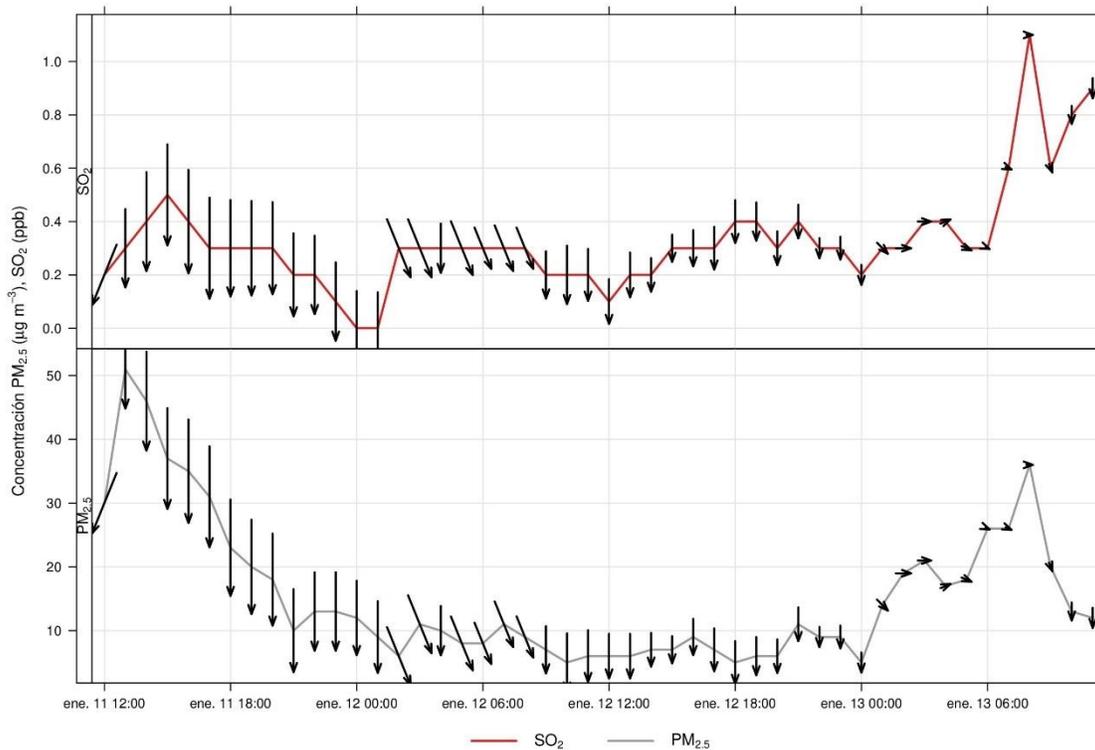


Figura 50. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 12-01-2020

CASO DE ESTUDIO 12-01-2020

En la Figura 49 se observan las dispersiones de SO_2 y $\text{PM}_{2.5}$ con una dirección al sur sureste (SSE). La concentración promedio diaria en la celda correspondiente a la estación de monitoreo de acuerdo con el modelo fue de $6.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y de 0.1673 ppb para SO_2 , mientras que lo observado en la estación de monitoreo fue de $7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 0.2348 ppb para SO_2 . Las concentraciones promedio diarias del modelo fueron ligeramente subestimadas tanto para las $\text{PM}_{2.5}$ como para SO_2 , sin embargo, las concentraciones tanto para $\text{PM}_{2.5}$ y SO_2 no rebasaron los límites normados correspondientes en el punto de monitoreo. En la Figura 49-a se observa que las concentraciones que superan la normatividad para $\text{PM}_{2.5}$ fueron al interior del RPV y al sureste, teniendo un impacto en la calidad del aire en estas zonas de acuerdo con el modelo de dispersión. En la Figura 50 se observa como las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y de SO_2 tienen un comportamiento semejante durante el día del caso de estudio. Esto indica que las fuentes de emisión para los contaminantes provienen de la misma fuente o actividad en la zona de ampliación del RPV.

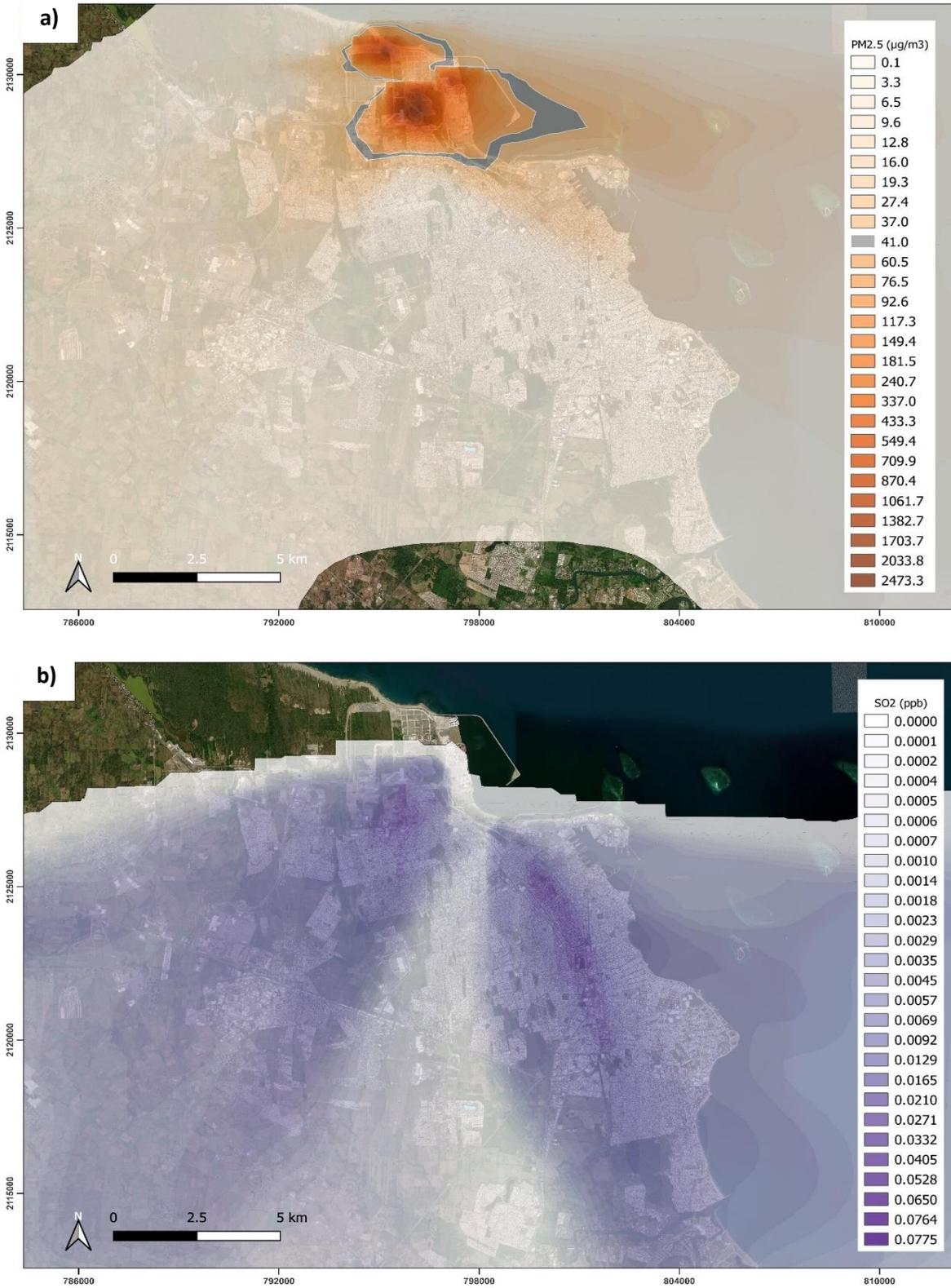


Figura 51. Dispersión promedio diario de PM_{2.5} (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 26-09-2020

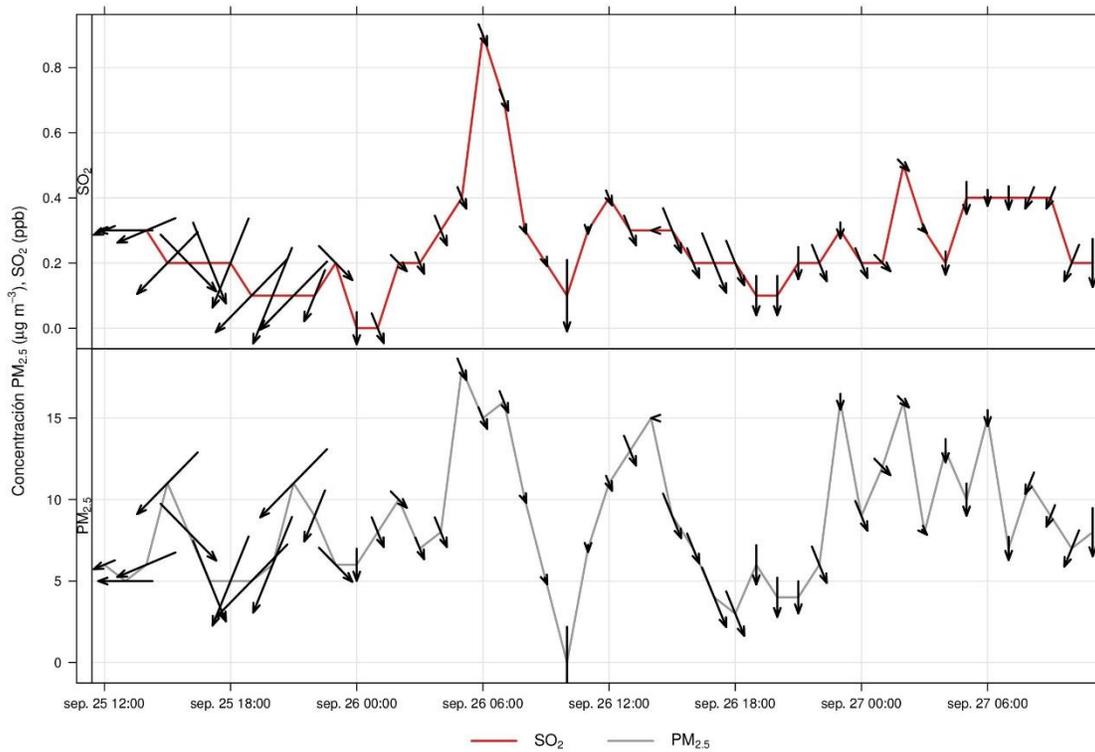


Figura 52. Serie de tiempo de contaminantes para caso de estudio de 26-09-2020

CASO DE ESTUDIO 26-09-2020

En la Figura 51 se observan las dispersiones de SO₂ y PM_{2.5} con una dirección al oeste suroeste (OSO) y al este sureste (ESE). La concentración promedio diaria en la celda correspondiente a la estación de monitoreo de acuerdo con el modelo fue de 5.45 µg/m³ para PM_{2.5} y de 0.0012 ppb para SO₂, mientras que lo observado en la estación de monitoreo fue de 9.5 µg/m³ para PM_{2.5} y 0.2924 ppb para SO₂. Las concentraciones promedio diarias del modelo fueron subestimadas tanto para las PM_{2.5} como para SO₂ para este caso de estudio, sin embargo, las concentraciones tanto para PM_{2.5} y SO₂ no rebasaron los límites normados en el punto de monitoreo. En la Figura 51-a se observa que las concentraciones que superan la normatividad para PM_{2.5} fueron al interior del RPV, teniendo un impacto en la calidad del aire en esta zona de acuerdo con el modelo de dispersión. En la Figura 52 se observa como las concentraciones de PM_{2.5} y de SO₂ tienen un comportamiento parecido durante el día del caso de estudio. Esto indica que las fuentes de emisión para los contaminantes provienen de la misma fuente o actividad en la zona de ampliación del RPV.

4.3.2 INFLUENCIA DE LA METEOROLOGÍA EN LOS CASOS DE ESTUDIO

Se realizó el análisis estadístico de matrices de correlación de Pearson centesimales, con el objetivo de determinar la influencia de las variables meteorológicas en la concentración de los contaminantes atmosféricos (Figura 53). La matriz de correlación Figura 52-a, se hizo considerando todos los datos horarios totales del monitoreo de calidad del aire y meteorológicos, mientras que la matriz Figura 52-b, se elaboró con los datos horarios, pero solo para los casos de estudio seleccionados (Tabla 29).

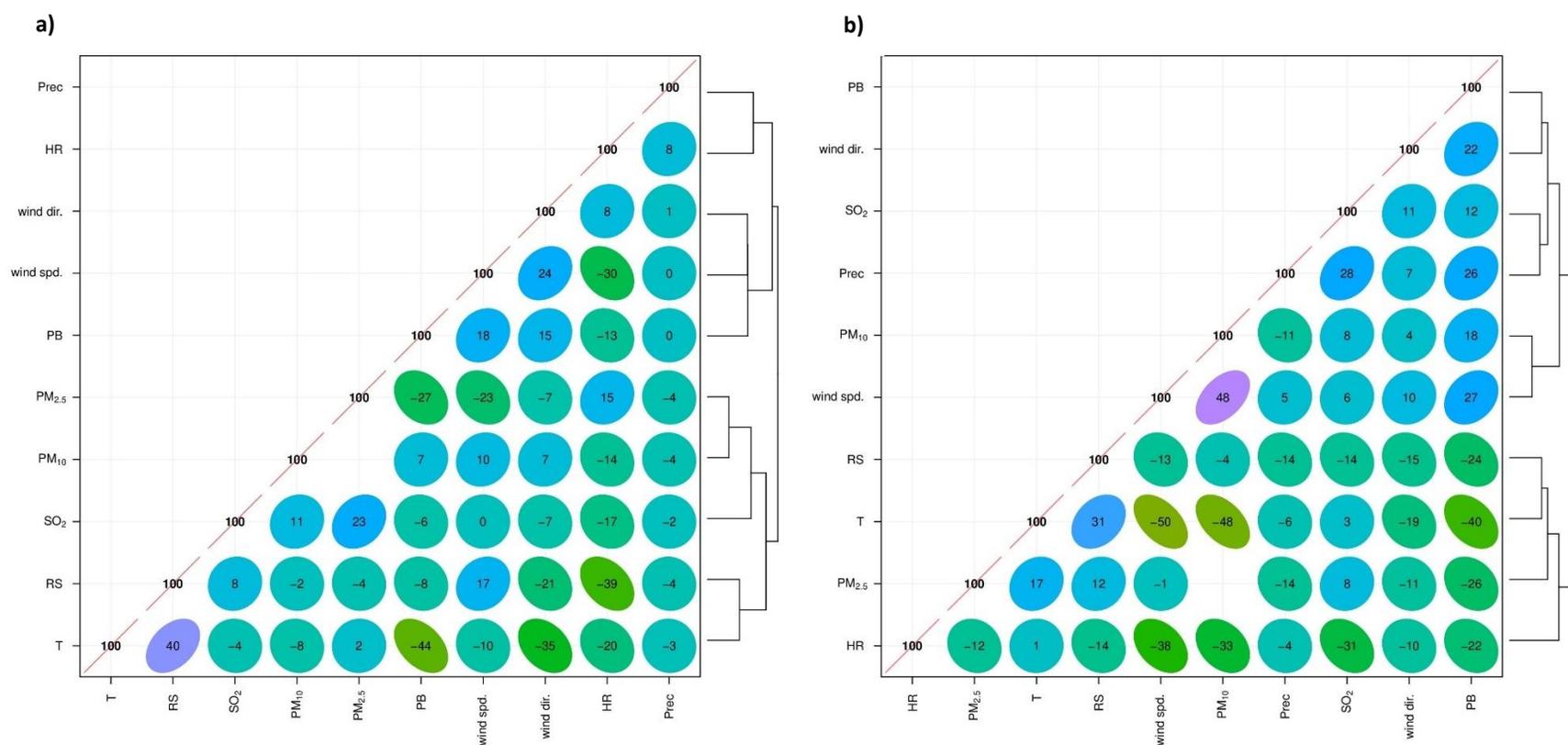


Figura 53. Matriz de correlación; a) datos horarios, b) casos de estudio

En la Figura 53-a se puede observar el dendrograma, el cual revela que hay dos grupos principales correlacionados con los datos, el primer grupo conformado por la precipitación (Prec), humedad relativa (HR), presión atmosférica (PB), y velocidad y dirección del viento (ws y wd), mientras que el segundo está conformado por los contaminantes atmosféricos (SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$), temperatura (T) y radiación solar (RS). Dentro del primer grupo, se puede observar una subdivisión que muestra una relación entre Prec y HR, así como, la relación entre ws, wd y PB, y cómo estos parámetros también se enlazan directamente con el segundo grupo conformado por SO_2 , partículas, RS y T. En la primera matriz, las PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ tuvieron la correlación positiva más alta (directamente proporcional) con el SO_2 , con un $r=11$ y $r=23$ respectivamente, mientras que la corrección negativa más alta (inversamente proporcional) se obtuvo con la HR y el ws, con un $r=-17$ y $r=-23$ siguiendo las mismas consideraciones. Por otro lado, el SO_2 tuvo la correlación negativa más alta con la HR con un $r=-17$.

En la segunda matriz (Figura 53-b) se observa un dendrograma diferente al obtenido utilizando todos los datos horarios registrados por la estación de monitoreo, en este caso el dendrograma nuevamente mostró dos grupos principales correlacionados, el primero conformado por la PB, wd, SO_2 , Prec, PM_{10} y ws, mientras que el segundo grupo está la RS, T, $\text{PM}_{2.5}$ y HR. En el primer grupo, se puede ver la relación más estrecha entre las PM_{10} y la ws, con un $r=48$, seguida de la relación entre la Prec y el SO_2 , con un $r=28$. Por otro lado, las $\text{PM}_{2.5}$ muestran una correlación positiva con la T y RS, con un $r=17$ y $r=12$ respectivamente, así como, una correlación negativa con la HR y Prec, con un $r=-12$ y $r=-14$ consecuentemente.

