



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

**ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN, MINIMIZACIÓN Y CONTROL DE LAS EMISIONES A LA
ATMÓSFERA POR LA OPERACIÓN Y AMPLIACIÓN DEL RECINTO PORTUARIO DE
VERACRUZ**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

I.N. ANDREA MARIANA DÍAZ VÁZQUEZ

TUTOR PRINCIPAL

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA, INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA Y CAMBIO
CLIMÁTICO, UNAM

COMITÉ TUTORAL

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DR. GILBERTO FUENTES GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, AGOSTO, 2023



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. Mathias Glaus
2^{do.} Vocal: Dr. Gilberto Fuentes García
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

Administración del Sistema Portuario Nacional (ASIPONA Veracruz)

École de Technologie Supérieure (ETS-Montreal, Canadá)

TUTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

Firma

Dedicatorias

“La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo”

(Nelson Mandela)

A mi esposo, por su apoyo incondicional, comprensión en todo momento, asesoría con mi tesis, por su tiempo y su amor.

A mis padres y mis hermanas, por su apoyo y sus consejos.

Ellos son los que me impulsan a seguir creciendo personal y profesionalmente. Sin sus porras, sus palabras de aliento, su cariño, abrazos y consejos no hubiera podido dar este paso en mi vida

Gracias a mis amigos de la maestría, Amelia, Mario, Samanta, Mitzi, Gaby, Nadia, Rafa, Lourdes, todos han sido parte importante, por los buenos momentos, las risas, por siempre traer alegría, anécdotas y compartir momentos agradables.

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera muy especial a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de estudiar mi posgrado y haberme dado el apoyo para realizar mi estancia en el extranjero.

Asimismo, deseo expresar mi agradecimiento al CONACYT, por otorgarme la beca, para poder realizar mis estudios de posgrado y continuar con mi preparación profesional.

También, quiero agradecerle a mi tutor principal, al Dr. Rodolfo Sosa y al resto del comité tutorial al Dr. Enrique César Valdez, Dr. Gilberto Fuentes, así como a todos los profesores con los que tome clases, por la dedicación, el tiempo que me brindaron, por el conocimiento compartido, por siempre estar al pendiente de mis correos y atender todas mis dudas.

Igualmente, quiero agradecer a la Administración Portuaria Integral de Veracruz, al Arq. Francisco Liaño Carrera, al Arq. Jorge Baños Illana, 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”.

De igual forma, extendiendo mi más sincero agradecimiento a los miembros de la Dirección General de Construcciones Navales y de la Capitanía de Puerto perteneciente a la Secretaría de Marina (SEMAR), por su gran apoyo facilitándome información técnica y orientándome en todas mis dudas, todo esto fue clave para la realización de este trabajo.

También extendiendo mi agradecimiento 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 la verificación de la operación de la estación de monitoreo, así como, de la verificación de la información de calidad del aire.

Agradezco al Dr. Mathias Glaus, por haberme permitido realizar mi estancia de investigación bajo su tutela en la École de Technologie Supérieure en Montreal, Canadá, por su orientación, resolver siempre mis dudas, por sus enseñanzas y su apoyo, es una experiencia que marcó mi vida personal y profesional.

Quiero darle las gracias, también al I.E. José Issac Ramírez M., por la organización y apoyo durante la visita al Recinto Portuario de Veracruz.

Igualmente extendiendo mi agradecimiento a la M.I. Ana Alarcón Jiménez, al Dr. Elías Granados Hernández, al M.I. Rafael Esteban Antonio Durán, a la M.I. Daimy Ávila Rodríguez, al Biol. Pablo Sánchez Álvarez, por su valioso apoyo, asesorías y consejos durante la realización de este trabajo.

Índice

Dedicatorias.....	3
Agradecimientos	4
Índice de tablas.....	8
Índice de figuras.....	9
Abreviaturas, siglas y acrónimos	11
Resumen.....	14
Abstract.....	15
Introducción.....	16
I. Antecedentes	18
II. Justificación	27
III. Hipótesis	28
IV. Objetivos.....	29
Objetivo General.....	29
Objetivos Específicos	29
V. Alcances y Limitaciones.....	30
5.1 Alcances.....	30
5.2 Limitaciones.....	30
VI. Marco Teórico.....	31
6.1 Contaminación atmosférica en puertos	31
6.1.1 Anexo VI MARPOL	34
6.2 Puerto verde.....	35
6.3 Buques mercantes.....	39
6.3.1 Descripción de un tren propulsor.....	43
6.3.2 Estrategias ambientales para la minimización y control de la contaminación en puerto.....	45
6.4 Metodologías para estimar emisiones en puerto.....	48
6.4.1 Estimación de emisiones de buques mercantes	49
6.4.1.1 Estimación de las concentraciones de los buques mercantes	51
6.4.2 Cálculo de emisiones de equipos de manejo de carga.....	52
6.5 Método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	54
VII. Área de estudio	56
VIII. Metodología	61

8.1 Caracterización de la zona de estudio	61
8.2 Caracterización de otros puertos del mundo.....	62
8.3 Cálculo de las tasas de emisión con diferentes contenidos de azufre	63
8.4 Ejecución del análisis multicriterio (AHP).....	63
8.5 Selección de los escenarios específicos y la evaluación de la información meteorológica	64
8.6 Determinación de las emisiones y concentraciones de SO ₂ y NO ₂ con el uso de sistemas de control.....	64
IX. Resultados y discusión	66
9.1 Evaluación de la zona de estudio.....	66
9.1.1 Identificación de los periodos de mayor actividad por arribo de buques	66
9.1.2 Selección de los buques más representativos de la zona de estudio	67
9.2 Recopilación de información de otros puertos del mundo.....	69
9.3 Estimación de las emisiones con el uso de estrategias ambientales	71
9.3.1 Ubicación de las fuentes fijas	71
9.3.2 Cálculo de las tasas de emisión	72
9.4 Aplicación del modelo analítico jerárquico AHP	75
9.5 Selección de los escenarios específicos	77
9.6 Cuantificación de las emisiones y concentraciones de los escenarios elegidos.....	80
9.7 Estrategias Ambientales aplicables a la zona de estudio.....	86
X. Conclusiones	88
XI. Recomendaciones.....	89
XII. Referencias bibliográficas	90
XIII. Anexos	93
A. Resultados de las emisiones por año con sus diferentes porcentajes de azufre.....	93
B. Rosas de vientos de los escenarios específicos.....	97
C. Resultados de las concentraciones de los escenarios específicos.....	109
D. Secuencia de pasos para ejecutar el modelo de Screen View.....	117
D. Evidencia fotográfica de la visita a campo.....	123

Índice de tablas

Tabla 1. Contaminantes generados por actividades portuarias	32
Tabla 2. Estándares de emisión de NOx.....	35
Tabla 3. Áreas consideradas para la certificación de Puerto Verde	38
Tabla 4. Clasificación de los buques mercantes.....	39
Tabla 5. Clasificación de motores diésel según su velocidad (rpm).....	45
Tabla 6. Tipo de motor principal según tipo de buque	45
Tabla 7. Sistemas de control de emisiones	47
Tabla 8. Datos para la obtención de las potencias de los motores	51
Tabla 9. Escala de Saaty	55
Tabla 10. Estudios realizados por la sección de contaminación ambiental.....	60
Tabla 11. Caracterización de los puertos verdes seleccionados	70
Tabla 12. Emisiones totales del periodo de estudio	73
Tabla 13. Emisiones totales por etapa de navegación	74
Tabla 14. Cálculo de las emisiones con equipos de control	75
Tabla 15. Caso de estudio.....	76
Tabla 16. Resultados del método AHP	77
Tabla 17. Escenarios específicos seleccionados	79
Tabla 18. Datos específicos para el cálculo de las emisiones de las grúas RTG	80
Tabla 19. Resultados de las emisiones de SO ₂ en g/día generadas por las grúas RTG...	81
Tabla 20. Resultados de las emisiones de NOx en g/día generadas por las grúas RTG ..	82
Tabla 21. Resultados de las emisiones de los buques y de las grúas RTG	83
Tabla 22. Estrategias ambientales	86
Tabla 23. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre	93
Tabla 24. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre	93
Tabla 25. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre	93
Tabla 26. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre.....	93
Tabla 27. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre	94
Tabla 28. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre	94
Tabla 29. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre	94
Tabla 30. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre	94
Tabla 31. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre	94
Tabla 32. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre.....	95
Tabla 33. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre	95
Tabla 34. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre	95
Tabla 35. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre	95
Tabla 36. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre	95
Tabla 37. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre	96
Tabla 38. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre	96

Índice de figuras

Figura 1. Buque portacontenedores	40
Figura 2. Buque granelero, atracado en el muelle 5 del puerto de Veracruz	40
Figura 3. Buque petrolero.....	41
Figura 4. Buque de carga general, atracado en el muelle 4 del puerto de Veracruz	41
Figura 5. Buque Roll on/ Roll off, atracado en el muelle 1 del puerto de Veracruz	42
Figura 6. Buque quimiquero.....	42
Figura 7. Buque gasero	42
Figura 8. Barco remolcador de PEMEX, atracado en el puerto de Veracruz	43
Figura 9. Arreglo de un tren propulsor	44
Figura 10. Tren de toma de decisiones.....	49
Figura 11. Árbol de jerarquías	56
Figura 12. Ampliación Bahía Norte.....	58
Figura 13. Diagrama general de la metodología empleada.....	61
Figura 14. Total, de arribos en el puerto de Veracruz	66
Figura 15. Horas totales en puertos	67
Figura 16. Total, de arribos por tipo de embarcación en la zona de estudio	68
Figura 17. Total, de horas de estadía por tipo de embarcación en la zona de estudio.....	68
Figura 18. Porcentaje total de horas de estadía.....	69
Figura 19. Total de horas invertidas por muelle del buque portacontenedores	71
Figura 20. Total de horas invertidas por muelle del buque granelero agrícola.....	72
Figura 21. Emisiones por contaminante	74
Figura 22. Árbol de jerarquías método AHP	76
Figura 23. Rosa de vientos 11 de mayo de 2018.....	78
Figura 24. Rosa de vientos 11 de octubre de 2019	78
Figura 25. Concentraciones totales de SO ₂ en ppm con uso de estrategias ambientales	84
Figura 26. Concentraciones totales de NO _x en ppm con uso de estrategias ambientales	85
Figura 27. Rosa de vientos 12 de mayo de 2018.....	97
Figura 28. Rosa de vientos 24 de mayo de 2018.....	97
Figura 29. Rosa de vientos 21 de octubre de 2018	98
Figura 30. Rosa de vientos 22 de octubre de 2018	98
Figura 31. Rosa de vientos 23 de octubre de 2018	99
Figura 32. Rosa de vientos 01 de diciembre de 2018	99
Figura 33. Rosa de vientos 16 de diciembre de 2018	100
Figura 34. Rosa de vientos 17 de diciembre de 2018	100
Figura 35. Rosa de vientos 01 de mayo de 2019.....	101
Figura 36. Rosa de vientos 15 de mayo de 2019.....	101
Figura 37. Rosa de vientos 28 de mayo de 2019.....	102
Figura 38. Rosa de vientos 10 de octubre de 2019	102
Figura 39. Rosa de vientos 12 de octubre de 2019	103
Figura 40. Rosa de vientos 06 de diciembre de 2019	103
Figura 41. Rosa de vientos 20 de diciembre de 2019	104
Figura 42. Rosa de vientos 21 de diciembre de 2019	104
Figura 43. Rosa de vientos 03 de mayo de 2020.....	105