La matriz de correlación para los casos de estudio (Figura 53-b) respalda la dependencia encontrada anteriormente por Sosa et al., (2020) entre las PM_{10} y (ws) en el RPV. En la Figura 54, se puede observar el aumento en la concentración de PM_{10} a partir de vientos ≥ 14 m/s, donde, las altas concentraciones se atribuyen a la resuspensión de partículas debido a fuertes vientos en la zona.

Por otro lado, se realizó un gráfico (Figura 55) con las diferentes alturas promedio diaria de la capa límite para los casos de estudio, el objetivo de gráfico es descartar que las altas concentraciones por partículas hayan sido ocasionadas por condiciones de estancamiento en el RPV. En la Figura 55 se observa que la capa límite (PBL) no influye de manera directa las altas concentraciones de los contaminantes, por lo tanto, las altas concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ derivan de las diversas emisiones generadas por las actividades de construcción y de terreno ganado al mar.

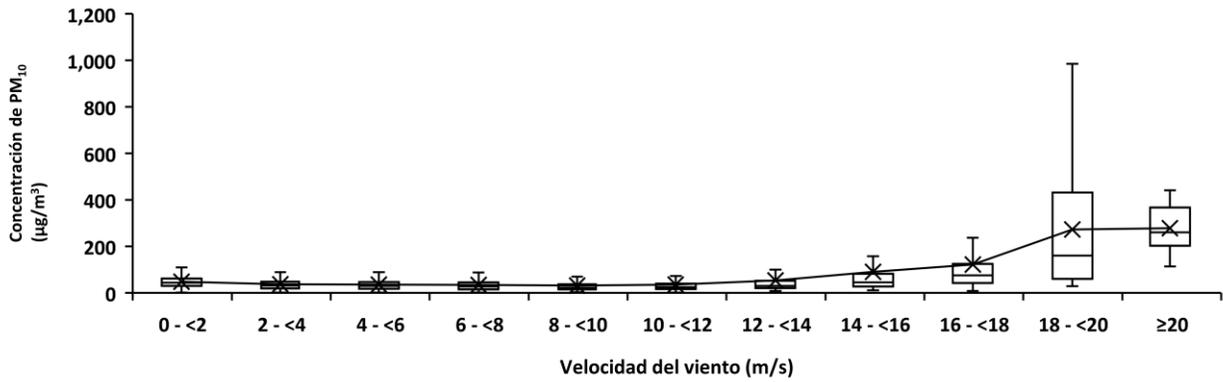


Figura 54. Distribución de la PM₁₀ en función de diferentes velocidades de viento

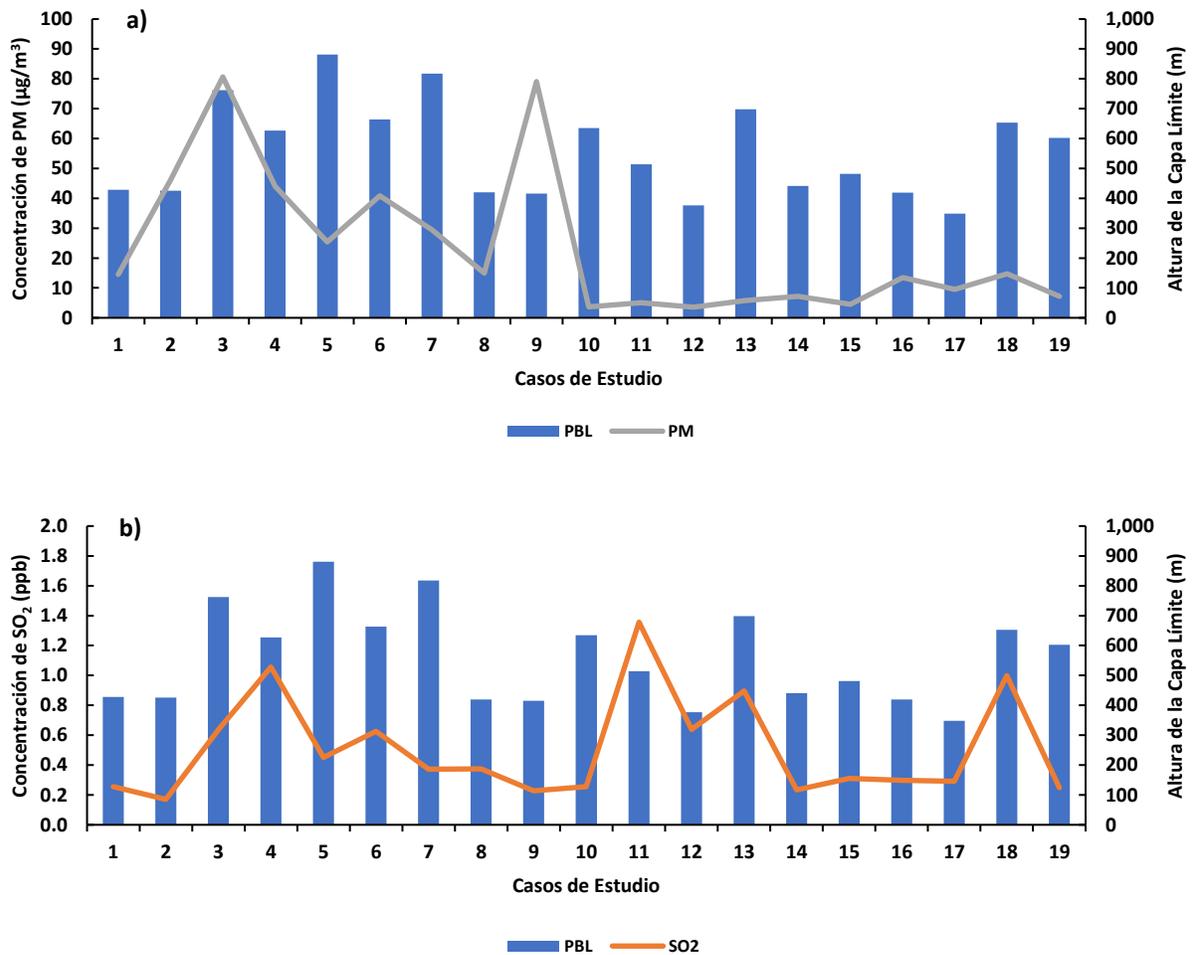


Figura 55. Capa límite y concentración de los casos de estudio; a) partículas, b) SO₂

4.4 VARIABILIDAD DEL MODELO

Para comparar los valores de las simulaciones y las observaciones, se utilizaron las concentraciones de los casos de estudio obtenidos mediante el modelo de dispersión (MOD) y las concentraciones promedio diarias registradas por la estación de monitoreo (OBS), así como, su diferencia (DIF) entre las concentraciones obtenidas (Tabla 44).

Previo a la comparación, los datos de concentración observados y los obtenidos a través del modelo, los valores se ajustaron a las mismas condiciones estándar (1 atm y 25°C), esto debido a que el modelo arroja las concentraciones de SO₂ y partículas en µg/m³. En la Figura 56 se muestra la variabilidad entre la temperatura y presión atmosférica promedio diarios registrados en la estación, con respecto a los obtenidos mediante los datos de reanálisis y utilizados en el modelo CALPUFF por medio del módulo CALMET.

Tabla 44. Concentraciones de salida de CALPUFF para los casos estudio

Casos de estudio	SO ₂ (ppb)			Partículas (µg/m ³) ^c		
	OBS	MOD	DIF	OBS	MOD	DIF
01/10/2017 ^a	0.2556	0.0005	0.2551	14.48	25.13	10.65
05/10/2017 ^a	0.1703	0.0002	0.1701	46.15	45.75	0.4
17/10/2017 ^a	0.6367	0.0002	0.6365	80.62	70.09	10.53
18/10/2017 ^a	1.056	0.0031	1.0529	44.06	36.06	8
24/10/2017 ^a	0.4502	0.001	0.4492	25.41	19.91	5.5
25/10/2017 ^a	0.6256	0.001	0.6246	40.88	30.3	10.58
13/11/2017 ^a	0.3726	-	-	29.41	10.87	18.54
07/12/2017 ^a	0.374	-	-	14.9	21.76	6.86
08/12/2017 ^a	0.2285	-	-	79.09	57.54	21.55
03/11/2019 ^b	0.2562	0.4372	0.181	3.62	3.66	0.04
09/11/2019 ^b	1.3564	1.5521	0.1957	5.06	5.49	0.43
11/12/2019 ^b	0.6393	0.6387	0.0006	3.55	4.3	0.75
22/12/2019 ^b	0.8961	0.719	0.1771	5.8	4.93	0.87
12/01/2020 ^b	0.2348	0.1673	0.0675	7.2	6.97	0.23
20/01/2020 ^b	0.3106	0.1308	0.1798	4.53	6.5	1.97
13/02/2020 ^b	0.2971	0.0829	0.2142	13.45	10.23	3.22
26/09/2020 ^b	0.2924	0.0012	0.2912	9.5	5.45	4.05
30/10/2020 ^b	0.9983	0.1285	0.8698	14.79	11.11	3.68
30/11/2020 ^b	0.2485	0.3904	0.1419	7.23	5.71	1.52

^a Casos de estudio por actividades construcción en general y dragado

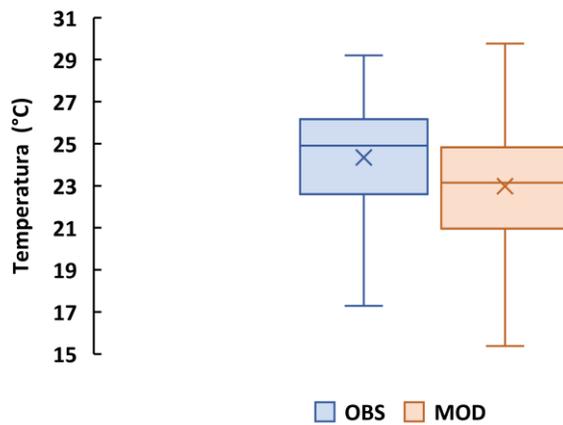
^b Casos de estudio por actividades de construcción en general y operación de buques

^c PM₁₀ para casos de estudio (a), PM_{2.5} para casos de estudio (b)

Los datos de calidad del aire para SO₂ y partículas registradas en la estación de monitoreo, así como los datos de concentración del modelo CALPUFF fueron obtenidos considerando diferentes condiciones de presión y temperatura. Dada esta situación, se tuvieron que ajustar los valores para poder compararlos entre sí, y a su vez verificar los datos con la norma de calidad del aire correspondiente para cada contaminante.

En el gráfico de caja y bigote (Figura 56) se puede observar que la temperatura obtenida mediante los datos de reanálisis se está subestimando con respecto a los datos observados en la estación de monitoreo, teniendo una media de 22.98 °C para los casos de estudio, mientras que, en la estación de monitoreo tuvieron una media de 24.34 °C para los mismos días analizados.

a)



b)

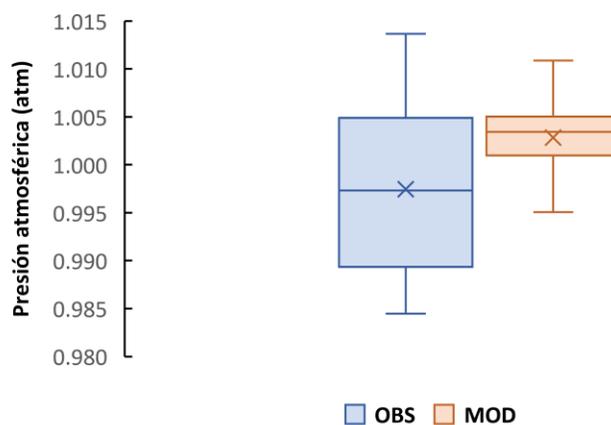


Figura 56. Temperatura (a) y presión atmosférica (b) promedio diario de los casos de estudio

La presión atmosférica media registrada en la estación de monitoreo para los casos de estudio fue de 0.997 atm, por el lado contrario, la presión atmosférica media de los datos de reanálisis fue de 1.002 atm. Por lo tanto, los datos de presión atmosférica utilizados en el modelo estuvieron sobreestimados, mientras que los de temperatura fueron subestimados, por lo tanto, el ajuste de concentraciones a condiciones estándar permitió comparar las concentraciones de SO₂ y partículas del modelo, con los obtenidos de la estación de monitoreo.

Con los datos obtenidos de concentración para SO₂ y partículas mediante el modelo de dispersión (Tabla 44), se procedió a aplicar la prueba estadística “*t de student*” con el objetivo de verificar si la variabilidad del modelo es significativa con respecto a los datos observados en la estación de monitoreo. En la Tabla 45 se muestran los resultados obtenidos de la prueba t de student para todos los casos de estudio simulados de 2017, 2019 y 2020.

Tabla 45. Resultados de la prueba t de student para los casos de estudio

Parámetro	SO ₂		Partículas	
	OBS	MOD	OBS	MOD
Media	0.5104	0.2238	23.6705	20.0931
Varianza	0.1160	0.1551	582.9270	386.1826
Observaciones	19		19	
Varianza agrupada	0.1356		484.5548	
Grados de libertad	36		36	
Estadístico t	2.3984		0.5009	
Valor crítico de t	2.0280		2.0280	
p-valor	0.0217		0.6194	

En la Tabla 45 se observa que las concentraciones de SO₂ obtenidas por el modelo CALPUFF y las observadas tienen una diferencia estadísticamente significativa (estadístico t > valor crítico de t ó p-valor < 0.05), con un valor $t_{SO_2}(19) = 2.3984$; p-valor = 0.0217, esto indica que, el modelo para todos los casos de estudio de SO₂ no se están simulando correctamente. Por el otro lado, se pueden apreciar que las concentraciones observadas por la estación de monitoreo y las concentraciones obtenidas mediante las simulaciones para partículas no tienen una diferencia significativa, con un valor de $t_{Partículas}(19) = 0.5009$ y un p-valor = 0.6194. La insignificancia, indica que los promedios observados y los obtenidos por el modelo no presentan una diferencia estadísticamente significativa entre sí, por lo que, se están realizando las simulaciones correctamente para partículas.

En otras palabras, los resultados para partículas indican que las fuentes de emisión de partículas se están considerando en su mayoría para los casos de estudio, siendo la principal fuente de emisión las partículas resuspendidas por las actividades de construcción y preparación del sitio del terreno ganado al mar en la zona de ampliación del RPV.

La diferencia significativa para el SO₂ entre los datos del modelo y los observados, se atribuye a que en las simulaciones correspondientes al 2017 solo se consideró como fuente de emisión de SO₂ la actividad de la draga. La significancia, indica entre muchas posibilidades que no se están considerando todas las fuentes de SO₂ en el área de estudio durante el periodo de 2017.

Debido a esta situación se optó por realiza una nueva prueba de t de student, para observar cual era la significancia entre las concentraciones del modelo y las observadas en la estación descartando los casos de estudio de 2017, quedando solo los casos de estudio para el movimiento de los buques de 2019 y de 2020 (Tabla 46).

Tabla 46. Resultados prueba t de student casos estudio 2019 y 2020

Parámetro	SO ₂	
	OBS	MOD
Media	0.5529	0.4248
Varianza	0.1603	0.2156
Observaciones	10	
Varianza agrupada	0.1880	
Grados de libertad	18	
Estadístico t	0.6608	
Valor crítico de t	2.1009	
p-valor	0.5170	

En la Tabla 46 se puede ver que los promedios observados y los obtenidos para los casos de estudio de 2019 y 2020 por el modelo no presentan una significancia estadística ($t_{SO_2}(10) = 0.6608$; p-valor = 0.5170). Esto indica, que para los casos de estudio de 2019 y 2020 las fuentes de emisión tuvieron una mejor caracterización en la zona de ampliación del RPV, pues es sabido que, las principales fuentes de emisión de SO₂ en los puertos se debe al movimiento de los buques durante sus diferentes modos de operación.

4.5 ZONAS SENSIBLES POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Para identificar las zonas sensibles se utilizaron simulaciones realizadas mediante CALPUFF y se incorporaron al SIG (QGIS) para agregar los datos de las localidades aledañas a la zona de estudio y los anillos receptores. Debido a que se ha registrado una mala calidad por partículas al interior del RPV durante el periodo de monitoreo, se decidió identificar las zonas vulnerables a contaminación atmosférica por este contaminante. Para visualizar las zonas sensibles por contaminación se sobrepusieron las capas de la topografía, ubicación de las localidades del municipio de Veracruz y de Boca del Río, anillos receptores y la dispersión de las partículas de los diecinueve casos de estudio. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 57, donde se observa la localización de las concentraciones mayores a los límites normados para PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente.

Para las variables usadas en este trabajo se identificó que las localidades sensibles por contaminación atmosférica debido a las actividades de construcción y ampliación fueron: Veracruz, Nuevo Veracruz y Lomas de Río Medio, con una concentración de 70 a $92.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de 41 a $56.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de $PM_{2.5}$. Estas localidades se encuentran ubicadas al sur del RPV a una distancia entre 4 a 8 km de las fuentes de emisión (buques, draga y zona de construcción). Sin embargo, existen otras localidades al sur suroeste (SSO) como Colonia Bahía Libre, Colinas de Santa Fe, Colonia el Renacimiento, Condado del Valle Dorado, Fraccionamiento Condado de Valle Dorado, Colonia Chalchihuecan, Infonavit Orquídeas, Colonia Patria, Río Medio, Fraccionamiento Costa Dorada, Arboledas, Fraccionamiento el Campanario, Fraccionamiento Geovillas los Pinos, Colonia del Proletariado, Oasis y Los Torrentes, las cuales podrían estar en exposición debido a su cercanía con el RVP (para identificar los nombres de las localidades, ver Anexo 3).

Además, de las localidades aledañas sensibles a la contaminación atmosférica se observan que las máximas concentraciones de partículas se encuentran al interior del RPV, si bien el RPV no está en la zona urbana pertenece a la localidad de Veracruz. En los mapas realizados se observa que la distribución de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ tienen un comportamiento diferente, si bien las fuentes de emisión son las mismas, las condiciones meteorológicas afectaron a la dispersión de diferente forma.

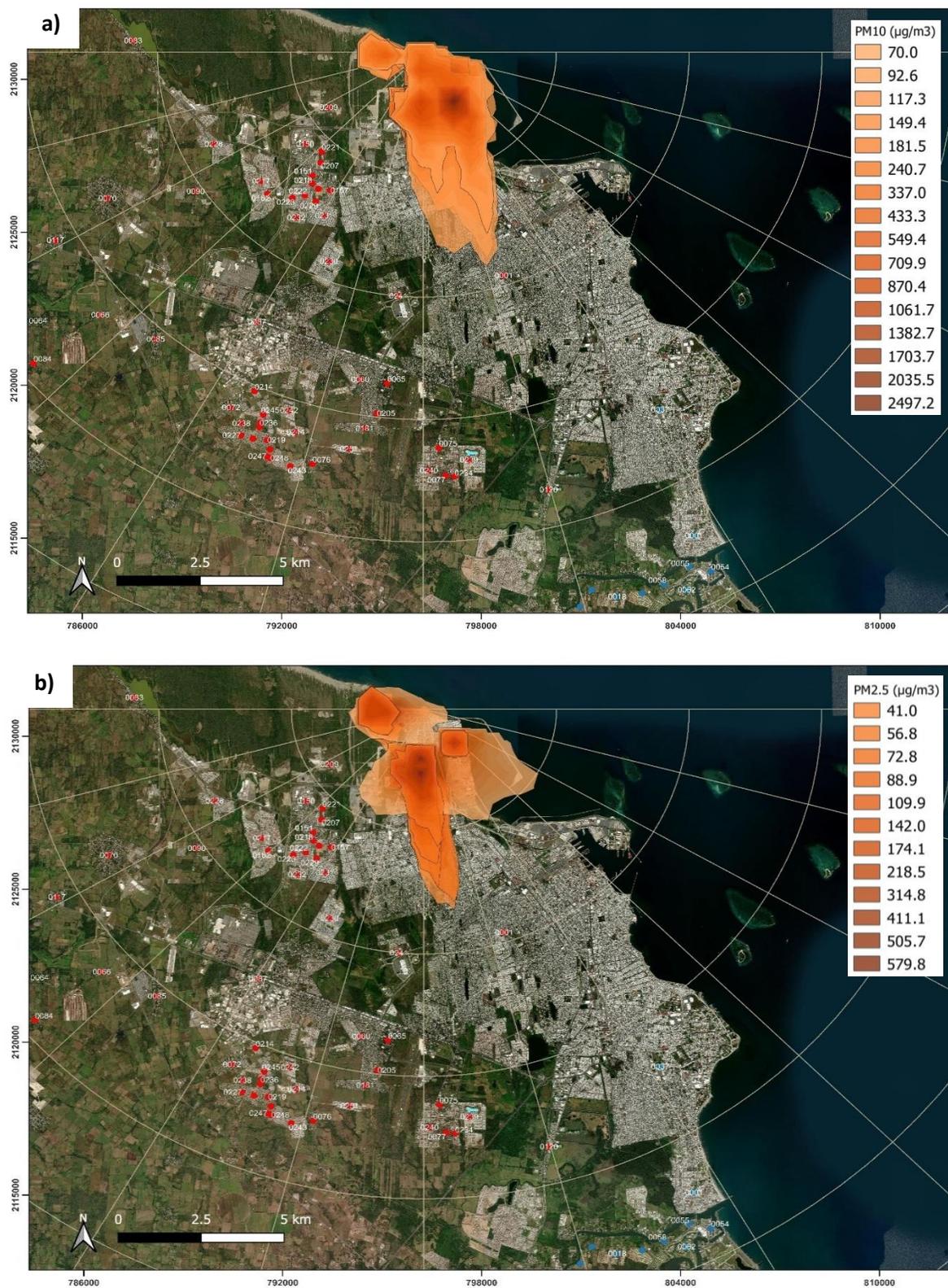


Figura 57. Zonas sensibles por contaminación atmosférica; a) PM₁₀, b) PM_{2.5}

4.6 ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL

Estudios realizados en la industria marítima por Coterrillo (2018) demuestran que las emisiones por estas actividades son responsables de 15 % de las emisiones globales de NO_x y del 16 % por SO₂. Por otro lado, Winnes et al., (2015) indican que el transporte marítimo internacional contribuye con el 2.4 % de las emisiones antropogénicas de los gases efecto invernadero (GEI) y se espera que aumenten en los siguientes años. Ante lo anterior, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha prestado mucha atención a los problemas de reducción de emisiones de los barcos, especialmente la disminución de SO_x, NO_x, CO₂, partículas y otras sustancias (IMO, 2020b).

La disminución de las emisiones por actividades portuarias puede lograrse mediante la implementación de diferentes métodos, por ejemplo, mediante el uso de combustibles amigables con el medio ambiente, vehículos eléctricos e híbridos, así como mediante la mejora de la aproximación a puerto y los canales de navegación interior, la optimización de la organización de los procesos de transporte, etc (Paulauskas et al., 2020). Sin embargo, el tamaño de la influencia de la tripulación de los buques y la calificación de los prácticos en la posibilidad de disminuir las emisiones de los barcos durante las maniobras en las áreas portuarias sigue siendo una pregunta. En 2008, como medida de minimización de las emisiones en puertos impuesta por la IMO se comenzaron a crearse las Áreas de Control de Emisiones de Azufre (ECA) en el Mar Báltico, que luego cubrieron el Mar del Norte y el Canal de la Mancha (Karl et al., 2019).

Si bien, el RPV no cuenta con una ECA, el inventario de emisiones por movimiento de buques indica que los niveles de emisiones por SO₂ son muy bajos en comparación con otros puertos internacionales como el puerto de Long Beach, puerto de Los Ángeles o el puerto de Singapur. No obstante, estudios realizados por los maestros en ingeniería Zamora E. (2019) y Antonio R.E. (2019), al igual que este trabajo de investigación, se ha encontrado que las emisiones por partículas de los buques durante sus operaciones no tienen mayor consecuencia en las altas concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en el RPV, por lo que, las principales fuentes de emisión y causantes de las altas concentraciones por partículas son las actividades desarrolladas de construcción en general y de terreno ganado al mar durante la primer etapa de ampliación del puerto de Veracruz. De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta que el RPV aún no culmina la primera etapa de ampliación y a falta de la segunda etapa (Figura 58), a continuación, se presentan las estrategias de prevención de la contaminación atmosférica para la operación y actividades de construcción (Tabla 47).



Figura 58. Proyecto de ampliación del RPV esperado al 2030
Referencia: Elaboración propia mediante datos de APIVER (2016)

Tabla 47. Medidas de prevención, minimización y control de emisiones atmosféricas

Proceso/actividad	Medidas de prevención, minimización y control	Referencia
Almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Protección de los materiales de la acción del viento: <ul style="list-style-type: none"> ○ Confinamiento de los materiales mediante muros de contención ○ Instalación de pantallas o barreras cortavientos naturales o artificiales ○ Recubrimiento con lonas o coberturas de otro tipo ○ Reducción de la superficie expuestas al viento • Reducción al máximo de la altura de los centros de acopio o pilas de almacenamiento • Mantenimiento del material expuesto con un grado de humedad suficiente para evitar la formación y dispersión de partículas • Limpieza de las áreas de manejo de carga después de su desarrollo 	<p>(La Rioja, 2016)</p> <p>(Schwela & Goelzar, 2015)</p> <p>(Elias, 2015)</p>
Manipulación de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga y descarga de materiales: <ul style="list-style-type: none"> ○ Sistemas de minimización de emisiones de partículas ○ Humectación en el momento de la descarga de camiones ○ Minimización de la altura de caída de los materiales ○ Evitación de descargas fuera de las zonas habilitadas • Sistemas de reducción de emisiones en la maquinaria de trasiego, separación y triturado de materiales: <ul style="list-style-type: none"> ○ Humectación en casos necesarios del material ○ Cerramientos, captación local de partículas ○ Carenado de las cintas transportadoras • Implementar un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos utilizados en las operaciones 	<p>(Cruz et al., 2015)</p> <p>(Fung et al., 2014)</p> <p>(Dominguez et al., 2014)</p>

Tabla 47. Medidas de prevención, minimización y control de emisiones atmosféricas (continuación)

Manipulación de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación o sustitución de motores con mejor eficiencia energética • Instalar suministro energético en tierra para las embarcaciones o equipo de manejo de carga 	(Liu et al., 2017)
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento y mantenimiento adecuado de las vías de acceso y circulación de vehículos y maquinaria para evitar emisiones de partículas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Compactación o pavimentación de la superficie de los viales de acceso y de circulación ○ Adición de material adecuado (grava, tepojal o zahorra) en suelos expuesto y pulverizados ○ Riego en los caminos de acceso, zonas de paso y pistas de tránsito ○ Limpieza de material acumulado en vías y pasos • Optimización de los planes de trabajo y minimización de los recorridos • Establecimiento de criterios de operación según las condiciones climáticas • Limitación de la velocidad de circulación de vehículos y maquinaria dentro de las instalaciones • Limpieza y mantenimiento de los vehículos, prestando especial atención en las ruedas • Cubrimiento de los materiales transportados mediante lonas o capotes u otros recubrimientos de protección • Utilización de combustibles fósiles bajos en azufre para las operaciones de embarcaciones y/o equipo terrestre 	(La Rioja, 2016)
		(Schwela & Goelzar, 2015)
		(Sofia et al., 2020)
		(Cruz et al., 2015)

Tabla 47. Medidas de prevención, minimización y control de emisiones atmosféricas (continuación)

Construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de zonas de construcción • Evitación de acumulaciones de polvo, tierras, limos o residuos anómalas por el viento • Limpieza y recogida periódica de material de construcción • Depósito y recubrimiento de residuos pulverizados • Aplicación de agua por medio de supresores durante y posterior a las actividades de construcción • Estabilización o tratamiento químico del suelo por medio de aditivos o surfactantes • Construcción de barreras contra corriente del viento • Iniciar las actividades de construcción en contra del viento dominante de la zona • Almacenar el o los materiales de construcción en zonas protegidas del viento • Anular actividades de construcción cuando las condiciones climáticas sean adversas 	<p>(Elias, 2015)</p> <p>(Liu et al., 2022)</p> <p>(Dominguez et al., 2014)</p> <p>(US EPA, 2009)</p>
---------------------	--	--

CAPÍTULO

5

CONCLUSIONES

CONTENIDO:

5.1 CONCLUSIONES

5.2 RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Con base a los objetivos planteados en este trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Se observó que, las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente no presentaron valores que excedieran el límite máximo permisible diario de 40 ppb y de 75 ppb promedio horario en 3 años consecutivos por la NOM-022-SSA1-2019, indicando una calidad del aire por SO₂ es satisfactoria en el Recinto Portuario de Veracruz (RPV). Por otro lado, se encontró que las partículas llegaron a rebasar la concentración límite de la NOM-025-SSA1-2021 en 57 días para PM₁₀ y 13 días para PM_{2.5}, ambas en promedio diario. Al analizar las rosas de contaminante y diagramas de densidad de Kernel para partículas, se observó que las altas concentraciones de partículas provienen principalmente de la zona de ampliación del RPV (bahía norte), seguido del original puerto de Veracruz (bahía sur).

Se encontró que, durante el periodo analizado la temperatura, la radiación solar y la precipitación tuvieron una estacionalidad semejante, aumentando sus valores durante la primavera y el verano, seguido de una disminución en el otoño e invierno, respectivamente. La temperatura en el RPV fue de 26 °C, con una precipitación promedio diaria de 0.015 mm y una radiación solar de 204.6 W/m². Por otro lado, se observó que la humedad relativa y la presión atmosférica tuvieron un comportamiento constante durante el monitoreo, con un promedio de humedad diario del 82 % y una presión atmosférica de 0.998 atm.

De acuerdo con los datos de velocidad y dirección del viento, se observó una estacionalidad inversa a las mostradas por la temperatura, radiación solar y precipitación, teniendo aumentos en la velocidad durante el otoño e invierno (temporadas de nortes) y una disminución la primavera y el verano.

La actualización del inventario de emisiones derivado de las operaciones de buques (estadía, maniobra y fondeo) y dragado (estadía y tránsito) permitió complementar los inventarios realizados anteriormente y así, utilizar la información generada para los casos de estudio. Se encontró que las mayores emisiones de SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5} fueron originadas por los buques de tipo *contenedores*, seguido de *granel* considerando la metodología de la Agencia Ambiental Europea y del Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación (EEA/EMEP).

Por otro lado, tomando en cuenta la metodología de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), los buques que más contribuyeron a la emisión de los contaminantes de interés en esta evaluación fueron los de tipo *combustible*, seguido del tipo *automóviles*. Las emisiones calculadas debido al movimiento de buques en el RPV indicaron que las emisiones en la bahía sur fueron del 86 % y un 92 % utilizando las metodologías de la EEA/EMEP y US EPA, respectivamente del total entre las dos bahías durante el 2019, mientras que en 2020 las emisiones de la bahía se redujeron al 61 % y un 88 % con respecto a las metodologías utilizadas para el inventario de emisiones. La principal diferencia entre las metodologías utilizadas derivó del cálculo de la potencia de funcionamiento de los motores principales y auxiliares en los diferentes modos de operación, seguido del factor de carga y los motores empleados durante el modo de operación *maniobra*.

De acuerdo con las simulaciones realizadas por medio del modelo CALPUFF se obtuvo que el RPV tiene una mala calidad del aire por PM_{10} y $PM_{2.5}$, debido principalmente a las actividades de construcción y de terreno ganado al mar en la bahía norte. En el caso del SO_2 , tanto el modelo CALPUFF como lo observado por la estación de monitoreo indican que de momento los niveles de este contaminante no representan un riesgo en la calidad del aire ambiente y por ende a la salud humana en el interior del RPV.

El modelo de dispersión CALPUFF, además de ayudar a observar el comportamiento de los contaminantes de interés, contribuyó a la identificación de las zonas sensibles por contaminación atmosférica en el área de estudio y localidades aledañas al RPV, indicando que las localidades más sensibles a la contaminación atmosférica derivada de las actividades de construcción y operación en la bahía norte del RPV son: Veracruz, Nuevo Veracruz y Lomas del Rio Medio, localidades ubicadas al sur de la zona de estudio dentro de un radio de 0-8 km de la zona de ampliación del RPV, con concentraciones promedio diario de 70 a $92.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de 41 a $56.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de $PM_{2.5}$.

Conforme a los resultados obtenidos del monitoreo de calidad del aire, la meteorología, el inventario de emisiones y las simulaciones conjuntamente, se concluye que las actividades de construcción en la zona de ampliación del RPV debido a la emisión y resuspensión de partículas perjudican de manera negativa la calidad del aire ambiente al interior del recinto portuario y en algunas localidades de acuerdo con el modelo de dispersión CALPUFF.

5.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda continuar con el monitoreo de SO₂ y partículas e incluir el resto de los contaminantes criterio (NO_x, CO, O₃ y Pb) con el objetivo de estudiar los efectos a la salud humana en el RPV durante y posterior al proyecto de ampliación. Además de recomendar la medición de nuevos contaminantes atmosféricos, se sugiere extender el monitoreo de calidad del aire en la zona urbana (Veracruz y Boca del Río) para poder detectar en tiempo real los casos de estudio en el que la calidad del aire se ve perjudicada negativamente y con ello tener una mejor toma de decisiones por las partes involucradas e interesadas.

Para posteriores inventarios de emisiones atmosféricas en el RPV se recomienda incluir la totalidad de las fuentes de emisión de las actividades de operación y construcción, si bien existe información pública de algunas actividades, se sugiere una colaboración entre el RPV, el gobierno municipal, estatal y federal para seguir desarrollando estudios al interior del puerto y en las zonas aledañas.

Se recomienda realizar un inventario de emisiones del RPV para fuentes de área, sin olvidar, las fuentes móviles y estacionarias de las cuales ya se tiene una caracterización. Con ello, es importante sugerir un trabajo de investigación para la obtención de factores de emisión con datos y condiciones de México.

Realizar una comparativa entre inventarios de emisiones atmosféricas de otros puertos nacionales e internacionales para determinar el nivel de emisiones relacionadas con la actividad marítima del RPV y del país.

Hacer un estudio integral de las emisiones de los municipios de Veracruz y Boca del Río con el objetivo de analizar cómo impactan en la calidad del aire las actividades ajenas al RPV.

Promover las medidas existentes para la prevención, minimización y control de las emisiones en el RPV, así como, implementar nuevas tecnologías para hacer más eficientes las operaciones portuarias.

Analizar la factibilidad de que México firme el Anexo VI del convenio MARPOL, para la implementación de áreas de control de emisiones para prevenir la contaminación ocasionada por las embarcaciones. Esto aportaría una postura en favor del ambiente por el país, además, de mejorar el enfoque político/administrativo del RPV.