Figura 44. Rosa de vientos 17 de mayo de 2020.....	105
Figura 45. Rosa de vientos 19 de mayo de 2020.....	106
Figura 46. Rosa de vientos 03 de octubre de 2020	106
Figura 47. Rosa de vientos 27 de octubre de 2020	107
Figura 48. Rosa de vientos 28 de octubre de 2020	107
Figura 49. Rosa de vientos 09 de diciembre de 2020	108
Figura 50. Rosa de vientos 22 de diciembre de 2020	108
Figura 51. Concentraciones totales del 21 de octubre del 2018.....	109
Figura 52. Concentraciones totales del 16 de diciembre del 2018.....	109
Figura 53. Concentraciones totales del 15 de mayo del 2019	110
Figura 54. Concentraciones totales del 11 de octubre del 2019.....	110
Figura 55. Concentraciones totales del 19 de diciembre del 2019.....	111
Figura 56. Concentraciones totales del 19 de mayo del 2020	111
Figura 57. Concentraciones totales del 28 de octubre del 2020.....	112
Figura 58. Concentraciones totales del 10 de diciembre del 2020.....	112
Figura 59. Concentraciones totales del 21 de octubre del 2018.....	113
Figura 60. Concentraciones totales del 16 de diciembre del 2018.....	113
Figura 61. Concentraciones totales del 15 de mayo del 2019	114
Figura 62. Concentraciones totales del 11 de octubre del 2019.....	114
Figura 63. Concentraciones totales del 19 de diciembre del 2019.....	115
Figura 64. Concentraciones totales del 19 de mayo del 2020	115
Figura 65. Concentraciones totales del 28 de octubre del 2020.....	116
Figura 66. Concentraciones totales del 10 de diciembre del 2020.....	116
Figura 67. Ejecución del Modelo Screen View	117
Figura 68. Abrir un nuevo proyecto en Screen View	117
Figura 69. Datos de entrada del modelo.....	118
Figura 70. Entrada de datos meteorológicos	119
Figura 71. Distancias automáticas.....	120
Figura 72. Comenzar a correr el modelo de Screen view	121
Figura 73. Opciones de visualización de resultados.....	121
Figura 74. Resultados del modelo con la opción de gráfica.....	122
Figura 75. Resultados del modelo con la opción de documento	122
Figura 76. Foto tomada en el muelle 4 N.....	123
Figura 77. Foto tomada en la cesionaria PETRA.....	123
Figura 78. Cesionaria Petra	123
Figura 79. Patio de distribución de granel	124
Figura 80. Patio de distribución de granel	124
Figura 81. Buque granelero mineral, atracado en el muelle 1	125
Figura 82. Almacenamiento de fluidos en la cesionaria Petra	125

Abreviaturas, siglas y acrónimos

AEMA: Agencia Europea de Medio Ambiente

AGV: Vehículos guiados automatizados

AHP: Proceso Analítico Jerárquico

APIVER: Administración Portuaria Integral de Veracruz

APSN Green Port: APEC Port Services Network

ASIPONA: Administración del Sistema Portuario Nacional

BFO: Combustible Residual Pesado

Calado: Medida vertical entre la quilla y la línea de flotación de un buque

CARB: California Air Resources Board

CFC: Clorofluorocarbonos

CHE: Equipos de Manipulación de Carga

CH₄: Metano

CI: Cold Ironing, es decir conexión a tierra

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

COVs: Compuestos Orgánicos Volátiles

E: Este

EEA: Agencia de Protección Ambiental de Europa

EMEP: Programa de Monitoreo y Evaluación de Europa

ENE: Estenordeste

E-RTG: Grúa eléctrica apiladora de contenedores sobre neumáticos

ESPO: Organización Europea de Puertos Marítimos

Eslora: Longitud de una embarcación desde la proa a la popa

FE: Factor de emisión

FFC: Factor de corrección de combustible

GM: Green Marine

GNL: Gas Natural Licuado

GPAS: Green Port Award System

GT: Arqueo Bruto
HC: Hidrocarburos
Hotelling: Tiempo de estadía en puerto
HSD: Motor diésel de alta velocidad
HV: Buques portuarios
ICAVE: Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz
IENOVA: Infraestructura Energética Nova, S.A.P.I de C.V.
IFO: Combustible Marino Intermedio
kW: Kilowatts
MARPOL: Marine Pollution
Manga: La mayor anchura de un buque viéndolo desde la vista transversal
MCR: Potencia Máxima Continua
MEPC: Comité de Contaminación del Medio Marino
MDO: Combustible Diésel Marino
MDS: Motor diésel de mediana velocidad
MGO: Combustóleo Gas Marino
Mg: Mega gramos
NE: Nordeste
NOx: óxidos de nitrógeno
N₂O: Óxido Nitroso
NW: Noroeste
O₃: Ozono
OGV: Buques de navegación oceánica
OMI: Organización Marítima Internacional
PPM: Partes Por Millón
PPB: Partes por Billón
PM₁₀: Partículas iguales o menores a 10 micrómetros
PM_{2.5}: Partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros
PST: Partículas Suspendidas Totales
Puntal: Medida vertical medido desde la cara inferior del casco del buque

RTG: Grúa apiladora de contenedores sobre neumáticos
ROLL ON-ROLL OFF: Buque que transporta carga rodada
RPM: Revoluciones por minuto
SCR: Sistema de reducción catalítica selectiva
Scrubber: Lavador de gases
SEMAR: Secretaría de Marina Armada de México
SO₂: dióxido de azufre
SSD: Motor diésel de baja velocidad
SPN: Sistema Portuario Nacional
SSW: Sursudoeste
SW: Sudoeste
TEU: Twenty-foot Equivalent Unit
ULSD: Diésel ultra bajo en contenido de azufre
UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México
USEPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
W: Oeste
WSW: Oeste-Sudoeste
WNW: Oeste-Noroeste

Resumen

El transporte por barcos es la vía de exportación e importación de mercancías más utilizado actualmente. Arriban a los puertos en donde se realizan distintas actividades que usan motores de combustión interna, que afectan directamente la calidad del aire del lugar, zonas aledañas, la salud de los trabajadores y el ambiente. En este proyecto de investigación se establecieron las estrategias aplicables de prevención, minimización y control de las emisiones atmosféricas debido al movimiento de buques y el funcionamiento de grúas para el puerto de Veracruz y su ampliación. Después del análisis de la información actual del movimiento de buques de 2018 a 2022, se seleccionaron el tipo granelero y portacontenedor por su estadía en muelle, dimensiones, potencia del motor, tipo y consumo de combustible. Los contaminantes evaluados fueron NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO y CO₂; sin embargo, para el establecimiento de las estrategias ambientales aplicables se consideró la emisión atmosférica de NO_x y SO₂ con diferentes contenidos de azufre en el combustible (3.5%, 2.5%, 0.5% y 0.1%); así como, el método AHP. Se revisaron los FE de la USEPA y de la EEA, aplicables del movimiento de buques y funcionamiento de las grúas para llevar a cabo la estimación de emisiones atmosféricas. El método para la estimación de emisiones en la maniobra y estadía de los buques correspondió a bottom-up, y para la estimación de emisiones proveniente de las grúas fue el de CARB. Los meses representativos en donde ocurrieron las mayores emisiones atmosféricas debido a los dos tipos de buque fueron en mayo (713 Mg de NO_x y 600 Mg de SO₂), octubre (820 Mg de NO_x y 694 Mg de SO₂) y diciembre (504 Mg de NO_x y 392 de SO₂) para el periodo de estudio considerando un contenido de azufre del 3.5%. Las grúas tuvieron una emisión atmosférica de 1 Mg de NO_x y 12 kg de SO₂ para los días seleccionados de mayo, octubre y diciembre de 2019 a 2020. El método AHP sugirió con una priorización del 37% que es necesario el uso de un sistema de control SCR con el 3.5% de contenido de azufre debido a que considera costos de equipo de \$225,000, y un costo de combustible de \$436 por Mg. Las emisiones atmosféricas asociadas a este sistema de control son 72 Mg/mes para SO₂ y 11 Mg/mes para NO_x. Para identificar el nivel de reducción en la concentración por SO₂ y NO_x debido a sus emisiones atmosféricas se utilizó el modelo Screen View seleccionando los días en donde ocurrió mayor tráfico marítimo, velocidades de viento menores a 2 m/s, y sin condiciones de marea de pleamar y bajamar. Se encontró que la concentración de SO₂ es reducida al 200% (0.15 ppb) cuando se considera un sistema de control combinado, a diferencia de 37 ppb cuando se considera un sistema de control SCR. En el caso de la concentración de NO_x se reduce al 160% (0.84 ppb) cuando se considera un sistema de control SCR.