CAPÍTULO

6

REFERENCIAS

CONTENIDO:

6.1 REFERENCIAS

6.1 REFERENCIAS

- AGP. (2020). *Modernización o ampliación de puertos argentinos*. Administración General de Puertos . <https://www.argentina.gob.ar/transporte/puertos/modernizacion-o-ampliacion>
- Agrawal, H., Welch, W. A., Miller, J. W., & Cocker, D. R. (2008). Emission measurements from a crude oil tanker at sea. *Environmental Science and Technology*, 42(19), 7098–7103. <https://doi.org/10.1021/es703102y>
- Anderson, M. J. (2008). Comparison of common dredging equipment air emissions. *Dissertations, Master's Theses and Master's Reports - Open*. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etsd/215>
- Anderson, M. J., & Barkdoll, B. D. (2010). Incorporation of Air Emissions in Dredging Method Selection. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(4), 191–199. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000039)
- Antonio, R. E. D. (2019). *Evaluación del impacto potencial en la calidad del aire por partículas debido a la operación del recinto portuario de Veracruz* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2019/noviembre/0797593/Index.html>
- API-SALINA CRUZ. (2019). *API inaugura la primera etapa de ampliación de la bocana de acceso al Puerto*. Secretaría de Marina . <https://www.puertosalinacruz.com.mx/esps/2110425/api-inaugura-la-primera-etapade-ampliacion-de-la-bocana>
- APIVER. (2016). *Programa maestro de desarrollo portuario del puerto de Veracruz 2016-2021*. <http://www.puertodeveracruz.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/PMDP-2016-2021.pdf>
- APIVER. (2018). *Programa Operativo Anual Programado 2018*. http://www.apiver.com/apiver/archivos/Planeacion/POA_2018_API_VERACRUZ.pdf
- APIVER. (2019). *Puerto en crecimiento*. Administración Portuaria Integral de Veracruz. <https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/blog/puerto-en-crecimiento-2/>
- Arozarena, V. A. (2010). *Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes*. Universidad Politécnica de Madrid. http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1068/mod_label/intro/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf

- ASIPONA-MAZ. (2021). *Presentación de los proyectos de desarrollo integral del puerto de Mazatlán* . Secretaria de Marina .
https://www.puertomazatlan.com.mx/noticias/presentacion_proyectos_desarrollo_mazatlan/
- ASIPONA-PRO. (2021a). *Ampliación del Puerto de Progreso* . Secretaría de Marina.
https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/ampliacion-del-puerto-de-progreso/
- ASIPONA-PRO. (2021b). *Proyecto de Ampliación y Modernización del Puerto*. Secretaría de Marina . <https://www.puertosyucatan.com/on/AmpliacionPuerto.htm>
- ASIPONA-VER. (2021). *Certificación: Recertificación de Marca de Calidad*. Administración Del Sistema Portuario Nacional de Veracruz.
<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/blog/recertificacion-de-marca-de-calidad/>
- ASIPONA-VER. (2022). *Infraestructura: instalaciones y equipos de operación*. Administración Del Sistema Portuario Nacional Veracruz.
<https://www.puertodeveracruz.com.mx/wordpress/infraestructura/mapa-de-instalaciones/>
- Basterra, I. (2011). *Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes*.
<http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>
- Bedia, J. L. R. (2018). *Operativa de carga e inertización del buque Tinerfe*. Universidad de Cantabria.
- Bhunja, G. S., Kumar Shit, P., & Pourghasemi, H. R. (2019). Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model. *Geocarto International*, 34(2), 215–226. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1381179>
- Bosqued, J. A. (2012). *Cálculo del equipo de dragado necesario para una draga de succión de 1000m³*. Universidad de Cantabria.
- CeMCAQ. (2017). *Dióxido de azufre (SO₂)*. Centro de Monitoreo de La Calidad Del Aire Del Estado de Querétaro. <http://www.cemcaq.mx/contaminacion/bioxido-de-azufre-so2>
- CONABIO. (2021). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Portal de Geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cooper, D., & Gustafsson, T. (2004). *Methodology for Environmental Data Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors* . <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1117198/FULLTEXT01.pdf>

- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: A global assessment. *Environmental Science and Technology*, 41(24), 8512–8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- Coterillo, A. (2018). *Estudio sobre la reducción de emisiones NOx y SOx* [Universidad de Cantabria]. [https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15456/García Coterillo%20Aída.pdf](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15456/García%20Coterillo%20Aída.pdf)
- Cromtek. (2020). *Métodos para el análisis de tamaño de partículas*. Ciencia Analítica y Tecnología . <https://www.cromtek.cl/2020/11/12/metodos-para-en-analisis-de-tamano-de-particulas/>
- Cruz, I., Cabello, J., Gonzáles, L., del Rosario, A., & Costa, I. (2015). Procedure proposal to Control atmospheric emissions in urban environments. *Ingeniería Industrial*, 36. <http://scielo.sld.cu/pdf/rri/v36n1/rri02115.pdf>
- Cuesta-Mosquera, A. P., González-Duque, C. M., Velasco-García, M., & Aristizábal-Zuluaga, B. H. (2018). Distribución Espacial de Concentraciones de SO₂, NO_x y O₃ en el Aire Ambiente de Manizales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 489–504. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.11>
- Cui, H., Yao, R., Chen, L., Lv, M., Xin, C., & Wu, Q. (2020). Field study of atmospheric boundary layer observation in a hilly Gobi Desert region and comparison with the CALMET/CALPUFF model. *Atmospheric Environment*, 235, 117576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117576>
- DAVIS. (2021). *Weather Stations*. Davis Instruments. <https://www.davisinstruments.com/>
- De Leeuw, F., Benešová, N., & Horálek, J. (2016). *Evaluation of international air quality standards* (Issue 10). https://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACM_TP_2016_10_AAQstandards.pdf
- Díaz, A. M. V. (2020). *Estimación de las concentraciones de gases de combustión de embarcaciones mercantes, en el recinto portuario de Veracruz*. Universidad Veracruzana.
- Diego, V. S. (2017). *Estimación de emisiones y medición de la calidad del aire por benceno y tolueno debido a las operaciones del recinto portuario de Veracruz, México* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2017/noviembre/0768167/Index.html>

- Diek, S., Fornallaz, F., & Schaepman, M. E. (2017). Barest Pixel Composite for Agricultural Areas Using Landsat Time Series. *Remote Sensing*, 9(12), 1245.
<https://doi.org/10.3390/rs9121245>
- DISC. (2007). *General Arrangement Leonard Springerlaan 9*.
- DOF. (1993). *NOM-038-SEMARNAT-1993 Métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición*.
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/>
- DOF. (2012). *NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012
- DOF. (2019). *NOM-022-SSA1-2019, Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019
- DOF. (2021). *NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población*. Diario Oficial de La Federación.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021
- Dominguez, A. (1996). Procesamiento Digital de Imágenes. *Perfiles Educativos*, 72, 1–11.
<https://www.redalyc.org/pdf/132/13207206.pdf>
- Dominguez, C., Bravo, H., & Sosa, R. (2014). *Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México*. Ingeniería Investigación y Tecnología. <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v15n4/v15n4a6.pdf>
- EEA/EMEP. (2019a). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories (3.B Manure Management). In *EEA Technical report* (Issue 13/2019). <https://doi.org/10.2800/293657>
- EEA/EMEP. (2019b). International maritime navigation, international inland navigation, national navigation (shipping), national fishing, military (shipping), and recreational boats. In *European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/publications/>

- Elias, J. (2015). Control de la contaminación atmosférica. In *Control de la contaminación ambiental* (pp. 1–60).
<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+55.+Control+de+la+contaminación>
- ENTEC. (2002a). *Chapter 2. Ship Emissions Final Report - Quantification of Ship Emissions* (Issue July). http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf
- ENTEC. (2002b). *Chapter 3. Market Survey of Marine Distillates with 0.2% Sulphur Content* (Issue July 2002). http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter3_end_ship_emissions.pdf
- ENTEC. (2007). *UK Ship Emissions Inventory*. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat15/1012131459_21897_Final_Report_291110.pdf
- EPA. (2015). *FACTORES DE EMISIÓN*. Establecimiento Público Ambiental de Cartagena .
<http://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/seguimiento-y-monitoreo/protocolo-monitoreo-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-cartagena/factores-de-emision/>
- ESPO. (2021). *ESPO Environmental Report 2021* . <https://www.espo.be/media/ESP-2844>
(Sustainability Report 2021) FINAL.pdf
- ESRI. (2022). *Galería de índices*. ESRI. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- Exponent. (2020). *CALPUFF Modeling System*. Exponent Engineering and Scientific Consulting.
<http://www.src.com/>
- Fu, M., Liu, H., Jin, X., & He, K. (2017). National- to port-level inventories of shipping emissions in China. *Environmental Research Letters*, *12*(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa897a>
- Fuentes García, G., Baldasano Recio, J. M., Sosa Echeverría, R., Granados Hernández, E., Zamora Vargas, E., Antonio Duran, R., & Kahl, J. W. (2021). Estimation of atmospheric emissions from maritime activity in the Veracruz port, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *71*(8), 934–948. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1902421>
- Fuentes García, G., Sosa Echeverría, R., Baldasano Recio, J. M., W. Kahl, J. D., & Antonio Durán, R. E. (2022). Review of Top-Down Method to Determine Atmospheric Emissions in Port. Case of Study: Port of Veracruz, Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(1), 96. <https://doi.org/10.3390/jmse10010096>

- Fuentes García, G., Sosa Echeverría, R., Baldasano Recio, J. M., W. Kahl, J. D., Granados Hernández, E., Alarcón Jiménez, A. L., & Antonio Durán, R. E. (2021). Atmospheric Emissions in Ports Due to Maritime Traffic in Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1186. <https://doi.org/10.3390/jmse9111186>
- Fung, F., Zhu, Z., Becque, R., & Finamore, B. (2014). Prevention and control of shipping and Port Air emissions in china. *NRDC White Paper, october*. www.suerossi.com
- García, E. (2015). Climas (clasificación de Koppen) Escala 1:1000000 México. In *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Garza, S. G. G. (2019). *Anexo VI del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL)*. Gaceta Del Senado. https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_comision_permanente/documento/97195
- Gómez, I. L. (2020). *El Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y su interpretación*. SCOSCRIP. <https://ecoscript.org/interpretacionndvi/>
- Hsu, W. K. K., Huang, S. H. S., & Huynh, N. T. (2021). An Evaluation Model for Foreign Direct Investment Performance of Free Trade Port Zones. *Promet - Traffic & Transportation*, 33(6), 859–870. <https://doi.org/10.7307/PTT.V33I6.3844>
- IMO. (2009). *Second IMO GHG Study 2009*. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/SecondIMO_GHGStudy2009.pdf
- IMO. (2015a). *Ships face lower sulphur fuel requirements in emission control areas from 1 January 2015*. International Maritime Organization. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/44-ECA-sulphur.aspx>
- IMO. (2015b). *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf>
- IMO. (2020a). *Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)*. International Maritime Organization. [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

- IMO. (2020b). *Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques*. Organización Marítima Internacional .
<https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave. Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825198039>
- INMOLEY. (2021). *Ingeniería de puertos. el puerto de rotterdam adjudica contrato de ampliación*. Revista Iberoamericana de Construcción, Urbanismo e Inmobiliario.
<https://www.inmoley.com/NOTICIAS/2112345/2021-1-inmobiliario-urbanismo-vivienda/02-21-inmobiliario-023-22.html>
- Jafari, P., Atabi, F., Moattar, F., & Yousefi, H. (2020). On the reliability of CALPUFF and AUSTAL 2000 modeling systems regarding smoke and vapor plume merge. *Időjárás*, 124(2), 299–309. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.2.8>
- Jutze, G., & Axettell, K. (1986). *Investigation Of Fugitive Dust, Volume 1 Sources, Emissions and Control*.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000MC0V.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP&Index=Prior to 1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict>
- Karanassos, H. A. (2016). Survey of Bunkers R.O.B. *Commercial Ship Surveying*, 191–214.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100303-9.00011-0>
- Karmakar, A. (2020). *Monitoreo de partículas* . IOZOM . <https://oizom.com/knowledgebank/particulate-matter-monitoring/>
- Kumar, P., Pandey, P. C., Singh, B. K., Katiyar, S., Mandal, V. P., Rani, M., Tomar, V., & Patariya, S. (2016). Estimation of accumulated soil organic carbon stock in tropical forest using geospatial strategy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(1), 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.003>
- La Rioja. (2016). *Medidas de prevención, corrección y seguimiento de las emisiones difusas* . Portal Del Gobierno de La Rioja. <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/calidad-aire-cambio-climatico/contaminacion/apcas/medidas-prevencion-correccion-seguimiento-emisiones-difusas>

- Lakes. (2021). *CALPUFF View* . Lakes Environmental Software.
<https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/calpuff-view/>
- Lara, G. I. C. (2020). *Riesgos Químicos por Manejo de Combustibles Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos en el Recinto Portuario de Veracruz* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2020/diciembre/0805867/Index.html>
- Liu, X., Guo, C., Wu, Y., Huang, C., Lu, K., Zhang, Y., Duan, L., Cheng, M., Chai, F., Mei, F., & Dai, H. (2022). Evaluating cost and benefit of air pollution control policies in China: a systematic review. *Journal of Environmental Sciences*, xxxx.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.043>
- Liu, Z., Lu, X., Feng, J., Fan, Q., Zhang, Y., & Yang, X. (2017). Influence of Ship Emissions on Urban Air Quality: A Comprehensive Study Using Highly Time-Resolved Online Measurements and Numerical Simulation in Shanghai. *Environmental Science and Technology*, 51(1), 202–211. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03834>
- Liviano, J., & Rodríguez, J. (2013). *Granelero 50.000 TPM* [E.T.S.I. Navales (UPM)].
<https://oa.upm.es/14418/>
- Lloyd's Register. (1995). *Marine Exhaust Emissions Quantification Study* .
https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/marine_exhausts.pdf
- Lonati, G., Cernuschi, S., & Sidi, S. (2010). Air quality impact assessment of at-berth ship emissions: Case-study for the project of a new freight port. *Science of The Total Environment*, 409(1), 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.029>
- López, M. T. V. (2009). *Aplicación del Modelo de Dispersión CALPUFF para la estimación de concentraciones del PM2.5* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://132.248.9.195/ptd2009/noviembre/0652066/Index.html>
- MAN. (2020). *Technical Documentation Project Guide*. https://man-es.com/applications/projectguides/4stroke/manualcontent/PG_M-III_L2330DF.pdf
- Manzano, D. A., & Oña, D. L. (2018). *Análisis de la Espectroscopia de Reflectancia para la Determinación de las Propiedades Químicas de Suelos Agrícolas en La Parroquia de Lloa* [Universidad de las Fuerzas Armadas].
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15265/T-ESPE-040525.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Merico, E., Dinoi, A., & Contini, D. (2019). Development of an integrated modelling-measurement system for near-real-time estimates of harbour activity impact to atmospheric pollution in coastal cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73(June), 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.009>
- Met One Instruments. (2020). *BAM 1020 Continuous Particulate Monitor*. Met One Instruments, Inc. <https://metone.com/products/bam-1020/>
- Moretti, E., & Neidell, M. (2011). Pollution, Health, and Avoidance Behavior: Evidence from the ports of Los Angeles. *Journal of Human Resources*, 46(1), 154–175. <https://doi.org/10.3368/jhr.46.1.154>
- Mousavi, A., Sowlat, M. H., Hasheminassab, S., Pikelnaya, O., Polidori, A., Ban-Weiss, G., & Sioutas, C. (2018). *Impact of particulate matter (PM) emissions from ships, locomotives, and freeways in the communities near the ports of Los Angeles (POLA) and Long Beach (POLB) on the air quality in the Los Angeles county*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.044>
- MPA. (2019). *Size matters: inside the Tuas Mega Port project in Singapore*. Maritime and Port Authority of Singapore. <https://www.ship-technology.com/features/size-matters-inside-tuas-mega-port-project-singapore/>
- Muñoz, J., Sobrino, J., & Sòria, G. (2011). Procesamiento digital de imágenes de satélite. *Teledetección Aplicada Al Medio Ambiente*. https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf
- Murena, F., Mocerino, L., Quaranta, F., & Toscano, D. (2018). Impact on air quality of cruise ship emissions in Naples, Italy. *Atmospheric Environment*, 187(March), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.056>
- Nazario, R. P. (2014). *Importancia y aplicación de factores de emisión para las actividades desarrolladas en un recinto portuario* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0708166/Index.html>
- NCAR. (2021). *NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids*. Research Data Archive; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-15952-6>
- NGFA. (2001). *Emission Factors for Barges and Marine Vessels Final Test Report Emission Factors for Barges and Marine Vessels Final Test Report*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-10/documents/rel_c09s0901.pdf

- Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L.-Z. (2021). A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. *Land*, 10(3), 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K. (2021). New Inventory of Dust Emission Sources in Central Asia and Northwestern China Derived From MODIS Imagery Using Dust Enhancement Technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020JD033382>
- Noble, C. A., Vanderpool, R. W., Peters, T. M., McElroy, F. F., Gemmill, D. B., & Wiener, R. W. (2001). Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter. *Aerosol Science and Technology*, 34(5), 457–464. <https://doi.org/10.1080/02786820121582>
- OMS. (2013). *Contaminacion atmosferica*. Organizacion Mundial de La Salud. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/es/
- OMS. (2021). *Calidad del aire ambiente (exterior)*. Organización Mundial de La Salud . [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality)
- Paulauskas, V., Filina-Dawidowicz, L., & Paulauskas, D. (2020). The method to decrease emissions from ships in port areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12114374>
- PC. (2022). *Ampliación del puerto de Playa Blanca* . Puertos Canarios. <https://puertoscanarios.es/ampliacion-del-puerto-de-playa-blanca/>
- PDIT. (2020). *Comunicado No. 004 La ampliación del Puerto de Coatzacoalcos es fundamental para el desarrollo del Istmo de Tehuantepec* . Programa Istmo . <https://www.gob.mx/programaistmo/documentos/comunicado-no-004-la-ampliacion-del-puerto-de-coatzacoalcos-es-fundamental-para-el-desarrollo-del-istmo-de-tehuantepec>
- REDMET. (2020). *Dirección de Monitoreo Atmosférico*. Calidad Del Aire- Ciudad de México. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBi%27>
- Riaño, D., Salas, J., & Chuvieco, E. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multi-temporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. *Tecnologías Geográficas Para El Desarrollo Sostenible*. https://www.researchgate.net/publication/228597151_Correccion_Atmosferica_y_Topografica_Informacion_Multitemporal_y_Auxiliar_Aplicadas_a_la_Cartografia_de_Modelos_de_Combustibles

- Ribeiro, P. G., Martins, G. C., Gastauer, M., da Silva Junior, E. C., Santos, D. C., Frois Caldeira Júnior, C., Cavalcante, R. B. L., dos Santos, D. S., Carneiro, M. A. C., Valadares, R. B. da S., Nascimento Junior, W. da R., Oliveira, G., Souza Filho, P. W. M. e, & Ramos, S. J. (2022). Spectral and Soil Quality Index for Monitoring Environmental Rehabilitation and Soil Carbon Stock in an Amazonian Sandstone Mine. *Sustainability*, 14(2), 597.
<https://doi.org/10.3390/su14020597>
- Rígido, D. (2020). *Monitoreo de PM10* . IOZOM. <https://oizom.com/knowledgege-bank/particulate-matter-monitoring-pm10/>
- Rígido, D. (2020). *Monitoreo de SO2* . OIZOM. <https://oizom.com/knowledgege-bank/so2-monitoring/>
- Rioja, H., & Zúñiga, P. E. (2017). Efectos en salud por la contaminación atmosférica en México. *Instituto Nacional de Salud Pública*, 1–77.
https://www.paho.org/mex/index.php?option=com_docman&view=download&slug=1301-efectos-salud-horacio-riojas&Itemid=493
- Rodríguez, E. M. (2018). *Familiarización con el Buque Tanque Petrolero/Quimiquero Clase-Y Tinerfe y sus Operaciones*. Universidad de La Laguna.
- Rodriguez, J. M., & Sánchez, C. (2011). *Portacontenedor sin escotillas 6500 TPM* [E.T.S.I. Navales (UPM)]. <https://oa.upm.es/9101/>
- Rojas, E. M. (2016). *Estimación de emisiones de partículas por manejo de granel en recintos portuarios : caso de estudio recinto portuario de Veracruz* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2016/noviembre/0753546/Index.html>
- Romero, M., Diego, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Rev Cubana Hig Epidemiol*, 44(2).
<http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v44n2/hie08206.pdf>
- Salgado, G. Á. (2015). *Análisis de riesgo en las áreas de almacenamiento para combustibles en el recinto portuario de Veracruz* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://132.248.9.195/ptd2015/abril/0728352/Index.html>
- Schwela, D., & Goelzar, B. (2015). Gestión de la contaminación atmosférica. In *Control de la contaminación ambiental* (pp. 1–60).
<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+55.+Control+de+la+contaminación+ambiental>

- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. *Eearth Tech. Inc, January*, 521. [https://doi.org/10.1016/0196-9781\(85\)90178-0](https://doi.org/10.1016/0196-9781(85)90178-0)
- SCT. (2015). *Anuario Estadístico* . Secretaría de Comunicaciones y Transporte . https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/180665/Anuario_Estadistico_Sector_Comunicaciones_y_Transportes_2015.pdf
- SCT. (2017). *Sistema portuario nacional*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/puertos-de-mexico/>
- SCT. (2020a). *Ampliación del Puerto de Manzanillo: Terminal Especializada en Contenedores II*. Secretaria de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte . https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/ampliacion-del-puerto-de-manzanillo-terminal-especializada-en-contenedores-ii/
- SCT. (2020b). *El Puerto de Tuxpan recibirá inversión privada por 22 mil 260 millones de pesos* . Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <https://www.gob.mx/sct/prensa/el-puerto-de-tuxpan-recibira-inversion-privada-por-22-mil-260-millones-de-pesos>
- SCT. (2021). *Participa la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante en la XII Reunión Ordinaria de CIP de la OEA*. Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. <https://www.gob.mx/puertosymarinamercante/es/articulos/participa-la-coordinacion-general-de-puertos-y-marina-mercante-en-la-xii-reunion-ordinaria-de-la-comision-interamericana-de-puertos-cip-de-la-organizacion-de-estados-americanos-oea-272660?idiom=es>
- SDI. (2019). Los puertos de la Región Sur Sureste de México: Ampliación del puerto de Veracruz. In *Prospectiva* (Vol. 2). <https://www.uv.mx/secretaria-desarrolloinstitucional/files/2019/07/PROSPECTIVA-VOL2.pdf>
- SEGOB. (2020a). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat>
- SEGOB. (2020b). *Secretaría de Salud*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/salud>
- SEGOB. (2021). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes* . Gobierno de México . <https://www.gob.mx/sct>
- SEMAR. (2016). *Puerto de Veracruz*. Secretaría de Marina. <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf>

- SEMARNAT. (2019). *Se suma México al convenio internacional para prevenir contaminación por buques*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
<https://www.gob.mx/semarnat/prensa/se-suma-mexico-al-convenio-internacional-para-prevenir-contaminacion-por-buques>
- SINAY. (2021). *How Do Ports Affect Air Quality? Air Quality Monitoring*. Maritime Data Solution. <https://sinay.ai/en/how-do-ports-affect-air-quality-air-quality-monitoring-for-ports/>
- Soares, I. P., De Rezende, D. C. G., & De Almeida, K. N. (2021). Optimal Designing of Air Quality Monitoring Network around a Port, in Bahia State. *8th Congreso Colombiano y Conferencia Internacional En Calidad de Aire y Salud Publica, CASAP 2021 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/CASAP54985.2021.9703396>
- Sofia, D., Gioiella, F., Lotrecchiano, N., & Giuliano, A. (2020). Mitigation strategies for reducing air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16), 19226–19235. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08647-x>
- Song, S. (2014). Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmospheric Environment*, 82(x), 288–297.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.006>
- Sosa, R. E., Retama, A. H., & Sanchez, P. A. (2020, June 30). Sulfur Dioxide and Particles (PM10) Air Quality in a Port Located on the Gulf of Mexico . *A&WMA ACE 2020 Virtual Conference*.
<https://www.eventscribe.com/2020/ACEVIRTUAL/fsPopup.asp?efp=SIJUWEJSWkExMTIwMw&PresentationID=739115&rnd=0.1870776&mode=presinfo>
- Starcrest Consulting Group. (2015). *Port of Long Beach 2014 Air Emissions Inventory*.
<https://www.safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/10/POLB-Air-Emissions-Inventory-2014.pdf>
- Stott, L., & Ramil, X. (2014). *Metodología para el desarrollo de estudios de caso*.
www.itd.upm.es.
- Suárez, L., Álvarez, D., BendeZú, Y., & Pomalaya, J. (2017). Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 83(2), 187–199. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i2.197>
- Sykas, D. (2020). *Spectral Indices with multispectral satellite data*. Earth Observation.
<https://www.geo.university/pages/blog?p=spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>

- Tami, L. M. P. (2013). *Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2013/mayo/0694338/Index.html>
- Teledyne. (2020). *Teledyne API Model T100 UV Fluorescence SO2 Analyzer*. Teledyne API Everywhere You Look. <http://www.teledyne-api.com/products/sulfur-compound-instruments/t100>
- TENDERS. (2019). *Kollam Port Extension of First Floor of Customs*. HARBOUR ENGINEERING DEPARTMENT. <https://www.tendersontime.com/india/details/kollam-port-extension-first-floor-customs-office-building-pallithottam-2444222/>
- Toscano, D., Murena, F., Quaranta, F., & Mocerino, L. (2021). Assessment of the impact of ship emissions on air quality based on a complete annual emission inventory using AIS data for the port of Naples. *Ocean Engineering*, 232(April), 109166. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109166>
- Transport & Environment. (2012). *Sulphur in marine fuels*. Europe's Leading NGO Campaigning for Cleaner Transport. <https://www.transportenvironment.org/discover/sulphur-marine-fuels/>
- Trozzi, C. (2010). *Emission estimate methodology for maritime navigation*. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf>
- US EPA. (2007). *Emission Inventories for Ocean - Going Vessels Using Category 3 Propulsion Engines In or Near the United States: Draft Technical Support Document*. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100LKVH.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006+Thru+2010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- US EPA. (2008). *Control of Emissions of Air Pollution From Locomotive Engines and Marine Compression-Ignition Engines Less Than 30 Liters per Cylinder; Republication; Final Rule*. <http://www.epa.gov/otaq/>
- US EPA. (2009). *Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Category 3 Marine Diesel Engines*. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1005ZGH.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006>

- US EPA. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*.
<https://19january2017snapshot.epa.gov/www3/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>
- US EPA. (2013). Recommended Procedures for Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database. In *United States Environmental Protection Agency*.
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-09/documents/procedures81213.pdf>
- US EPA. (2014). *2014 National Emissions Inventory (NEI) Technical Support Document (TSD)*.
<https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2014-national-emissions-inventory-nei-technical-support-document-tsd>
- US EPA. (2015). *U.S. National Black Carbon and Methane Emissions: A Report to the Arctic Council*. US Environmental Protection Agency & Climate & Clean Air Coalition.
<https://www.ccacoalition.org/en/resources/us-national-black-carbon-and-methane-emissions-report-arctic-council-0>
- US EPA. (2016). *Reference and Equivalent Methods Used to Measure National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Criteria Air Pollutants*. United States Environmental Protection Agency.
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&count=10000&dirEntryId=321491&searchall=&showcriteria=2&simplesearch=0&timstype=
- US EPA. (2017a). *2017 National Emissions Inventory (NEI) Data*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2017-national-emissions-inventory-nei-data>
- US EPA. (2017b). *2017 National Emissions Inventory (NEI) Data*. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2017-national-emissions-inventory-nei-data>
- US EPA. (2018). *EPA and Port Everglades Partnership: Emission Inventories and Reduction Strategies*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ports-initiative/epa-and-port-everglades-partnership-emission-inventories-and-reduction-strategies>
- US EPA. (2020a). *Air Emissions Factors and Quantification*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification>
- US EPA. (2020b). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

- US EPA. (2020c). *Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emission Inventories* (Issue February).
- USGS. (2017). *Landsat 8*. USGS Science For a Changing World .
<https://web.archive.org/web/20160413002357/http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>
- USGS. (2018). *Landsat 8 Data Users Handbook* .
<https://web.archive.org/web/20180717195435/https://landsat.usgs.gov/landsat-8-data-users-handbook>
- VALENCIAPORT. (2020). *Obras relacionadas con el puerto de Valencia* . Puerto de Valencia .
<https://www.valenciaport.com/autoridad-portuaria/infraestructuras/en-proyecto/>
- Winnes, H., Styhre, L., & Fridell, E. (2015). Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in Transportation Business and Management*, 17, 73–82.
<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.008>
- Zamora, E. V. (2019). *Prevención del deterioro significativo por bióxido de azufre por la operación del recinto portuario de Veracruz* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://132.248.9.195/ptd2019/enero/0784057/Index.html>
- Ziran, J., Chunfang, P., Huayou, Z., Chengjin, W., & Shilin, Y. (2022). Temporal and spatial evolution and influencing factors of the port system in Yangtze River Delta Region from the perspective of dual circulation: Comparing port domestic trade throughput with port foreign trade throughput. *Transport Policy*, 118, 79–90.
<https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2022.01.022>

CAPÍTULO

7

ANEXOS

CONTENIDO:

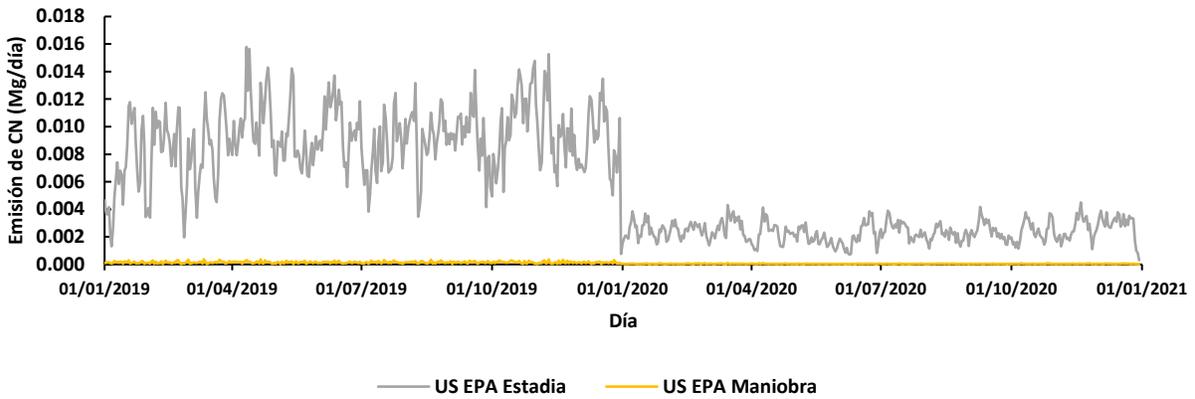
ANEXO 1: EMISIONES DIARIAS DE CN, CH₄ Y N₂O POR MOVIMIENTO DE
BUQUES

ANEXO 2: SIMULACIONES DE CASOS DE ESTUDIO

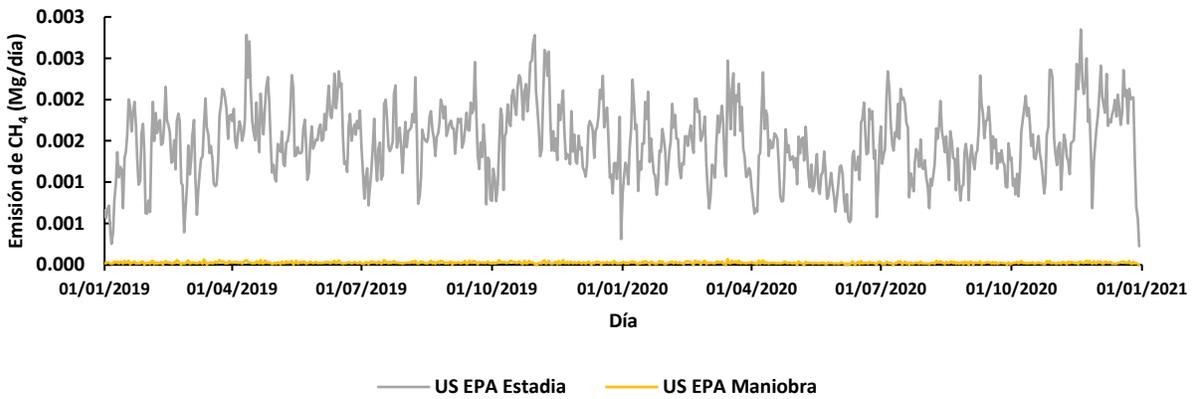
ANEXO 3: LOCALIDADES DEL MUNICIPIO DE VERACRUZ Y BOCA DEL
RIO

ANEXO 1: EMISIONES DIARIAS DE CN, CH₄ Y N₂O POR MOVIMIENTO DE BUQUES

a)



b)



c)