Abstract

Shipping is worldwide known as one of the most common means of transport to export and import goods. These ships arrive at the port areas where the different activities that are carried out imply the use of internal combustion engines which operate with different type of fuels. The use of these fuels directly affects the air quality of the place, the health of workers and inhabitants and the environment. This research project established the applicable strategies of prevention, minimization, and control of atmospheric emissions due to the movement of ships and the operation of cranes at the port of Veracruz and its expansion. After analyzing the current information from movements of ships from 2018 to 2022, the bulk carrier and container type were selected for its stay in dock, dimensions, engine power, type, and fuel consumption. The pollutants evaluated were NO_x, SO₂, particulate matter, CO, and CO₂; however, for the establishment of the applicable environmental strategies, the atmospheric emission of NO_x and SO₂ with different sulfur content in the fuel (3.5%, 2.5%, 0.5% and 0.1%) was considered; as well as the analytical hierarchic process (AHP). The emission factors of the USEPA and EMEP/EEA applicable to the movement of ships and operation of cranes to carry out the estimation of atmospheric emissions were reviewed. The method for estimating emissions in the maneuver and berthing of the ships corresponded to bottom-up, and for estimating emissions from the cranes was CARB. The representative months when the highest atmospheric emissions occurred due to the two types of vessels were in May (713 Mg of NO_x and 600 Mg of SO₂), October (820 Mg of NO_x and 694 Mg of SO₂) and December (504 Mg of NO_x and 392 of SO₂) for the study period considering a sulfur content of 3.5%. The cranes had an atmospheric emission of 1 Mg of NO_x and 12 kg of SO₂ for the selected days from May, October, and December 2019 to 2020. The AHP suggested with a 37% prioritization that the use of a SCR control system with 3.5% sulfur content is necessary because it considers equipment costs of \$225,000, and a fuel cost of \$436 per Mg. Air emissions associated with this control system are 72 Mg/month for SO₂ and 11 Mg/month for NO_x. To identify the level of reduction in the concentration by SO₂ and NO_x due to its atmospheric emissions, the Screen View model was used, selecting the days in which the greatest maritime traffic occurred, wind speeds less than 2 m/s, and without conditions of high tide and low tide. The SO₂ concentration was found to be reduced to 200% (0.15 ppb) when considering a combined Scrubber and SCR control system, as opposed to 37 ppb when considering a SCR control system. Finally, the concentration of NO_x it is reduced to 160% (0.84 ppb) when considered a SCR control system.

Introducción

El transporte marítimo es considerado como un eslabón importante del comercio globalizado y la cadena de suministro del sector manufacturero, debido a que más de cuatro quintas partes del comercio mundial de mercancías por volumen se mueven por mar (UNCTAD, 2019). Además de ser una forma eficaz y rentable de transportar mercancías alrededor del mundo, a diferencia de otros modos de transporte, posee características específicas e intrínsecas que le otorgan ventajas significativas con respecto a los demás; es decir, un solo barco puede trasladar el volumen de carga que requeriría de miles de tractocamiones o de furgones de ferrocarril, reduciendo los costos logísticos, así como, la versatilidad en el manejo de cargas (SCT, 2015).

En la última década la importación y exportación del comercio mundial por vía marítima ha crecido a tasas del 3.7% y 3.5% en promedio anual (OCEANA, 2019). En el año 2019 se transportaron 11 mil millones de toneladas por buques mercantes: 38% relacionada con energéticos, 25% con metales, 16% contenerizada, 11% de productos agrícolas y 10% otras cargas (Chambers, 2020). La industria naval sólo puede funcionar de manera eficaz si sus normas y reglamentos se adoptan y aplican a nivel internacional, siendo la OMI la autoridad mundial de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por las embarcaciones (OMI, 2019). En el año 1973, la OMI creó el convenio MARPOL, el cual cuenta con VI anexos y el objetivo de estos es prevenir la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales.

Desde el año 1992, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la adhesión de México como parte del convenio MARPOL a través de los anexos I. Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos, II. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel y V. Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques. A partir del 17 de julio del 2022, México sumo la adhesión de los III. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos, IV. Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques, solo restaría que firme el anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (SRE, 2022).

México se enlaza, por vía marítima de manera regular, con 58 países y más de 213 destinos de los cinco continentes (SCT, 2019). Durante el periodo 2004-2011, la importación de mercancías por vía marítima en México tuvo un crecimiento promedio anual del 16.5%, en

tanto que las exportaciones fueron de 15.7% (SCT, 2014). Las líneas navieras más importantes del mundo arriban a puertos mexicanos. De las 73 navieras regulares que llegan a México, el recinto portuario de Veracruz predomina con un registro de 16 líneas posicionándose como líder en México de importación y exportación principalmente en vehículos y carga a granel, el tráfico marítimo anual llega a ser de 1,996 embarcaciones, lo cual ocasiona un mayor movimiento de buques mercantes a este puerto (APIVER, 2019).

El enorme tráfico marítimo puede ocasionar problemas ambientales impactando a la vida humana como perturbando a los ecosistemas producidos por el derrame de sustancias y por sus elevados niveles de emisión atmosférica de contaminantes. Los buques utilizan diversos combustibles marinos, como el combustóleo, generando emisión de contaminantes a la atmósfera, afectando la calidad del aire y especialmente en la zona portuaria. El recinto portuario de Veracruz es un puerto de altura y el más importante por su variedad de cargas que maneja, hasta el año 2018 tenía 22 posiciones de atraque, registrando el arribo de embarcaciones mercantes que llevan carga de diferentes tipos como: general suelta o unitarizada, vehículos, contenedores, fluidos, granel mineral y agrícola. No obstante, una vez concluida la ampliación del recinto portuario, se tendrá un total de 57 posiciones de atraque, lo que ocasionará un incremento de casi el triple del tráfico marítimo (SCT, 2019).

El movimiento actual de buques, los trabajos de ampliación del puerto y el aumento de arribos y zarpes de embarcaciones podría ocasionar aumento en las emisiones de contaminantes atmosféricos, siendo necesario la aplicación de estrategias de prevención, minimización y control para la contaminación atmosférica. Es por esto, que en este proyecto se realizó la caracterización de la zona de estudio, detectando los periodos de mayor actividad portuaria, seleccionando las fuentes potenciales más representativas, calculando sus emisiones de acuerdo con la implementación del método bottom up para las embarcaciones con la metodología del manual de *EMEP/EEA 2021* y para los equipos de manipulación de carga con el documento de la *CARB*, aplicando diferentes estrategias ambientales utilizadas en los diferentes puertos verdes seleccionados en el estudio, con el objetivo de encontrar resultados favorables con el uso de distintas estrategias ambientales de diferentes puertos en el mundo.

I. Antecedentes

Joseph et al., (2009), realizaron un estudio sobre la contaminación atmosférica ocasionada por las operaciones del puerto de Mumbai, India y de los procesos realizados durante la etapa de ampliación. Comenzaron por identificar las fuentes de emisión atmosférica y estimaron su nivel de emisión para la elaboración de un inventario de emisiones que los ayudó a establecer y planificar estrategias de mitigación que mejoraran la calidad del aire. Los contaminantes evaluados fueron PST, PM₁₀, SO₂ y NO_x. El sector de mayor actividad portuaria considerado en este estudio fue el transporte por carretera, construcción y movimiento de embarcaciones. La metodología que utilizaron para el cálculo de las fuentes móviles y de la actividad de construcción (emisiones fugitivas de polvo), fue la propuesta por la US EPA en su documento AP-42, por otro lado, para el cálculo de las emisiones de las embarcaciones utilizaron la metodología de la AEMA. Los resultados que obtuvieron muestran que la mayor contribución de las emisiones en el recinto portuario fue de PST (68.5%) y la menor de SO₂ (5.3%). El sector que más aportó emisiones de PST y PM₁₀ fue el transporte por carretera, seguido de la etapa de ampliación (fase construcción), las emisiones de SO₂ más altas fueron de los buques (84.3%), seguido del tráfico rodado y en cuanto a los NO_x indicaron que la máxima contribución fue del tráfico rodado (54%) y las embarcaciones (46%). Concluyeron que un inventario de emisiones es necesario para que las autoridades portuarias visualicen y cuantifiquen los impactos en la calidad del aire y evalúen los impactos de los proyectos de ampliación, y que proporcionan las bases para crear e implementar estrategias de mitigación, como la reducción del contenido de azufre del combustible, los tiempos de estadía en puerto, barreras de contención para la etapa de ampliación, supresores de polvo en las operaciones de carga y descarga de mercancía, entre otros.

Han, (2010) llevó a cabo una revisión literaria de las medidas de mitigación de la contaminación aplicadas al sector portuario y transporte marítimo como las diferentes regulaciones aplicadas por el MEPC que es una sub-organización de la OMI, las opciones de control de emisiones para los buques mercantes y las estrategias ambientales de las compañías navieras. Evaluó las diferentes estadísticas que existen sobre las condiciones reales de la contaminación ambiental procedente de los buques en diferentes puertos del mundo y zonas portuarias. Posteriormente, enfatizó en la importancia y la emergencia ambiental con respecto al transporte marítimo. Encontró que la regulación más estricta aplicada por la OMI es el del Anexo VI del convenio MARPOL, el cual entró en vigor en

mayo del 2005. Esta norma es específicamente para prevenir la contaminación atmosférica e incluye una fracción para las emisiones de NOx según la potencia de salida de los motores diésel marinos y la instalación requerida de sistemas de limpieza de gases de escape, además los límites del contenido de azufre del combustible utilizado en los buques para reducir las emisiones de SOx, provisión de sistemas de recogida de vapor para reducir las emisiones de los COVs, requisito de incineradores a bordo y uso restringido de refrigerantes CFC.