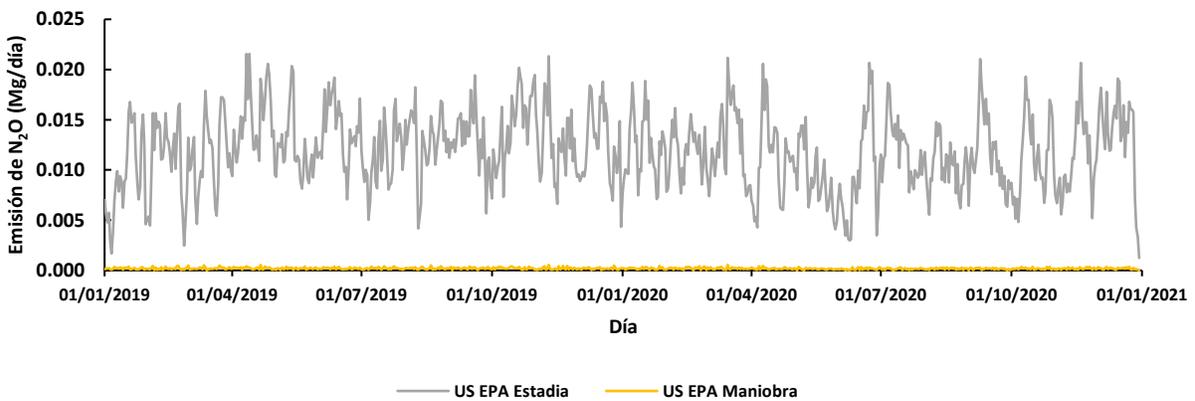


Figura 59. Emisiones atmosféricas; a) CN, b) CH₄ y c) N₂O

ANEXO 2. SIMULACIONES DE CASOS DE ESTUDIO

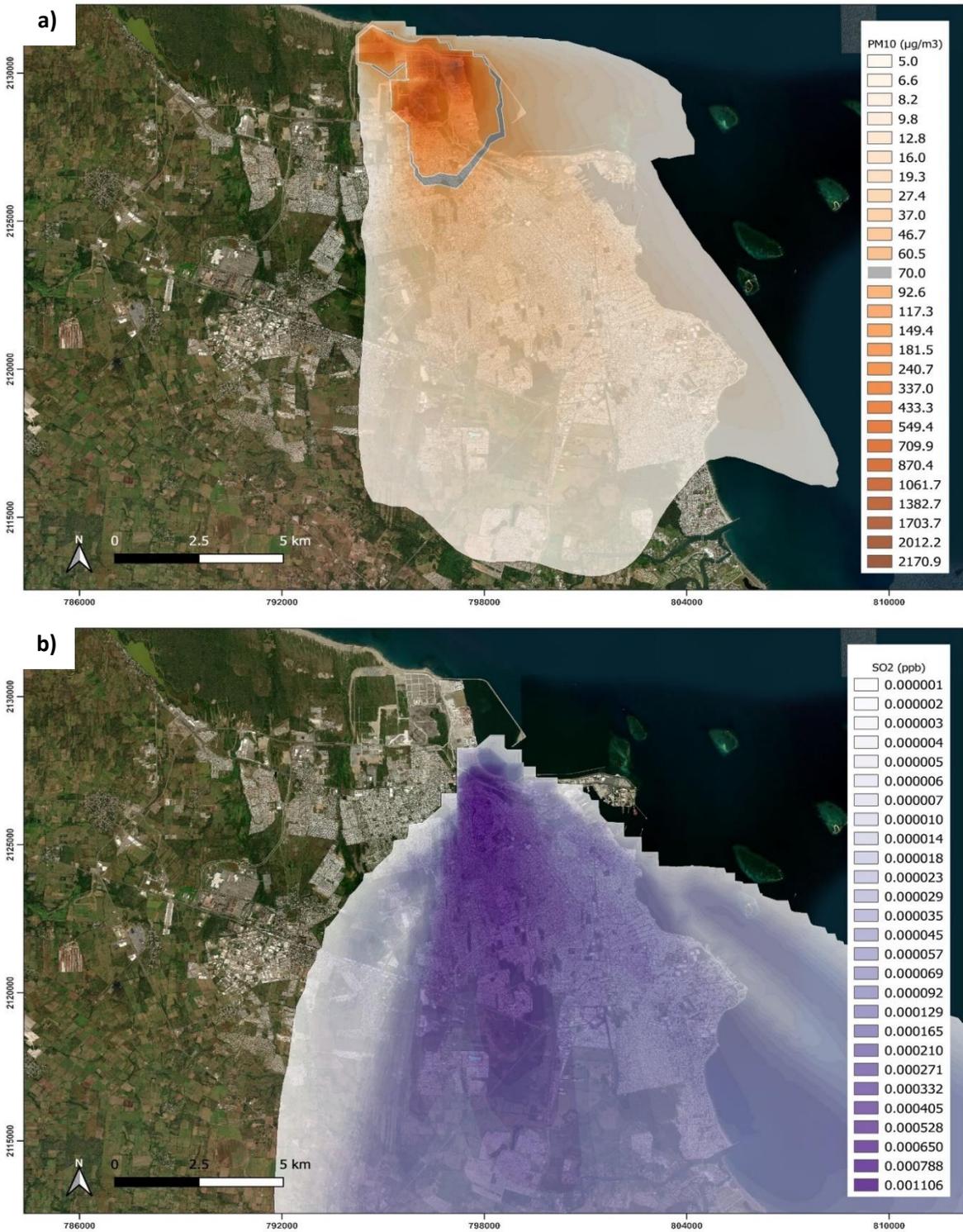


Figura 60. Dispersión promedio diario de PM₁₀ (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 01-10-2017

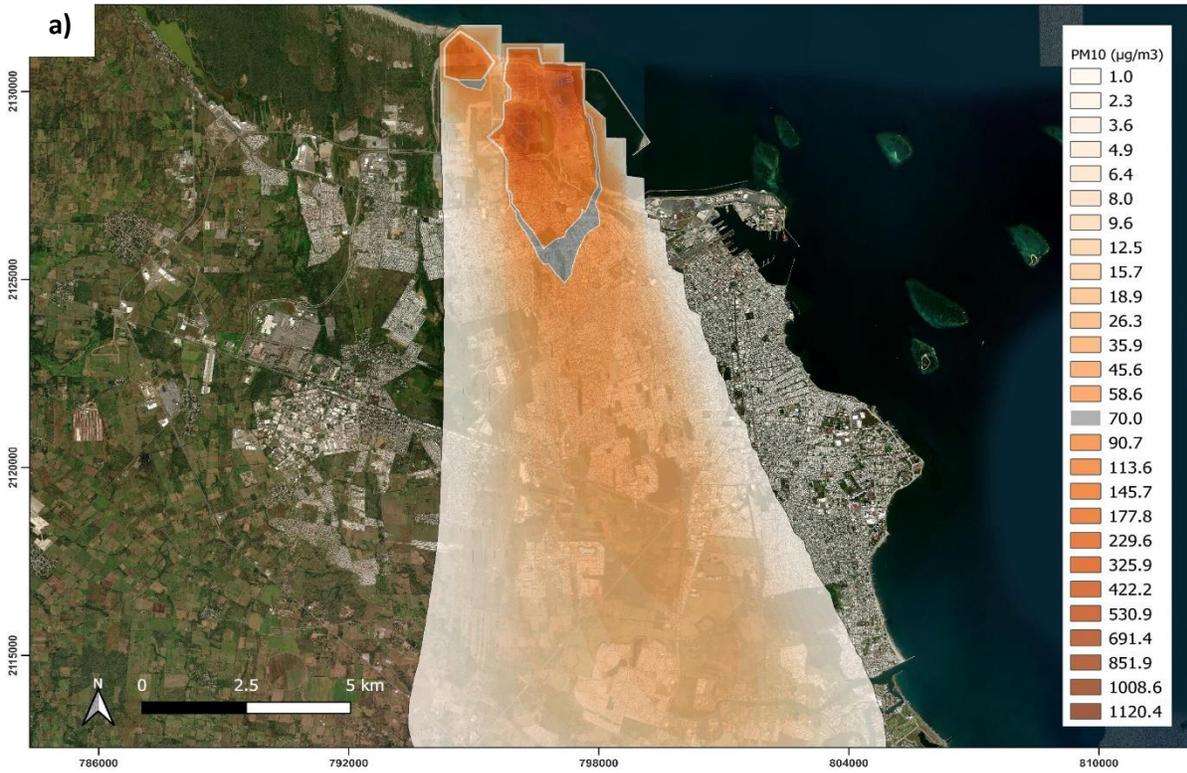


Figura 61. Dispersión promedio diario de PM₁₀ (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 18-10-2017

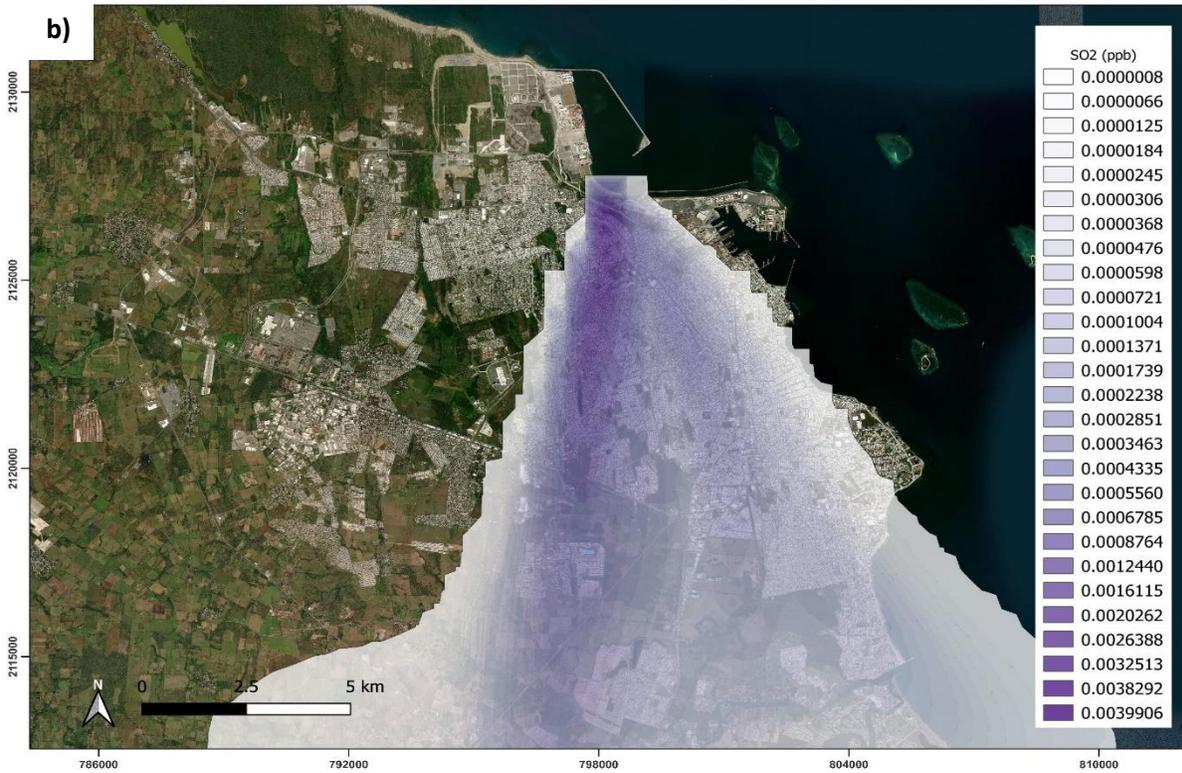
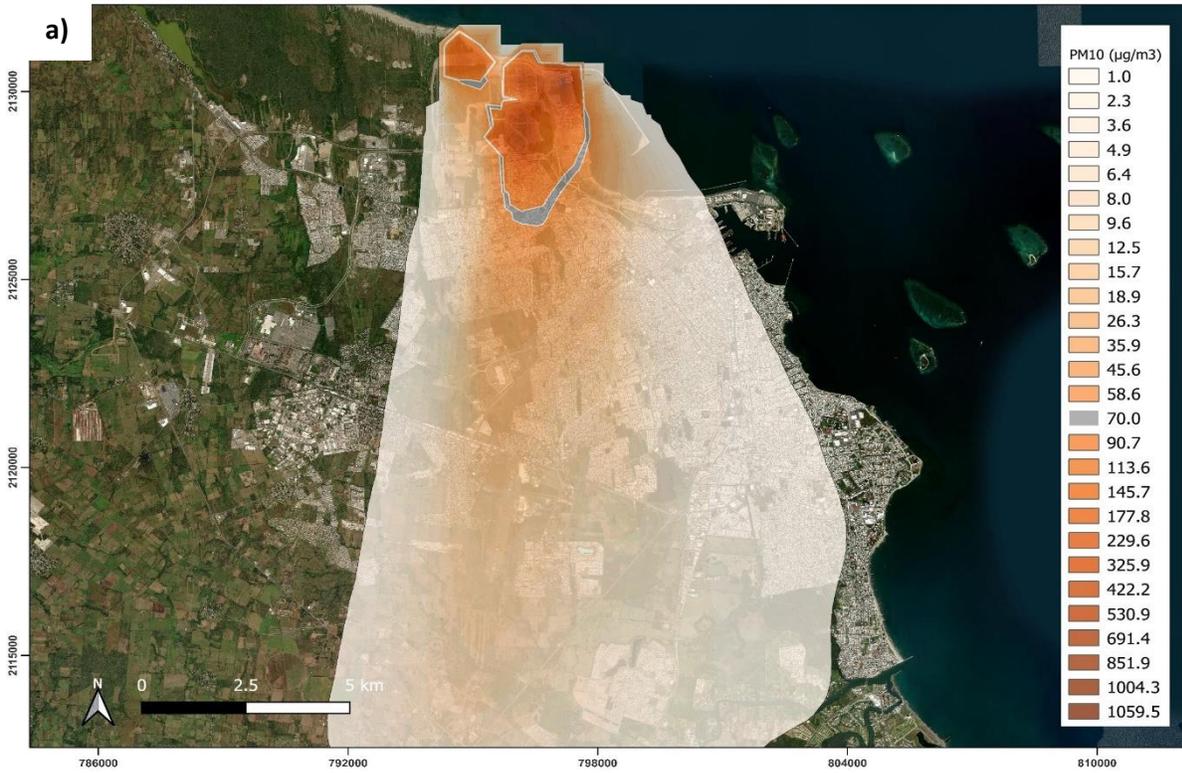


Figura 62. Dispersión promedio diario de PM_{10} (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 24-10-2017

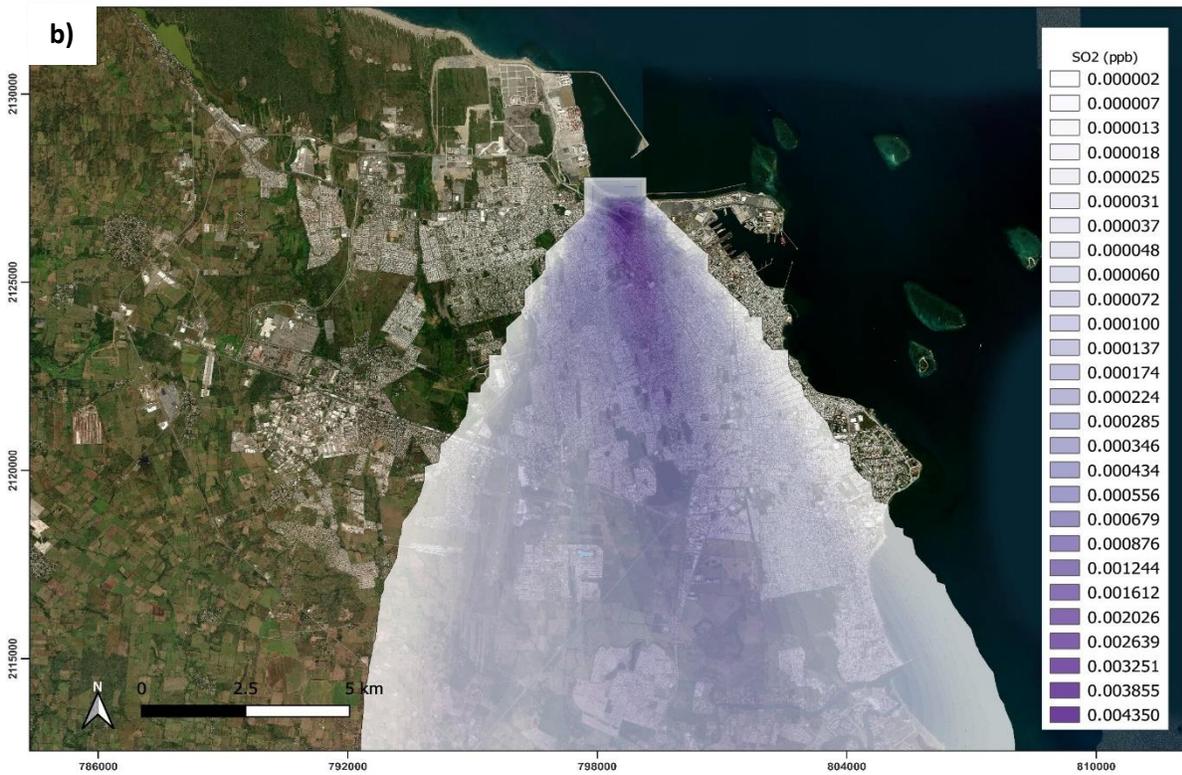
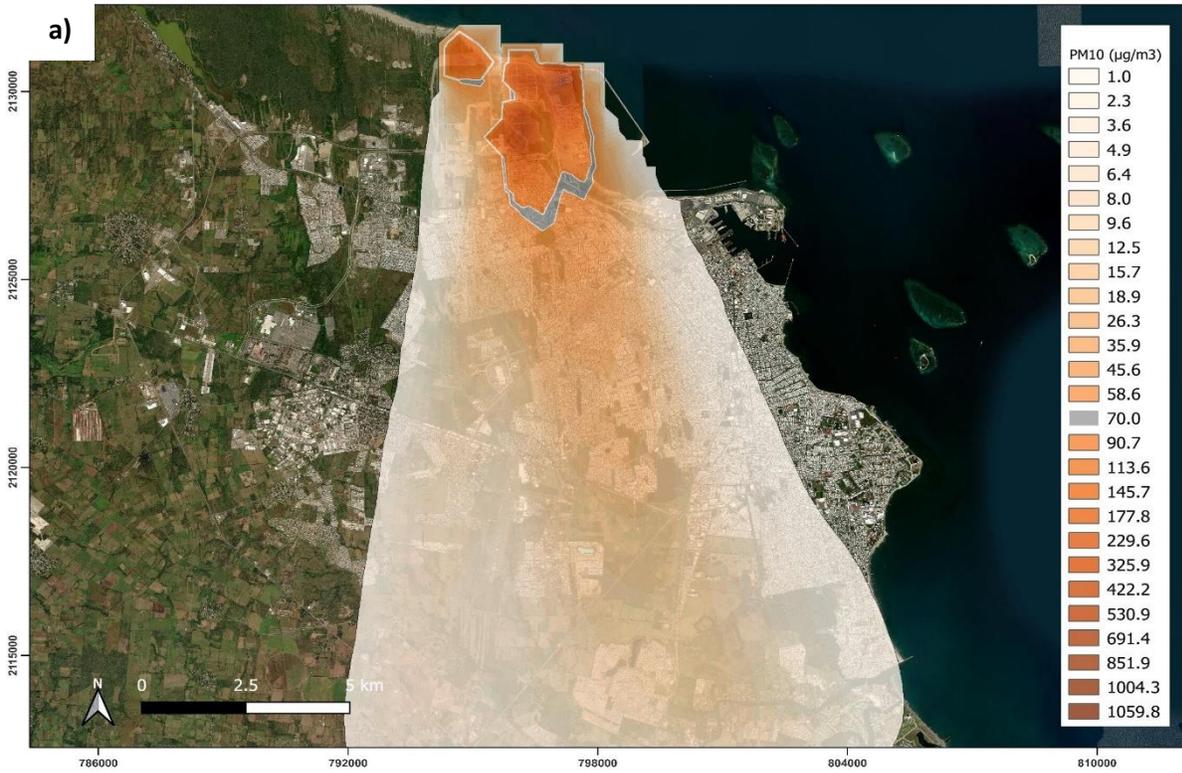


Figura 63. Dispersión promedio diario de PM₁₀ (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 25-10-2017



Figura 64. Dispersión promedio diario de PM₁₀ (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 13-11-2017

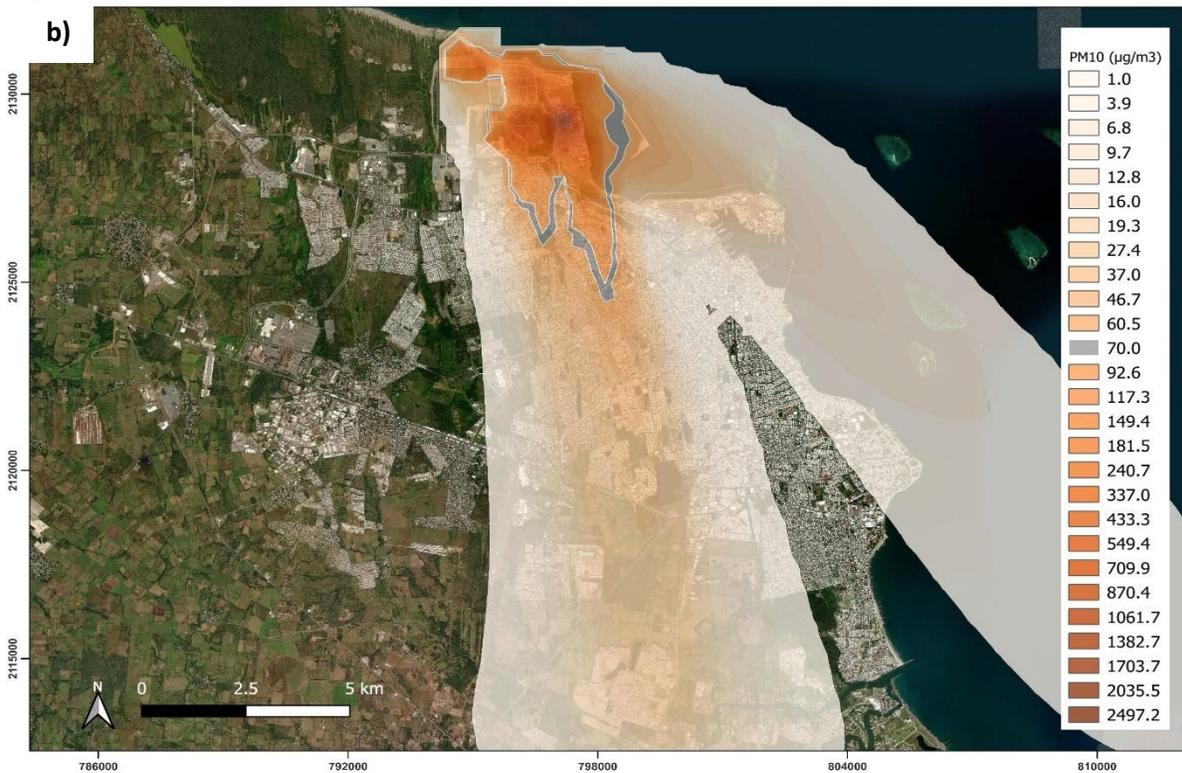
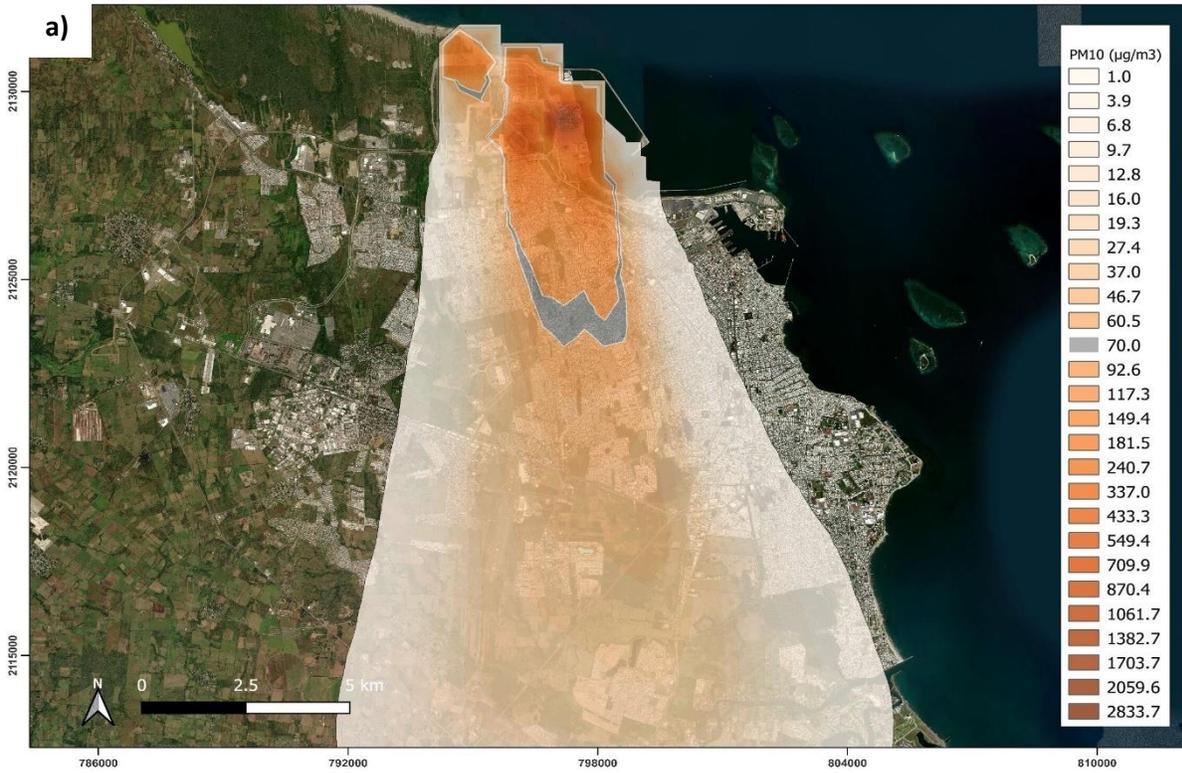


Figura 65. Dispersión promedio diario de PM_{10} ; a) 07-12-2017, b) 08-12-2017

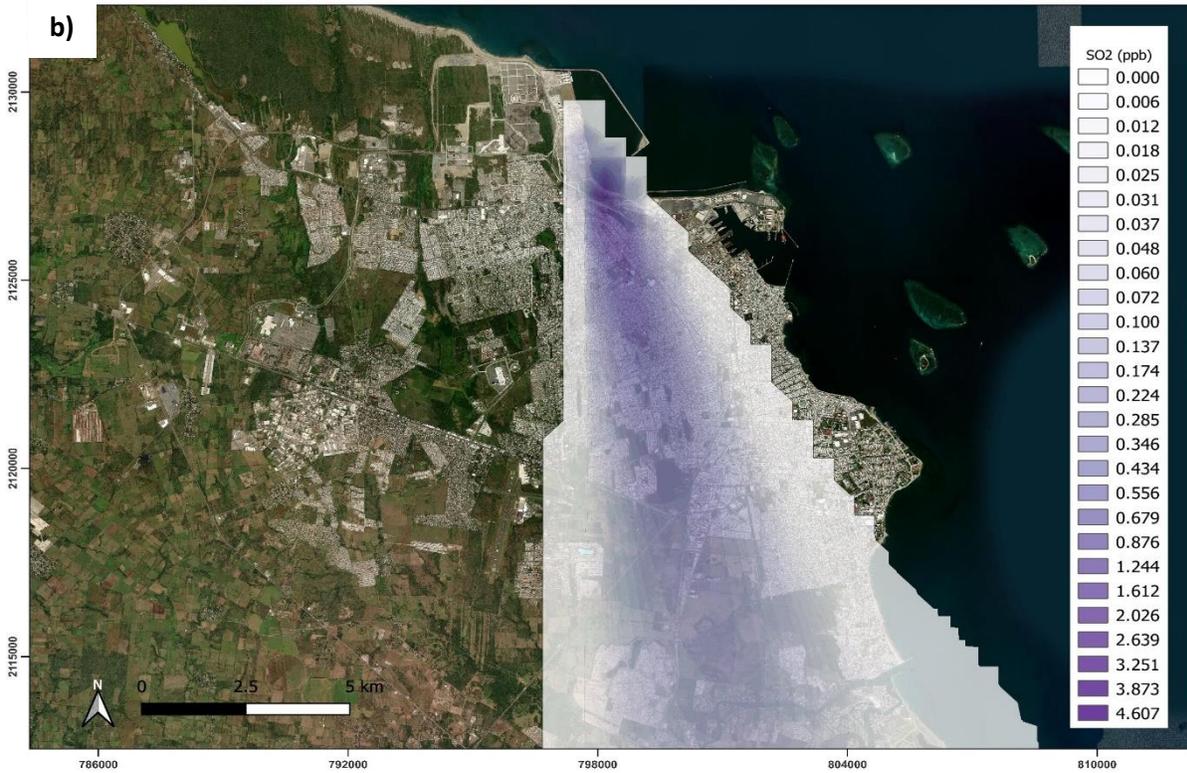


Figura 66. Dispersión promedio diario de $\text{PM}_{2.5}$ (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 09-11-2019

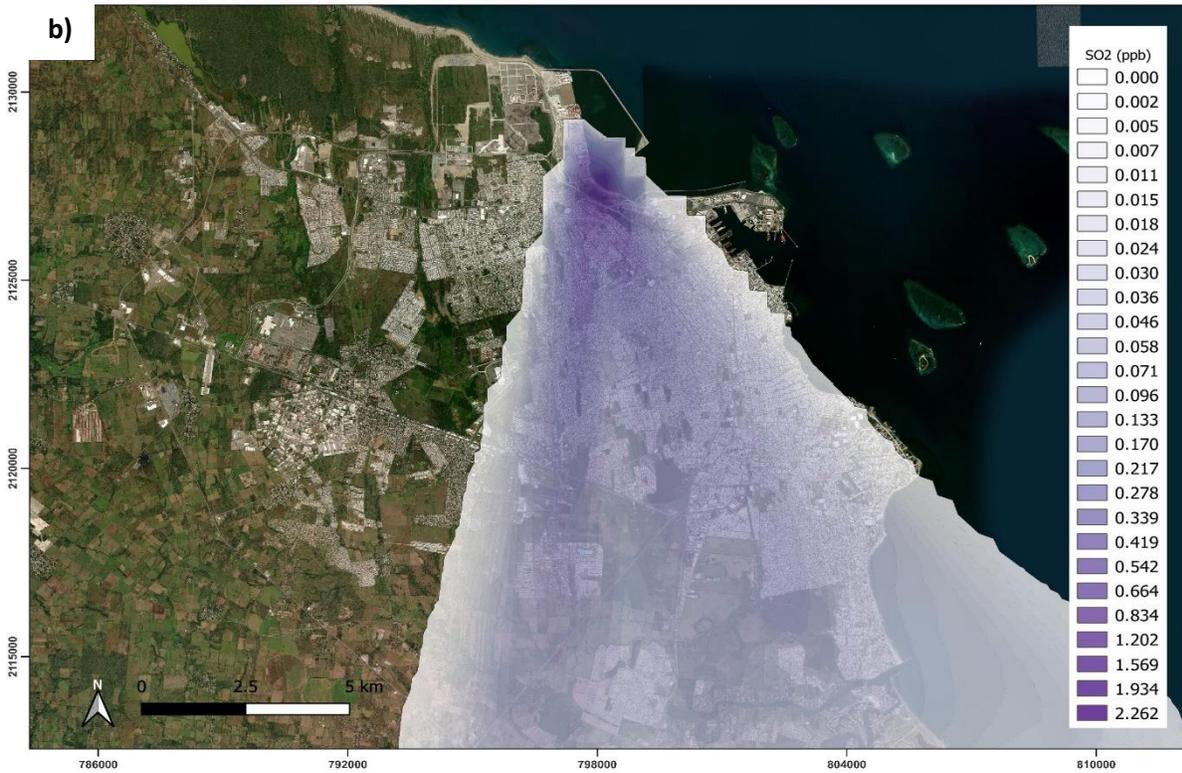
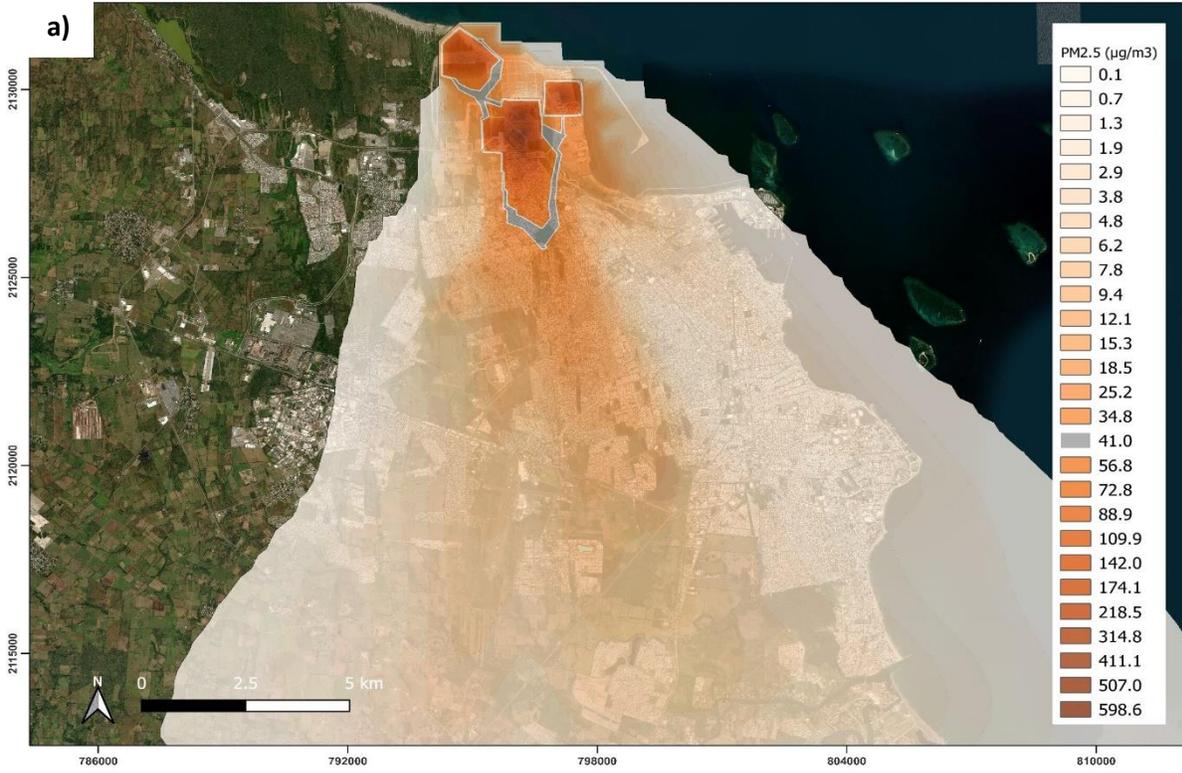


Figura 67. Dispersión promedio diario de $\text{PM}_{2.5}$ (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 22-12-2019