Después clasificó las alternativas de control de emisiones de buques en tres categorías. En primer lugar, las mejoras tecnológicas como pueden ser sistemas de propulsión más eficientes, energías alternativas, combustibles con bajo contenido de azufre, suministro de energía en tierra, entre otros. En segundo lugar, los cambios operacionales, como tiempo de arribo y zarpe, reducción de tiempos en las etapas de carga y descarga de mercancías tanto de buques como de los vehículos portuarios y de los equipos de carga, etc. Por último, están las estrategias de mercado, que pueden ser programas de reducción de emisiones, incentivos, imposición de tasas variables destinadas a recompensar la disminución de emisiones, entre otros. El autor concluyó que los barcos generan cantidades sustanciales de emisiones de gases contaminantes impactando en la calidad del aire y la salud pública. Por esta razón las compañías navieras deben de considerar una política ambiental en sus actividades comerciales y el gobierno implementar medidas más estrictas, con el fin de lograr una reducción de la contaminación.

En Taiwán, Liu et al., (2014), realizaron la evaluación de la contaminación atmosférica de SO₂ ocasionada por el movimiento de arribo y zarpe de los buques del puerto de Kaohsiung, con datos desde el año 2006 al 2010, mediante la metodología bottom-up. Seleccionaron esa zona de estudio debido a que es el más grande de Taiwán, pues maneja el 57% del volumen de carga de importación y exportación y el 73% de la carga contenerizada. Los datos del movimiento de buques, tiempos de estadía, tipo de embarcación, entre otros, los obtuvieron de las autoridades del puerto. Las emisiones de SO₂ las estimaron con base en el contenido de azufre del combustóleo y utilizaron porcentajes de 0.5%, 0.95% y 1.5%, cubriendo los diferentes rangos establecidos por MARPOL. Los resultados que obtuvieron de acuerdo con los porcentajes de azufre fueron de 3,529 ton/año, 3,834 ton/año, y 3,899 ton/año. En donde el mayor porcentaje de emisión lo generaron los buques portacontenedores, seguido de las embarcaciones petroleras, carga general y graneleros, esto debido al tipo de motor y sus tiempos de estadía. Concluyeron que la sustitución de

los combustibles con bajo contenido de azufre da resultados positivos para reducir la contaminación de los barcos, además de mencionar que otra de las alternativas que se evalúan en dicho puerto es la utilización de un suministro de energía debido a que la gran mayoría de las embarcaciones que reciben, tienen periodos de estadía largos y se mantienen operando con los motores auxiliares a bordo. Así mismo, proponen la instalación de equipos y dispositivos que ayuden a reducir las emisiones en puerto. Por último, mencionan que se deben de establecer normas estrictas y capacitar a los inspectores ambientales para su debido cumplimiento.

Seddiek & Elgohary, (2014), efectuaron una revisión literaria, sobre las distintas estrategias ambientales, que utilizan en diferentes puertos, para minimizar la contaminación atmosférica ocasionada por los gases de escape de los buques mercantes, enfocándose en NOx y SOx. Los autores clasificaron los métodos de reducción de emisiones en tres diferentes categorías. Aplicación de tecnologías de reducción a bordo, que incluye, el sistema SCR, considerándose el método de reducción de NOx más eficiente debido a su durabilidad y cumplimiento en la mayoría de los buques comerciales. Disminuir el contenido de azufre en el combustóleo para reducir las emisiones de SOx, utilizando combustibles más limpios u otra propuesta es el uso de un lavador de gases de ciclo cerrado. Reducción de emisiones de buques basada en el uso de combustibles alternativos: hidrógeno y gas natural licuado. Reducción de emisiones basado en estrategias de ahorro de combustible: diseño de la embarcación, uso de energías renovables a bordo, mejorar el rendimiento energético y reducir la velocidad del barco. Posteriormente, seleccionaron un caso de estudio, utilizando un catamarán de alta velocidad para viajes cortos entre las costas de la zona del Mar Rojo y calcularon las emisiones haciendo uso de un sistema de reducción catalítica, de gas natural, un motor de combustible dual (diésel-metano) y un sistema de SRC con depurador de agua de mar. Encontraron que la mejor propuesta desde el punto ambiental es el uso de sistemas SCR con depuradores y el uso de gas natural.

Kotrikla et al., (2017) hicieron una investigación en el puerto de Mitilene, en la isla de Lesbos, la cual, es la tercera isla más grande del archipiélago griego, además, su economía depende en gran medida de los barcos para el transporte de pasajeros y mercancías, contando con salidas diarias hacia Quíos, Pireo y el norte de Grecia. Los buques que arriban a este puerto son principalmente de pasajeros Ro-Ro, seguido de los petroleros, cruceros y carga general. Los objetivos del trabajo fueron estimar las emisiones de PM₁₀ y CO₂ de los barcos que atracan en dicho puerto. En su fase de estadía y maniobra

seleccionaron un periodo de tiempo con alta afluencia, donde estimaron las emisiones para un periodo entre el 10 y 20 de agosto del 2012, debido a que es la temporada alta de vacaciones, y utilizaron el método de bottom-up, aplicando los factores de emisión de la EMEP/EEA.

Posteriormente, realizaron simulaciones de la potencia fotovoltaica y eólica requerida para cubrir las necesidades de los motores auxiliares en puerto, con uso de mapas de radiación solar media anual y la velocidad media del viento. Para calcular el efecto de las fuentes de energía renovable, utilizaron el software de simulación “Home Energy”, el cual simula el funcionamiento de una red eléctrica donde diferentes tipos de equipos se conectan. Encontraron que la contaminación del aire del puerto proviene principalmente de los barcos de pasajeros debido a la frecuencia de los itinerarios, emitiendo un total de 391 kg de PM₁₀ (89% de las emisiones totales) y 254 toneladas métricas de CO₂ (90%), mientras que el resto de las embarcaciones 50 kg de PM₁₀ y 28 toneladas métricas de CO₂, por todo el periodo de estudio. Detectaron que las emisiones más representativas se dan en el periodo de estadía, debido a sus largos tiempos, superando las 5 horas, mientras que en maniobra no tardan más de 20 minutos. Concluyeron que la electricidad en tierra es un método eficaz para reducir la contaminación del aire y del ruido de los motores auxiliares, sin embargo, el porcentaje de reducción exacta variará según el funcionamiento de la red local. Otra solución fiable es combinar los equipos de conexión a tierra con energías renovables.

López-Aparicio et al., (2017) realizaron un inventario de emisiones del puerto de Oslo, ubicado en el mar del Norte, es el más grande y con mayor movimiento de buques en Noruega. Dicho puerto maneja distintos tipos de carga como son de carga general, contenedores, granel mineral, transporte de pasajeros en ferries y cruceros. Las emisiones las calcularon mediante el método de bottom-up y utilizaron los factores de emisión presentados por la US EPA (2009) y la ENTEC UK (2005) y dividieron los barcos en dos grupos, buques OGV y buques HV. Evaluaron un escenario en el año 2020 que considera: aumento de tráfico marítimo, cumplimiento de la norma del contenido de azufre en el combustible (0.1%) y la aplicación de diferentes medidas de mitigación (conexión a tierra, disminución de la velocidad y uso GNL). El puerto en el año 2013 tuvo alrededor de 3,000 arribos siendo los ferries los más frecuentes (34.24%), seguido de los buques de carga general (22.20%) y contenedores (14.95%). Las actividades que seleccionaron para hacer el cálculo fueron las maniobras de arribo, zarpe y estadía. Estimaron las emisiones de NO_x, PM₁₀, SO₂ y gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O).

Los resultados muestran que los buques oceánicos (cruceiros, buques portacontenedores y ferries) emiten entre el 63% y 78% de las emisiones totales de NO_x, PM₁₀, SO₂ y CO₂. Además, los valores más elevados los obtuvieron en el atraque, seguidos de las maniobras de arribo y zarpe. Concluyeron que el cumplimiento a la normativa supone una reducción del 90% y del 10% en las emisiones de SO₂ y PM₁₀, respectivamente. La implementación de conexión a tierra en combinación con una zona de reducción de velocidad proporciona disminuciones de hasta un 15% en emisiones de NO_x y CO₂ y reducciones de hasta 23% de NO_x y 17% de CO₂ si se implementa el uso del GNL entre los buques que se encuentren atracados.

Zis. (2019) realizó una revisión bibliográfica de la electrificación de los puertos, usando la tecnología CI, en distintas zonas portuarias del mundo y los obstáculos actuales que se tienen para su aplicación. El autor construyó un marco cuantitativo integrando a todas las partes interesadas, además presentó estudios de casos ilustrativos que consideran la perspectiva de las empresas navieras, operadores de terminales, entre otros, que optan por invertir en instalaciones de energía costera. En la primera sección presenta una reseña bibliográfica de las investigaciones sobre las emisiones y el uso de CI, posteriormente en la sección siguiente ilustra la metodología utilizada para la evaluación de una inversión de dichos sistemas por todos los interesados. Y por último examinó la perspectiva de los operadores de las embarcaciones que adaptan buques de distintos tipos y el valor actual neto de sus inversiones. Encontró que existen 42 puertos que ya utilizan la tecnología de CI y que la mayoría de las conexiones están dedicadas a los buques tipo RO-RO, contenedores y cruceros, con instalaciones limitadas para graneleros y petroleros. Además, mencionó que es necesario hacer un análisis antes de invertir en alguna tecnología, por ejemplo, cuando hay precios altos de combustible, el costo de la electricidad de la red tiende a ser significativamente menor, y por consecuencia proporciona menores costos de operación. Por otro lado, comentó que el uso de CI reduce las emisiones locales, pero se debe conocer el origen del suministro eléctrico en puerto, es decir, viene de hidroeléctricas, carboeléctricas, termoeléctricas, etc., para así evaluar el impacto de manera global. Por último, concluyó, que el principal obstáculo para la aplicación de esta tecnología son los costos de inversión, tanto para los puertos, como para los barcos ya que los más antiguos no cuentan con esa instalación.