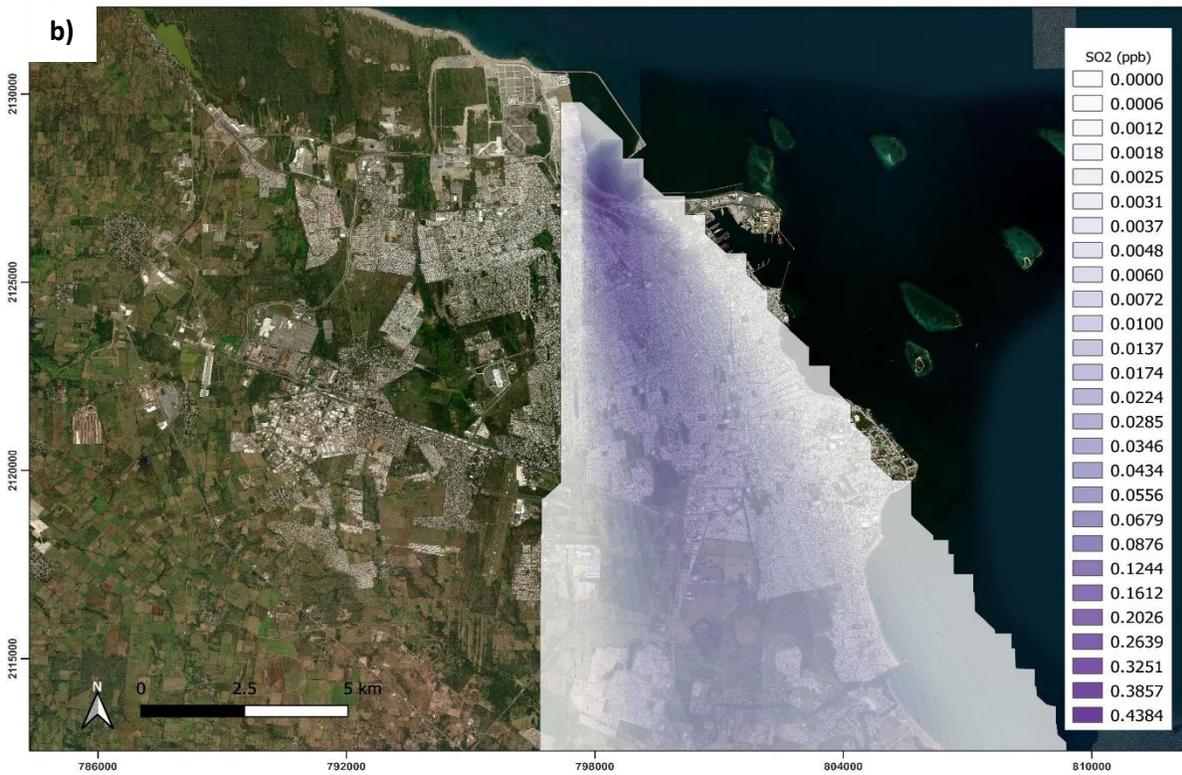
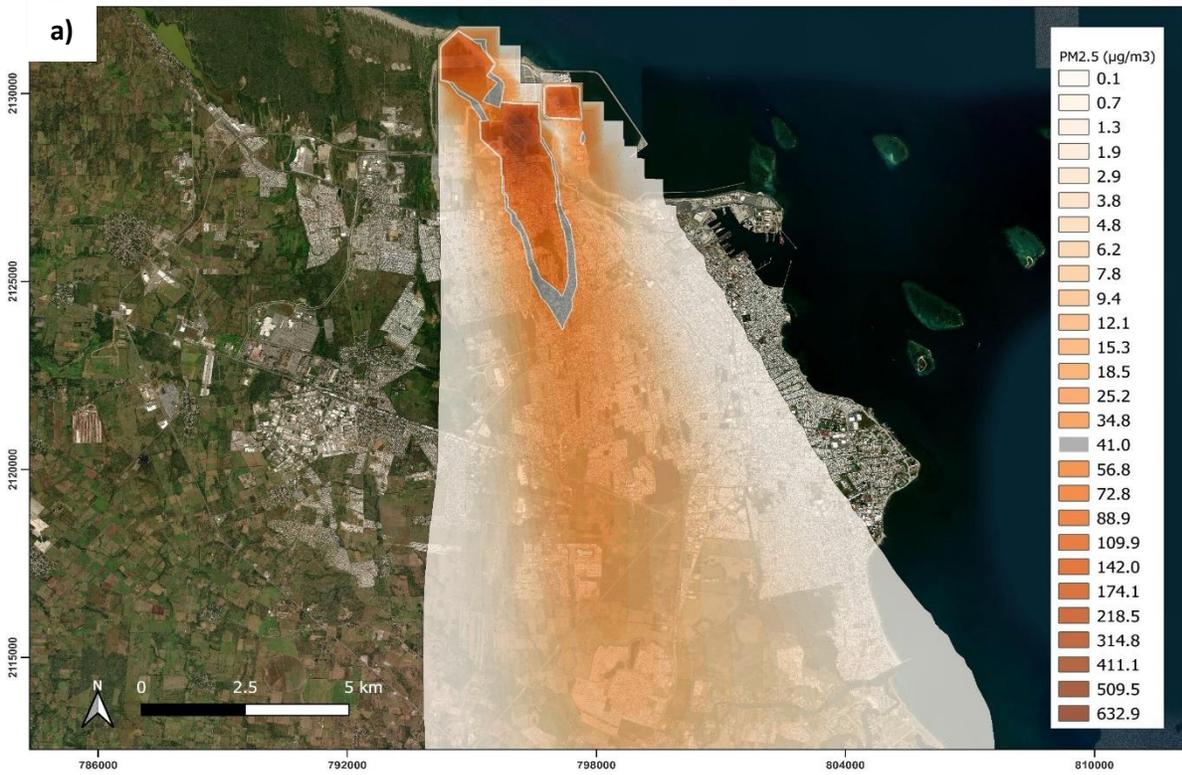


Figura 68. Dispersión promedio diario de PM_{2.5} (a) y SO₂ (b) caso de estudio de 20-01-2020

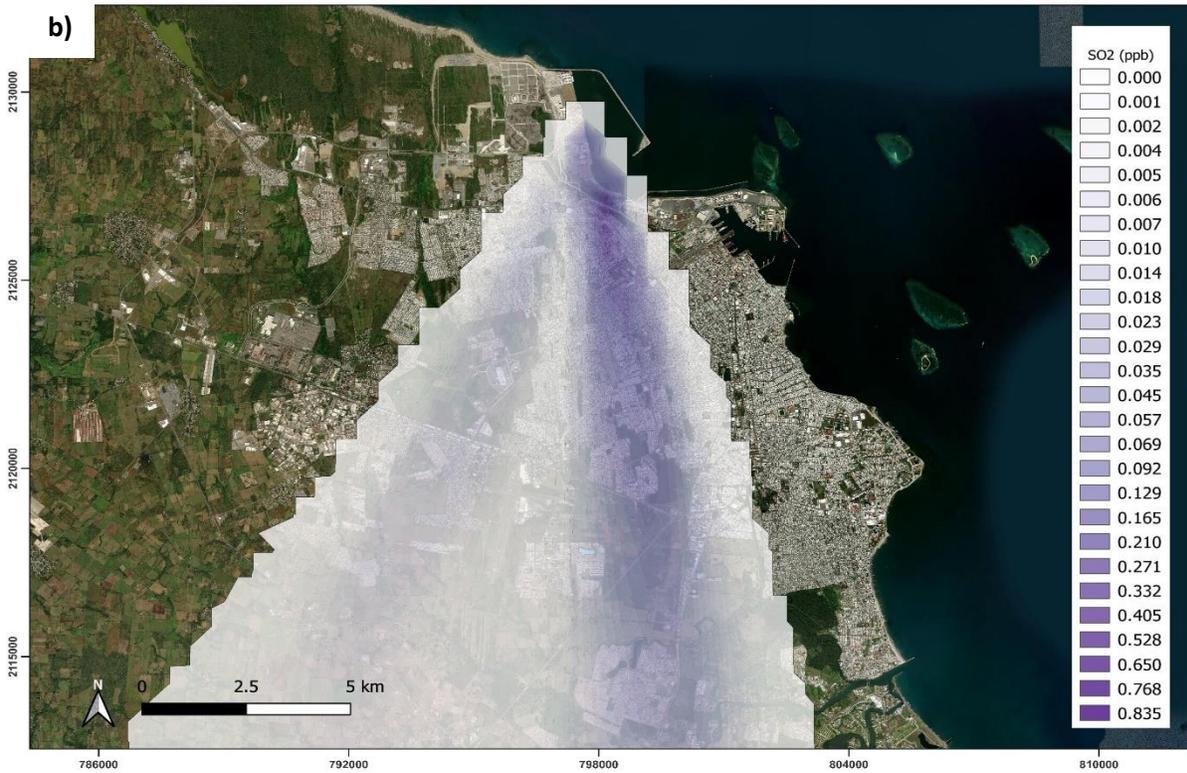


Figura 69. Dispersión promedio diario de PM_{2.5}(a) y SO₂ (b) caso de estudio de 30-10-2020

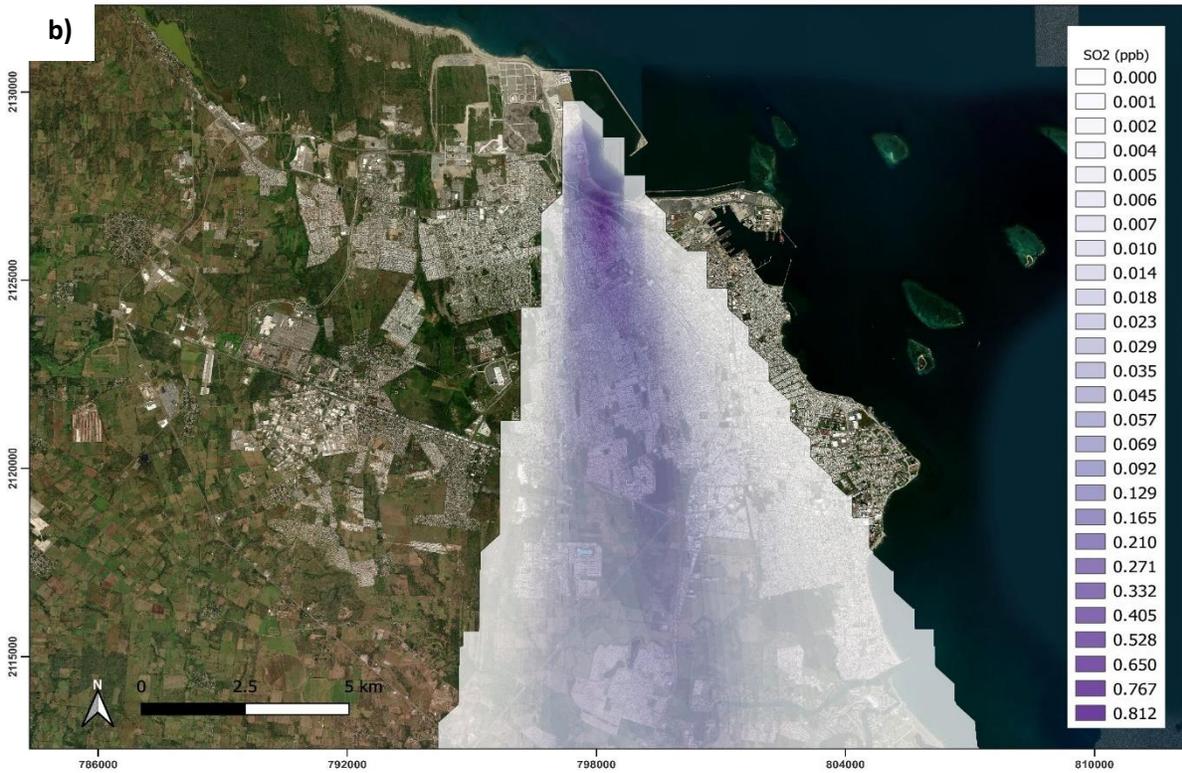


Figura 70. Dispersión promedio diario de $\text{PM}_{2.5}$ (a) y SO_2 (b) caso de estudio de 30-10-2020

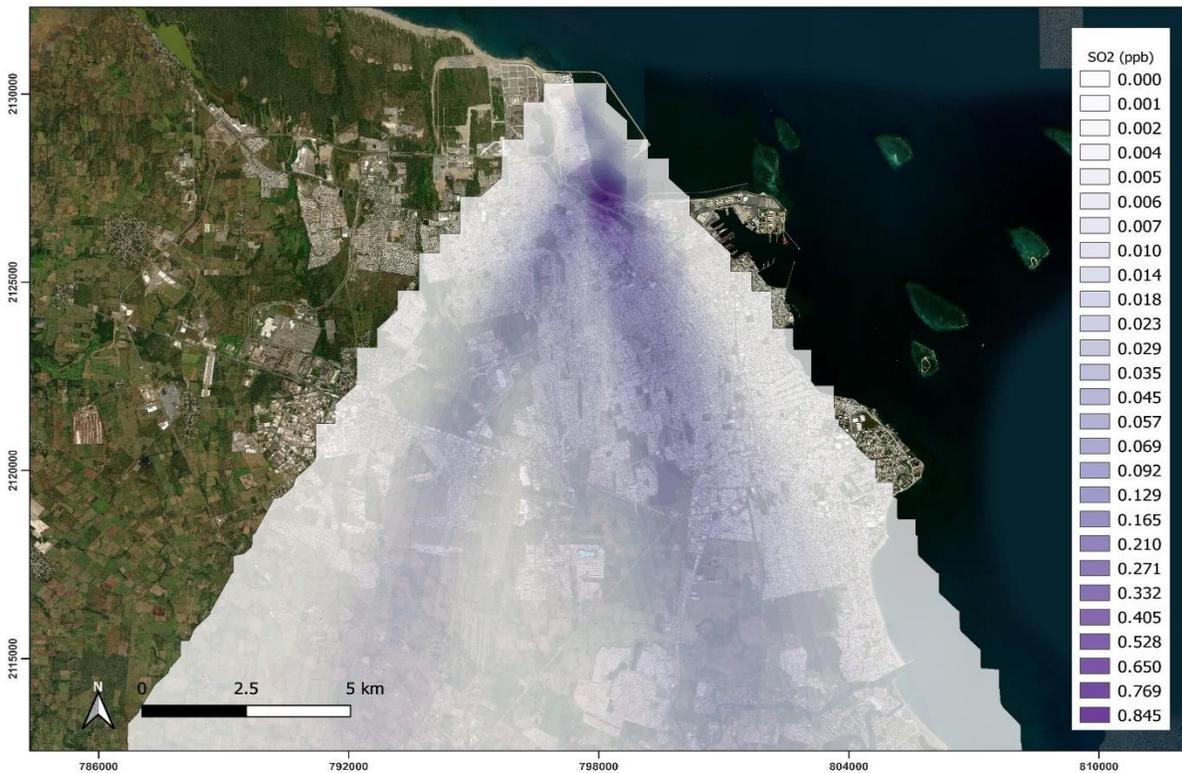
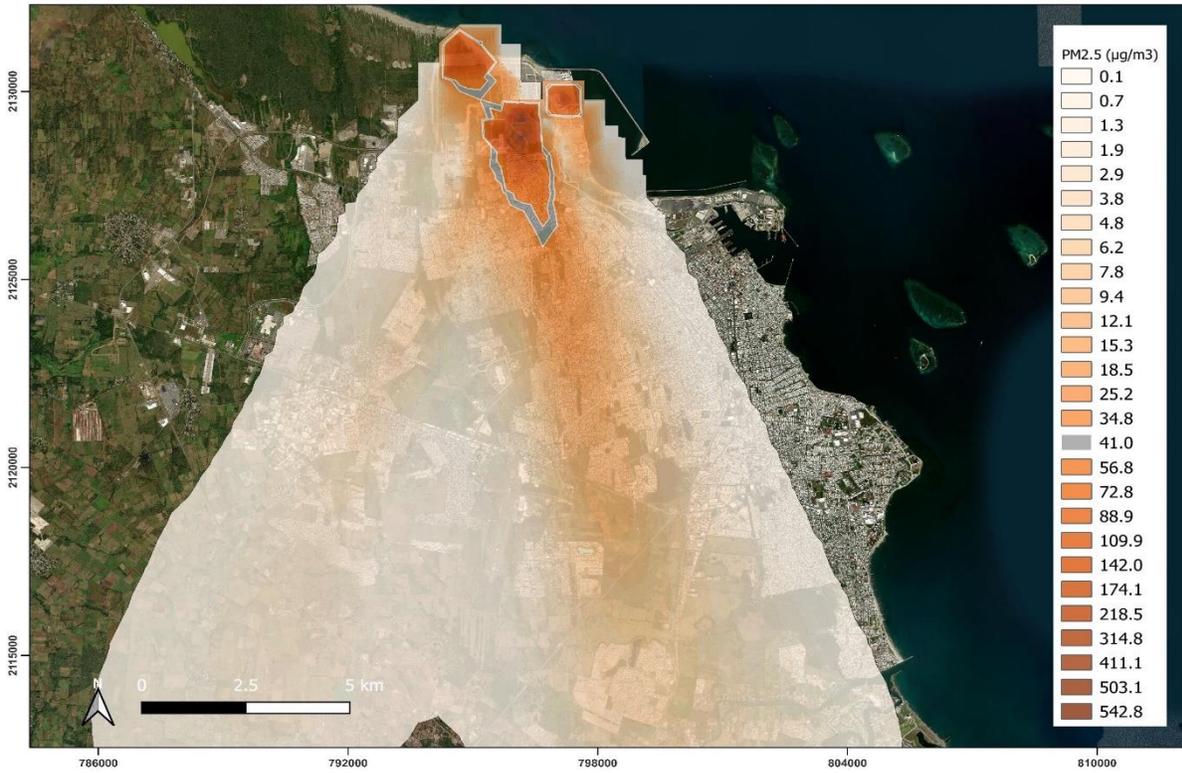


Figura 71. Dispersión promedio diario de PM2.5 (a) y SO2 (b) caso de estudio de 30-11-2020

ANEXO 3: LOCALIDADES DEL MUNICIPIO DE VERACRUZ Y BOCA DEL RIO*Tabla 48. Localidades del municipio de Veracruz y Boca del Río*

ID	Localidad	ID	Localidad
1	Veracruz	209	Colonia Bahía Libre
18*	San José Novillero	214	Paseo de las Palmas II
54*	El Estero	217	Fraccionamiento Geovillas los Pinos
55*	Boca del Río	218	Infonavit Orquídeas
58*	Fraccionamiento Rivera de la Condesa	219	Colonia Cardenista Antonio Luna
60	Las Amapolas	221	Condado del Valle Dorado
62*	Residencial el Dorado	222	Fraccionamiento Costa Dorada
64	Cabo Verde	223	Fraccionamiento el Campanario
65	Campestre las Bajadas	226	Sentimientos de la Nación
66	Los Caños de Santa Rita	227	Unidad Antorchista
70	Delfino Victoria	228	Colinas de Santa Fe
72	Dos Lomas	229	Arboledas
75	Malibrán de las Brujas	230	Lomas de Río Medio Cuatro
76	Mata Cocuite	231	Los Torrentes
77	Mata de Pita	232	Oasis
83	San Julián	234	Bonaterra
84	Santa Elena	235	Colina de las Flores
85	Santa Rita	236	Colina de los Pájaros
87	Valente Díaz	238	Colonia Libertad
90	Villarín	239	Hacienda Paraíso
117	El Pando	240	Hacienda Sotavento
120	Bajos del Jobo	241	Nuevo Veracruz
150	Colonia el Renacimiento	242	Residencial del Bosque
151	Colonia Chalchihuecan	243	Valle Alto
157	Río Medio	244	Residencial del Bosque Segunda Sección
181	Las Amapolas Dos	245	Fraccionamiento Paseo de las Palmas
182	Colonia del Proletariado	246	Colina de Mata Cocuite
198	Colonia Patria	247	Colonia la Rivera
205	Colonia Malibrán	248	Colonia la Condesa
207	Fraccionamiento Condado de Valle	251	Los Torrentes Aeropuerto

* Localidades del municipio de Boca del Río

Referencia: (INEGI, 2021)