Xia et al., (2021) en su investigación proponen un nuevo método de reducción de emisiones, llamado programación de buques con reducción de velocidad, por sus siglas en inglés,

(SSSR). Primero, realizaron una revisión literaria, en donde mencionan que los puertos que cuentan actualmente con un programa de reducción de emisiones son: Los Ángeles, Long Beach, San Diego, New York, New Jersey y algunos puertos de Corea, quienes han reportado que las emisiones de CO₂ pueden reducirse en un 40% después de disminuir la velocidad a 12 nudos. Después, los autores introducen el modelo matemático del método propuesto, en donde consideran las cuatro etapas de operación de un buque en puerto (amarre, navegación por vías transitables, operaciones auxiliares y operaciones de carga y descarga). En dicho método proponen reducir la velocidad en la entrada de la vía de navegación al puerto respetando siempre las distancias entre buques para evitar alguna colisión o daño, coordinar bien en que muelle van a atracar para reducir los tiempos de maniobra, y por último, realizar una buena logística al momento de cargar y descargar mercancía para no perder tiempo en esa actividad.

Después probaron el método propuesto en el puerto del norte de China donde arriban 29 barcos al día, revisaron el tiempo que tardan en arribar y zarpar, calcularon las emisiones en cada etapa y establecieron como límite de reducción de velocidad 10 nudos. Llegaron a la conclusión que al mejorar la logística de entrada a puerto el tiempo de espera de los buques se reduce en un 10.2% y las emisiones que se generan en la espera pueden reducir hasta un 16.4%. Además, si se reduce la velocidad a un 5%, las emisiones de CO₂ disminuyen unas 0.863 mil toneladas. Por último, mencionaron que al optimizar la secuencia de programación de las embarcaciones que entran y salen en un determinado periodo y reducir sus velocidades, puede disminuir efectivamente el tiempo total de programación y las emisiones totales de carbono en el puerto.

Hossain et al., (2019) realizaron un estudio en donde evaluaron la sostenibilidad y el comportamiento ambiental en 18 puertos en Canadá. Utilizaron 28 indicadores establecidos por el programa GM y otras regulaciones que rigen en ese país, para identificar las tendencias operativas relacionadas con el cuidado del medio ambiente en las zonas portuarias. Analizaron los informes anuales de desempeño de un periodo de ocho años, publicados por GM para evaluar las tendencias del crecimiento de mejora. Encontraron que el 44% de los puertos canadienses han establecido un rendimiento ambiental. Además, mencionaron que sólo el puerto de Montreal y de Halifax informaron públicamente de tener la certificación ISO 14001. Todos los demás puertos analizados cuentan únicamente con la certificación de GM. Un tercio de los puertos (33%) tienen un menú relacionado con el medio ambiente en sus sitios web corporativos para comunicar información del desempeño

ambiental a las partes interesadas, aumentando su credibilidad, comparabilidad y transparencia en los informes de sostenibilidad.

Asimismo, encontraron que el 28% de los puertos realizan monitoreos ambientales de calidad del aire, calidad del agua, contaminación por ruido y el estado del hábitat. Entre el 22% y el 11% tienen instalaciones de energía en tierra y de combustibles alternativos, algunos de estos puertos ofrecen incentivos específicos a los propietarios de buques para facilitar esos servicios, reduciendo derechos portuarios y/o proporcionando certificados de comportamiento ambiental. Por último, mencionaron que el 22% ha integrado la construcción de infraestructuras portuarias ecológicas o sostenibles. Los autores concluyeron que las autoridades portuarias tienen la obligación de cumplir con los organismos reguladores ambientales y socialmente sustentables con las comunidades aledañas para proteger y garantizar la seguridad del medio ambiente en donde operan.

Fahdi et al., (2019) realizaron un estudio relativo a la necesidad de cuidar la salud física y mental de los trabajadores de las terminales de contenedores y reducir la contaminación en la zona portuaria y ahorrar energía de los equipos de manipulación. Hicieron una comparación del rendimiento de las grúas RTG y las E-RTG desde la perspectiva del ahorro de energía y la reducción de las emisiones de CO₂, y analizaron el impacto del uso de E-RTG en las políticas de puertos verdes. Además, seleccionaron los cinco puertos verdes más importantes de Asia (Shanghái, Singapur, Hong Kong, Tokio y Busan), considerando tres factores: Fuente de energía renovable, el ahorro de energía mediante la conversión de RTG a E-RTG y la reducción de las emisiones de CO₂ mediante la conversión de RTG a E-RTG. Encontraron que usando energías renovables, la reducción de las emisiones de CO₂ alcanza el 80%. Por otro lado, mediante el uso de E-RTG, dichos puertos pueden ahorrar energía del 20% al 84%. Concluyeron, que la transformación de RTG a E-RTG es la mejor manera de lograr un buen progreso en el ahorro de energía, reducción de emisiones y reducción de costos.

Lee et al., (2019), hicieron una investigación para analizar los recientes estudios de sostenibilidad, en particular los relacionados con el transporte marítimo, los puertos y la logística marítima. Otro de sus objetivos principales fue contribuir a las partes interesadas del sector para la comprensión de la situación actual y ayudar a formular ideas de gestión y elaborar políticas de sostenibilidad adecuadas para el sector. Estos autores identificaron que desde el año 1992, cuando la OMI adoptó un protocolo de convenio internacional para lograr el desarrollo marítimo sostenible, su alcance en materia de investigación era muy

escasa a comparación de otras industrias. Además, aunque tres de las revistas internacionales analizadas contribuyeron a cubrir cuestiones de sostenibilidad en puertos, el número de documentos e investigaciones sigue siendo escasa. Por otro lado, aunque ocho de los documentos revisados abordaron temas de distribución de mercancías, optimización del suministro de energía de las olas costeras, red de transporte de contenedores sostenible, reducción de emisiones por operación de buques, entre otros, los autores concluyeron que se requiere mayor investigación en temas de rendimiento y aplicación de estrategias sostenibles, de transporte intermodal, patrones de comportamiento de las compañías navieras y ciclo de vida.

Sifakis y Tsoutsos, (2021) realizaron un análisis literario, en donde, revisaron y compararon información para identificar oportunidades de investigación cruciales y reunir los hallazgos actuales de la perspectiva de puertos verdes con energía cero. Los autores recopilaron diferentes medidas sustentables, destacando sus pros y contras para su futura implementación junto con sus beneficios económicos o tecnológicos en función de su rentabilidad y experiencia en cada una de ellas. Además, clasificaron a los puertos en tres categorías principales según su logística portuaria, y evaluaron sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, junto con su desempeño sostenible. Concluyeron que los estudios relativos a la cooperación de las partes interesadas de los puertos son insuficientes. Los resultados de los estudios existentes son desalentadores, ya que detectaron que la cooperación es limitada debido a las diferentes percepciones y planes de negocio. Los autores mencionan que se requiere de una colaboración concreta entre todos los usuarios para aplicar con éxito estas medidas y alcanzar el objetivo final de convertir un puerto en verde y sustentable. Por último, proponen los temas en donde se necesita mayor investigación, los cuales son: cooperación entre las partes relacionadas, estudios de la logística y tamaño de puerto, tecnologías aplicadas y que todo trabajo debe ser implementado y probado en las condiciones reales del puerto.

Densberger y Bachkar (2022), hicieron una revisión bibliográfica del estado actual de los equipos de manejo de carga con cero emisiones contaminantes. Además, analizaron el caso específico de los puertos de los Ángeles y Long Beach, debido a que son los dos puertos que están liderando el impulso hacia puertos de cero emisiones en los Estados Unidos y cuentan con una estrategia circular sostenible al implementar diferentes proyectos en las actividades de operación portuaria. Encontraron que gran parte del progreso en el desarrollo de equipos de manejo de carga con cero emisiones, se ha centrado en camiones

de patio, vehículos AGV, grúas RTG, apiladoras de alcance, manipuladores superiores y montacargas debido a que estos equipos representan una gran cantidad del consumo de energía en una terminal de carga y tienen un potencial significativo para mejorar la eficiencia energética. Los avances prometedores en las tecnologías de equipos de manejo de carga con cero emisiones de baterías y celdas de combustible pueden generar puertos más limpios y competitivos y empleos más seguros. Abordar los desafíos que son esenciales para una transición exitosa, debe provenir de un nivel superior de autoridad, como una agencia reguladora estatal. La transición a equipos de manejo de carga se puede lograr con: una colaboración más sólida entre todas las partes interesadas clave, 2) el desarrollo de regulaciones estatales, 3) comercialización acelerada de tecnología a través de más proyectos de demostración y estandarización de infraestructura, 4) mejores procesos de financiamiento, 5) mejor capacitación de la fuerza laboral y 6) mayor planificación de resiliencia.

II. Justificación

La contribución de las emisiones de contaminantes producto de las distintas actividades propias de un recinto portuario y de los trabajos de ampliación como: dragado, transporte terrestre de materiales, construcción del muelle, pavimentos, entre otros, tienen un impacto en la calidad del aire de la zona de influencia en el caso de que no se tomen las estrategias pertinentes de prevención, minimización y control. La operación actual y la ampliación del Recinto Portuario de Veracruz es uno de los proyectos más importantes en México, el cual tendrá un beneficio económico y social tanto a nivel local como a nivel nacional.

Se contempla el diagnóstico de la contaminación atmosférica en el estado actual de la operación y ampliación del Recinto Portuario, así como la evaluación de las estrategias aplicadas en otros puertos, específicamente aquellos que cuenten con la certificación de “Puerto Verde” del mundo, tomando como ejemplo de: Europa, Asia y Norteamérica. A partir de dicha evaluación se proponen estrategias específicas con base en la normativa internacional de la OMI y del Convenio MARPOL, del cual México es parte y con esto evitar el impacto en la calidad del aire por las actividades portuarias en este caso de estudio.

III. Hipótesis

A través de la experiencia de gestión ambiental de otros puertos del mundo, se podrán proponer estrategias de prevención, minimización y control para mejorar la calidad del aire de la zona de estudio, así como con la selección de escenarios específicos de operación en el puerto.

IV. Objetivos

Objetivo General

Establecer las estrategias de prevención, minimización y control de las emisiones a la atmósfera por la operación y ampliación del Recinto Portuario de Veracruz, con base en el diagnóstico de la situación actual, así como con la experiencia de otros puertos del mundo.

Objetivos Específicos

- Determinar el nivel de emisión atmosférica de las fuentes potenciales de contaminación, considerando los periodos de mayor actividad en el puerto, utilizando la literatura existente e información relacionada con las operaciones del área de estudio.
- Analizar la gestión y las estrategias ambientales en materia de contaminación atmosférica de los puertos verdes más importantes del mundo seleccionando aquellas que se adapten a la zona de estudio.
- Revisar la información meteorológica disponible con los datos técnicos y de emisiones de buques para realizar los escenarios propuestos de dispersión de contaminantes atmosféricos.
- Proponer las estrategias de prevención, minimización y control de la contaminación atmosférica con base en los resultados obtenidos en el estudio.

V. Alcances y Limitaciones

5.1 Alcances

- Contribuir con la información del nivel de emisiones de contaminantes atmosféricos de los buques tipo granelero, portacontenedores y las grúas RTG.
- Conocer las concentraciones de dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno en la zona de estudio de los diferentes escenarios seleccionados.
- Aplicar estrategias ambientales a las fuentes de emisión analizadas de la zona de estudio.

5.2 Limitaciones

- Restricción de información de las cesionarias por confidencialidad y por datos que afecten a terceros.
- Visitas a campo durante el periodo de pandemia para la recolección de datos y evidencia fotográfica.

VI. Marco Teórico

6.1 Contaminación atmosférica en puertos

Las operaciones portuarias pueden generar impactos ambientales en el aire, el agua y la tierra, sin embargo, investigaciones recientes han atribuido que el mayor daño se genera a través de las emisiones de contaminantes a la atmósfera como consecuencia de sus distintas actividades logísticas (ICCT, 2012). Los puertos dependen de una amplia gama de equipos y de otras fuentes móviles con motores diésel como camiones, vehículos marinos, locomotoras, grúas, vehículos de transporte, tanques de almacenamiento, pilas abiertas de almacenamiento, entre otros, que liberan contaminantes, incluidos partículas, NO_x, SO_x, COVs, HC y otros tóxicos del aire (EPA, 2022).

La contaminación del aire es la presencia en la atmósfera de elementos nocivos que alteran su composición y que afectan a cualquier componente del ecosistema, incluyendo la salud de diferentes maneras (Oyarzún, 2010). La exposición a las emisiones asociadas con los motores diésel puede generar problemas de salud significativos, incluida la mortalidad prematura, el aumento de los ingresos hospitalarios por enfermedades cardíacas y pulmonares, riesgo de cáncer, síntomas respiratorios, principalmente para niños, ancianos, trabajadores de la zona y otras poblaciones sensibles (ICCT, 2012). Alrededor del 70% de las emisiones de los barcos se producen a menos de 400 km de la costa, y contribuyen típicamente con 1 a 7% a los niveles medios anuales de PM₁₀, con 1 a 20% a PM_{2.5} y con 8 a 11% a PM₁ en las áreas costeras (Viana et al., 2014). La contaminación atmosférica puede ser de carácter local, cuando los efectos ligados al punto de emisión se sufren en las inmediaciones de este, o global, afectando el equilibrio de la atmósfera u otras zonas alejadas.

Existen dos tipos de contaminantes atmosféricos: primarios y secundarios. Los primarios son aquellos vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, etc., tal como el CO y el CO₂ generados por la quema de combustibles fósiles de equipos de manejo de carga; los NO_x que se forman cuando el nitrógeno y el oxígeno se combinan a altas temperaturas (por ejemplo, en la combustión que se lleva a cabo en buques mercantes); los SO_x, que se producen cuando se combina el sulfuro y el oxígeno, los COVs, los cuales se forman por carbón, metano, entre otros; y por último las partículas provenientes de la manipulación de la carga a granel. (Ballester, 2005).

Los contaminantes secundarios son aquellos que se forman mediante reacciones químicas atmosféricas y surgen del smog fotoquímico que está compuesto principalmente de O₃, el cual es nocivo para los seres vivos por sus niveles de oxidación. Ambos contaminantes, primarios y secundarios, pueden depositarse en la superficie de la tierra y viajar algunos kilómetros, llegando a otras zonas y ocasionar impactos negativos (Aránguez et al., 2000).

A continuación, se describen los contaminantes atmosféricos que se generan debido a las diferentes actividades realizadas en un recinto portuario.

Tabla 1.

Contaminantes generados por actividades portuarias

Contaminante	Descripción	Efectos
CO₂ (Riquelme, 2017)	Gas de efecto invernadero, procedente de la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), incoloro y con olor intenso.	Es Irritante, causa cuadros de hipercapnia y problemas cardiovasculares, además, contribuye al efecto invernadero y al disolverse en agua forma ácido carbónico.
CO (WHO, 2018)	Gas incoloro e inodoro emitido por procesos de combustión, la mayoría de las emisiones provienen de fuentes móviles.	Causa efectos nocivos en la salud tanto en humanos como la fauna silvestre, mediante la reducción del suministro de oxígeno a los órganos del cuerpo y los tejidos, a concentraciones altas puede causar la muerte.
SO₂ (Aránguez et al., 2000)	Gas incoloro con un olor irritante en concentraciones >3 ppm. Se forma por la combustión de sustancias que contienen azufre como el carbón o el petróleo, utilizado comúnmente en centrales eléctricas, vehículos y embarcaciones. Al ser muy soluble en el agua, se absorbe con facilidad en los conductos húmedos del sistema respiratorio	Causa irritaciones en los ojos, membranas mucosas, piel, inflamación del sistema respiratorio e insuficiencias pulmonares. Asimismo, ocasiona daños a la vegetación, degradación de la clorofila, reducción de la fotosíntesis y pérdida de especies. Incluso sobre edificaciones, a través de procesos de acidificación.
NOx (Saxe y Larsen, 2004)	Gases altamente reactivos que se forman a partir de la quema a altas temperaturas de combustible que contiene compuestos nitrogenados.	La exposición a NOx ocasiona molestias respiratorias, disminución de la capacidad olfativa y edemas pulmonares. También en la atmósfera

	<p>Los dos gases de mayor interés son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). El NO, es incoloro, inodoro e inflamable, se oxida rápidamente a dióxido. El NO₂ puede reaccionar con la humedad ambiental, formando ácido nítrico que produce corrosiones metálicas.</p>	<p>pueden contribuir a la formación de ozono fotoquímico, contribuye al calentamiento global y puede provocar lluvia ácida.</p>
<p>HC (SE, 2015)</p>	<p>Grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los más simples y se consideran como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos. Pueden encontrarse de forma líquida natural (petróleo), gaseoso (gas natural) y sólido (hidratos de metano).</p>	<p>Son una amenaza debido a que algunos de estos generan cáncer, los vapores son irritantes para las membranas mucosas y pueden causar lesiones sistemáticas al ser inhaladas. Algunos de los hidrocarburos son precursores de otros contaminantes, que perjudican la salud de los seres vivos.</p>
<p>Partículas (Ballester, 2005) (EPA, 2023)</p>	<p>Mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire que pueden variar significativamente sus dimensiones, forma y composición. El viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y sedimentar en el suelo o el agua. El tamaño puede ser desde 0.005 hasta 100 [μmm].</p>	<p>Pueden penetrar dentro de los pulmones. Según su composición química, los efectos de su sedimentación pueden provocar: acidificación de lagos y arroyos, cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de cuencas, reducción de los nutrientes del suelo, daño en los boques sensibles y cultivos agrícolas, efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas y contribución a los efectos de la lluvia ácida.</p>

Los puertos están en una posición complicada ya que son una entidad pública responsable de preservar el ambiente y actualmente se ven obligados a reducir las emisiones que generan, por otro lado, son una entidad privada comprometida con sus clientes para asegurar la competitividad de su negocio. Por lo que la transición a una operación sostenible

es un tema integral y se debe encontrar un equilibrio y una solución para salvaguardar la salud humana y el ambiente.

6.1.1 Anexo VI MARPOL

El Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques MARPOL es el principal documento sobre la prevención de la contaminación del medio marino por las embarcaciones a causa de factores de funcionamiento o accidentes. Fue adoptado el 2 de noviembre de 1973, debido al gran número de accidentes ocurridos entre el año 1976 y 1977. Este instrumento entro en vigor el 2 de octubre de 1983. Actualmente cuenta con seis anexos, en donde el seis es específico para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, el cual entro en vigor el 19 de mayo de 2005. Este establece los límites de las emisiones de óxidos 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 (OMI, 2020). El anexo VI tiene cuatro capítulos con un total de 23 reglamentos, en donde se establecen los requisitos para el control de las emisiones de los buques, además establece criterios y procedimientos para determinar la zona de control de emisiones de NO_x, SO_x y partículas en cualquier zona marítima. No obstante, este anexo se aplica únicamente a las embarcaciones con un arqueo bruto superior o igual a 400, con ciertas excepciones. A continuación, se explica el contenido más relevante de dicho documento obtenido del sitio web de la Organización Marítima Internacional, (OMI, 2015).

En el reglamento 13 se establecen los límites de emisión de NO_x de los motores diésel tanto principales como auxiliares con una potencia de salida superior a 130 kW, el cual es denominado "Código Técnico de NO_x", este se ha adoptado para especificar los requisitos para la prueba, estudio y certificación de motores diésel que cumplen con los límites establecidos, según el año de construcción del buque. Además, especifica los métodos primarios como: la inyección retardada, la modificación de la boquilla del pistón, el cambio de la relación de compresión, la inyección directa de agua, la emulsificación de agua, la recirculación de los gases y los métodos secundarios como la reducción catalítica selectiva (SCR), para la reducción de las emisiones. Los estándares de emisión de NO_x de la OMI se denominan Tier 0, I, II y III. Los niveles se establecieron en diferentes años y los límites para cada uno de estos se establecen en función de la velocidad nominal del motor (revoluciones del cigüeñal por minuto, rpm), como se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Estándares de emisión de NOx

Tier	Año	Límite de emisión de NOx, g/kWh		
		n < 130	130 < n < 2000	n > 2000
Tier 0	1990 - 2000	17	$45*n^{-0.2}$	9.8
Tier I	2000 - 2011	17	$45*n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011 +	14.4	$44*n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016 +	3.4	$9*n^{-0.2}$	1.96

Fuente: Adaptada de (*Defra UK Ship Emissions Inventory Final Report, 2010*)

El reglamento 14 trata sobre los óxidos de azufre, en particular del contenido de azufre en el combustible marino y establece que antes del 1 de enero de 2012 se utilizaba un combustible marino con un porcentaje de 4.5% m/m, posteriormente se redujo a 3.5% m/m y a partir del 1 de enero de 2020 debe de cumplir con un 0.5% m/m. Además, existen zonas de control de emisiones como el Mar Báltico y el Mar del Norte, en donde hoy en día, deben cumplir con el 0.10% m/m de azufre. Por otro lado, se indica que es posible hacer uso de sistemas de control como sistema de limpieza de gases de escape o depuradores y combustibles alternativos como el GNL. Otro de los criterios que deben de considerarse es que los buques que operan hasta 200 millas náuticas frente a las costas de las zonas de control de emisiones deben cumplir con los estándares más avanzados para las emisiones de NOx, así como usar combustible con 0.1% m/m de azufre.

Las emisiones no controladas de la quema de combustible marino tradicional tienen un impacto significativo en el medio ambiente, especialmente con el aumento de la cantidad de las emisiones, debido al incremento del movimiento de los buques en el mundo (Winnes et al., 2015). El sector de transporte marítimo ha sido identificado como el sexto mayor emisor de GEI a nivel mundial (Alamouh et al., 2022). Por esto, es importante que las embarcaciones operen bajo las regulaciones internacionales de la Organización Marítima Internacional.

6.2 Puerto verde

Es aquel que desempeña actividades causando el mínimo daño al medio ambiente y a la sociedad, aportando medidas de mejora y control de la calidad del aire, agua, ruido y residuos (Fernández, 2015). Se refiere además a la administración eficiente y racional de los bienes y servicios ambientales de un recinto portuario, tomando en cuenta siempre el

bienestar de la población aledaña y evita comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras (Tami, 2013). Un puerto verde busca operar de manera sustentable, en todas sus áreas, mejorando su competitividad a nivel internacional para ofrecer mejores servicios tanto a los trabajadores de la zona portuaria como a las navieras que arriban.

De igual forma, integra proactivamente diferentes medidas de adaptación y mitigación al cambio climático tanto en sus operaciones, como en sus planes de trabajo recientes y de años futuros. Busca gestionar y equilibrar tres áreas vitales: prosperidad económica, bienestar social y calidad ambiental (Lam y Yap, 2019). Un puerto sostenible debe de ser tanto económico como ambientalmente eficiente y respetuoso (Chang, 2013), logrando una competitividad portuaria con reputación ecológica, en sus distintas operaciones. De acuerdo con lo mencionado por Lam y Li (2019), las tres áreas más importantes que conforman un puerto verde son: la participación de las partes interesadas, políticas ecológicas y la colaboración científica. Con respecto, a las partes interesadas, estos autores mencionan cuatro de la comunidad portuaria; interesados internos, interesados externos, interesados en la legislación y las políticas públicas y por último las partes interesadas de la comunidad. Además, resaltan que el cumplimiento de los objetivos de los interesados es vital para lograr el desarrollo sostenible de los puertos a largo plazo.

Por otro lado, algunas de las políticas públicas de un puerto verde son: definir áreas de control de emisiones, zonas de reducción de velocidad y uso de tecnologías de energía alternativa (diferentes combustibles o conexiones a tierra). Tales políticas mejoran sustancialmente la calidad del aire del área, reduciendo los efectos adversos sobre la salud de la comunidad local, que engloba enfermedades respiratorias, cardiovasculares, entre otras (Zhu et al., 2017). Otra de las actividades importantes que realiza un puerto verde, es reducir la contaminación del agua y sus impactos negativos en el ecosistema marino ocasionada por el uso de agua de lastre, residuos de combustible, operaciones de dragado, construcción y ampliación de zonas portuarias, mediante un análisis, medición y seguimiento de las operaciones, bajo la regulación de normas ambientales, proporcionando directrices y herramientas para contrarrestar los daños (Lam y Notteboom, 2014).

La última área que ayuda a conformar un puerto verde es la investigación científica, lo que integra el análisis constante de la calidad del agua, del aire, sedimentos y el monitoreo ecológico además de la vigilancia y estimación de la huella de carbono que representa otro aspecto medioambiental importante (Mamatok y Jin, 2017). Dicha información recolectada, es de gran importancia ya que sirve como base teórica cuando se proponen y se quieren

establecer iniciativas sostenibles, además de obtener valores de desempeño que reflejen los resultados positivos logrados.

Hoy en día, ya existen certificaciones enfocadas completamente a recintos portuarios que buscan cubrir las necesidades de dicho sector de manera más concreta, las cuales se describen a continuación y en la Tabla 3 se muestran los requisitos para poder ser acreedor a dicho documento.

Green Marine: Es un programa de certificación ambiental con más de quince años de experiencia, es líder para la industria marítima de América del Norte (Green Marine, 2023). Es de carácter voluntario que facilita y ayuda a sus participantes a progresar en su desempeño ambiental más allá de las regulaciones existentes. Se encamina en distintas áreas clave como lo son la calidad del aire, suelo, agua y relaciones con la sociedad. Actualmente, cuenta ya con más de 450 miembros de diferentes partes del mundo. Se creó en 2007, con el objetivo claro de guiar a la industria marítima hacia la excelencia ambiental, alentando y apoyando a los puertos a adoptar acciones específicas, concretas y medibles (Green Marine, 2023). Cuenta con 14 indicadores de desempeño que abordan temas ambientales, prioritarios los cuales son exclusivamente de la empresa Green Marine, los cuales se mencionan a continuación:

Responsabilidad de Armadores: Especies acuáticas invasoras, residuos de carga, descarga aceitosa, emisiones de NOx, emisiones contaminantes de SOx y partículas, reciclaje de barcos y ruido de submarinos.

Actividades atribuidas a los puertos: Impactos comunitarios, relaciones comunitarias, manipulación y almacenamiento de granel seco, liderazgo ambiental, prevención de derrames, gestión de aguas pluviales y gestión de residuos.

APSN Green Port: El programa GPAS es un sistema de evaluación verde para puertos de la región Asia-Pacífico creado por ASPN. Su objetivo es fomentar el desarrollo verde y sostenible en los recintos portuarios, proporcionando un camino claro para realizar planes de puertos verdes, crear una plataforma para compartir las mejores prácticas, elevar el perfil de los puertos para promover la competitividad general y mejorar su capacidad de desarrollo sostenible (APSN Green Port, 2023).

Cuentan también con ciertos indicadores primarios (compromiso y voluntad, acción e implementación, eficiencia y efectividad) y secundarios los cuales han definido con base en diferentes normas de referencia. Cada indicador se pondera y la calificación final se calcula

considerando puntuaciones y pesos. Las evaluaciones son revisadas por siete expertos, si es positiva la evaluación se les otorga el premio APSN Green Port, el cuál es válido por dos años (APSN Green Port, 2023).

ECO PORTS: Es la principal certificación en el sector portuario europeo. Inició por un grupo de puertos proactivos en el año 1997 y se ha integrado enteramente en la ESPO desde 2011. Su objetivo inicial es crear conciencia sobre la protección ambiental a través de la cooperación y el intercambio de conocimientos entre puertos y perfeccionar la gestión ambiental.

Cuenta con dos instrumentos para lograr la certificación, uno es mediante el método de autodiagnóstico (SDM), el cual consta de una verificación de la manera en cómo se opera en el puerto, después se compara la puntuación con la media europea y por último se revisa y se reciben consejos de expertos y recomendaciones personalizadas. El otro modo es mediante el sistema de revisión ambiental portuaria (PERS). Actualmente, existen dentro de esta red de Eco Ports, 25 diferentes países, 103 miembros, un total de 663 entradas SDM, 31 puertos certificados PERS y 56 puertos con certificación ISO 14001 (EcoPorts, 2023).

Tabla 3.

Áreas consideradas para la certificación de Puerto Verde

	Selección de Materiales
Consumo de recursos	Gestión de Residuos
	Consumo de Agua
	Energía Utilizada
	Transporte
Calidad del medio ambiente	Ambiente Interior
	Emisiones
	Calidad del Agua
	Uso de Suelo y Gestión Ambiental

Fuente: Adaptada de Green Marine (2023)

Actualmente en México existen 2 puertos verdes, uno se encuentra en Ensenada y el otro en Lázaro Cárdenas. A nivel internacional existen distintos puertos comprometidos con el cuidado del medio ambiente y con la operación de prácticas sustentables, algunos de ellos son el Puerto de Long Beach (EUA), Puerto de Halifax (Canadá), Puerto de Montreal

(Canadá), Puerto de Vancouver (Canadá), Puerto de Hamburgo (Alemania), Puerto de Barcelona (España), San Francisco (EUA), Singapur, Puerto de Gottenberg y Rotterdam.

6.3 Buques mercantes

Los buques mercantes se clasifican en términos generales por su tamaño y por su tipo de carga, lo cual determina sus rutas de navegación, puertos donde podrá arribar, su tamaño y su tipo de mercancía. Las dimensiones principales de un barco son eslora, manga, puntal y calado, las cuales se establecen de tal manera que la embarcación pueda transitar sin complicaciones por las áreas más estrechas y menos profundas de un canal o puerto, tanto en su capacidad de carga máxima como en condiciones de descarga (SCT, 2017). La evolución de las naves por el avance tecnológico y las necesidades de transportar grandes cantidades de carga se refleja en mayores dimensiones y tipos de navíos, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 4.

Clasificación de los buques mercantes

Generación	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a
Tipo de embarcación	Feeder	Standard	Panamax Class	Post Panamax	Post Panamax Plus	New Panamax	Ultra Large Container Vessel	Triple E
Eslora (m)	131-200	215-225	250-290	275-305	300-345	366-398	396-398	400
Manga (m)	17-21	20-29	32	32-40	41-43	49	54-56	59
Calado (ft)	<30	30-37	36-40	36-44	43	47	50-52.5	50-54
Capacidad TEU's	500-800	1,000 2,500	3,000 4,000	4,000 5,000	5,000 8,000	11,000 14,500	16,020	18,270

Fuente: Adaptada de (UNCTAD, 2022b)

La función de los barcos mercantes es el tráfico marítimo internacional, es decir, el traslado de carga a través del mar de un país a otro. Esto permite el desarrollo del comercio exterior a gran escala y a un costo relativamente económico en comparación con otros. Entre todos los medios de transporte, el marítimo es el que por su capacidad mueve el mayor volumen de mercancías (UNCTAD, 2017). Los buques son vehículos marinos grandes y complejos que deben tener autosuficiencia en sus largos periodos de tiempo de navegación y con un alto grado de fiabilidad. Un barco puede dividirse razonablemente en 3 zonas: las bodegas o tanques de carga, habitabilidad y cuarto de máquinas. El tamaño del espacio de máquinas se decide en función de los motores principales instalados y del equipo auxiliar necesario, dependiendo de la potencia que requiera el barco.

Las embarcaciones mercantes transportan carga de diferentes tipos: sólido, líquido o gaseoso y se clasifican según los productos que almacenan en sus compartimentos, diseño estructural y misión de navegación. La clasificación de los buques por tipo de carga, según lo descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCT4-2013, Terminología Marítima-Portuaria, es la siguiente:

Buques portacontenedores: Embarcación que transporta carga en cajas de acero de dimensiones y tipos acordados internacionalmente TEU, como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Buque portacontenedores

Fuente: Tomada del sitio web oficial de ICAVE, Veracruz

Buques graneleros o *bulk carrier*: Barco diseñado para transportar grandes volúmenes de carga suelta, principalmente cereales, minerales o cargas mixtas, posee grúas para cargar y descargar la mercancía, se caracteriza por su cubierta corrida con varias escotillas y cuenta con compartimentos separados para los distintos tipos de cargamento como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Buque granelero, atracado en el muelle 5 del puerto de Veracruz

Fuente: Propia, tomada en Agosto del 2020

Buques petroleros o buque tanque: Embarcación construida para el transporte a granel de cargamentos líquidos como petróleo crudo y sus derivados, gas natural licuado y gas de petróleo licuado, aceites. Se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Buque petrolero

Fuente: Tomada del sitio oficial de ASIPONA, Veracruz

Buque de carga general: Toda embarcación destinada al transporte de mercancías generales, cuentan con sus propias grúas incorporadas para realizar sus operaciones de carga y descarga en puerto, como el que se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Buque de carga general, atracado en el muelle 4 del puerto de Veracruz

Fuente: Propia, tomada en Agosto del 2020

Buque Roll On / Roll off: Barcos diseñados y contruidos para el transporte de carga rodada, como automóviles, camiones o trenes, que acceden al buque por sus propios medios a través de grandes compuertas, comúnmente se colocan en la popa, o en la popa y la proa para agilizar la descarga y carga en tierra, como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Buque Roll on/ Roll off, atracado en el muelle 1 del puerto de Veracruz

Fuente: Propia, tomada en Agosto del 2020

Buques quimiqueros: Su función es transportar productos químicos (fenol, amoníaco, gasolina y demás derivados). Se clasifican según el tipo de agresividad o riesgo de su carga y se identifican por su menor tamaño con eslora de 150 metros. Esta se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Buque quimiquero

Fuente: Tomada de Enciclopedia Wartsila, 2018

Buque gasero: Su cubierta se caracteriza por grandes tanques esféricos o cilíndricos donde transporta gas natural licuado, como se ilustra en la Figura 7. La construcción de estos buques genera costos altos por la tecnología que utilizan en su maquinaria auxiliar, puente de mando y por su diseño estructural.



Figura 7. Buque gasero

Fuente: Tomada de Enciclopedia Wartsila, 2018

Existen barcos de menores dimensiones, que operan en el recinto portuario y tienen un papel importante en la logística de arribo y zarpe de buques mercantes. Estos se denominan remolcadores. Son embarcaciones pequeñas auxiliares para la navegación y maniobras de los buques y otros elementos flotantes, por lo tanto, se utilizan en puerto para asistir a los buques en las maniobras de atraque y desatraque, para remolcar, empujar o auxiliar a un buque que se ha quedado sin medios de propulsión o de gobierno, para dar escolta, etc., por lo que son barcos que requieren de motores con gran potencia como el que se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Barco remolcador de PEMEX, atracado en el puerto de Veracruz

Fuente: Propia, tomada en Agosto del 2020

6.3.1 Descripción de un tren propulsor

Actualmente, la mayoría de las embarcaciones utilizan motores diésel, los cuales tienen una mayor relación de presión, mayor potencia de salida y una estructura más sencilla, además pueden utilizar diferentes tipos de combustibles, que de acuerdo con las normas industriales japonesas se identifican de la siguiente manera: MDO con un contenido de azufre de entre 0.5% a 2.0%, combustóleo intermedio MGO con 3.0%, y BFO, con más de 3.5% (Okubo & Kuwahara, 2020). Los buques cuentan con distintos tipos de motores (principal, auxiliar y de emergencia) y son la parte más importante de un sistema propulsor conformado por la maquinaria y equipos necesarios destinados a convertir la energía calorífica del combustible y transmitirla hacia el eje y la hélice, generando la fuerza de empuje que permite darle el desplazamiento al buque.

Motor principal: es el encargado de entregar la propulsión de avance al barco, suele ser de 2 o 4 tiempos dependiendo las características del buque y la velocidad que requiera. A

este motor, junto con los auxiliares, se le atribuye la mayor magnitud de emisiones en comparación a la maquinaria de turbinas, calderas, motores de emergencia, entre otros (Riquelme, 2017).

Motor auxiliar: cumple la función de satisfacer la demanda energética con respecto a la electricidad, iluminación, ventilación, sistemas de bombas, maniobra en puerto, etc., por lo general, este suele ser de 4 tiempos de media y alta velocidad (Guevara, 2010).

Motor de emergencia: utilizado sólo en caso de que el motor auxiliar presente alguna falla, por lo general es de 4 tiempos de velocidades medias y altas.

Es importante distinguir las distintas categorías de motores que tienen las embarcaciones mercantes, dado que a cada uno se le asocia una potencia mecánica, la cual tiene impacto directo en la cuantificación de emisiones atmosféricas (Riquelme, 2017). En la Figura 9 se observa un ejemplo de un tren propulsor, obtenido del catálogo de Rolls-Royce.

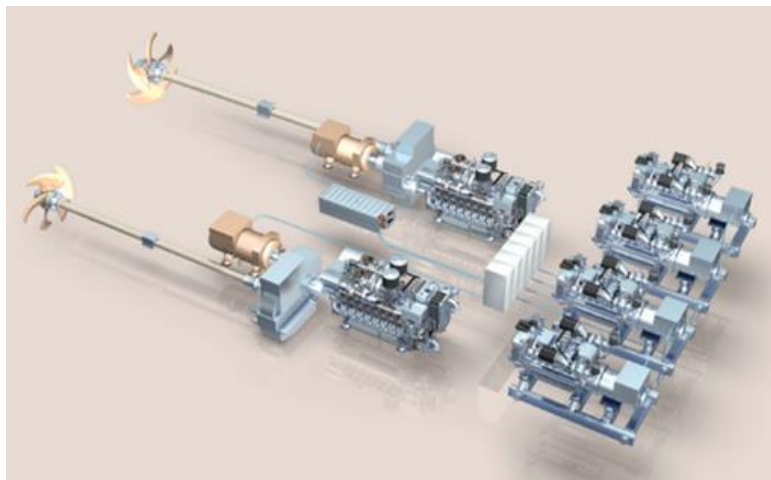


Figura 9. Arreglo de un tren propulsor

Fuente: Obtenido del catálogo de Rolls-Royce, 2019.

En la Tabla 5 se observa la clasificación de motores diésel según su velocidad (rpm) y en la Tabla 6 el tipo de motor principal que suelen tener los buques según una clasificación de la *EMEP/EEA*.

Tabla 5.

Clasificación de motores diésel según su velocidad (rpm)

Tipo de motor diésel	Velocidad (rpm)
Alta velocidad (<i>High Speed Diesel</i> , HSD)	n>900
Media velocidad (<i>Medium Speed Diesel</i> , MSD)	300<n<900
Baja Velocidad (<i>Slow Speed Diesel</i> , SSD)	n<300

Fuente: EMEP/EEA,2019

Tabla 6.

Tipo de motor principal según tipo de buque

Tipo de buque	Tipo de motor principal
Tanque	SSD
Granelero	SSD
Carga general	SSD
RO-RO	MSD
Porta Contenedores	SSD
Remolcador	MSD
Otros buques mercantes	MSD

Fuente: ENTEC, 2010.

En cuanto a los motores auxiliares, son principalmente motores tipo MSD y HSD. La mayoría son de cuatro tiempos que operan a velocidades comprendidas entre 500-2,500 rpm (Cooper & Gustafsson, 2004). También CARB, a partir de un estudio realizado sobre un total de 761 buques que operaron en los puertos de California durante el año 2006, reportó que, del total de los motores auxiliares analizados, un 98% era motor diésel y que un 99% de éstos eran MSD o HSD (CARB, 2007).

6.3.2 Estrategias ambientales para la minimización y control de la contaminación en puerto

Los puertos marítimos son interfaces entre los distintos modos de transporte y son centros de transporte combinado. Son áreas multifuncionales comerciales e industriales en donde las mercancías no sólo están en tránsito, también son manipuladas, manufacturadas y distribuidas. Por este motivo, deben de funcionar adecuadamente, ser integrados en la cadena logística global. Un puerto incluye, actividades tales como aduanas, servicios de control de carga y pasajeros, actividad de trasbordo y manipulación de la mercancía, servicios propios del buque, etc. (UNCTAD, 2022).

Las emisiones generadas por la operación de un recinto portuario afectan la calidad del aire a la que están expuestos trabajadores y habitantes de las zonas aledañas, representando un problema ambiental, debido a que hoy en día, no se cuenta con regulaciones suficientes que ayuden a minimizar, prevenir y controlar la contaminación generada en cada una de las actividades que incorporan su logística operativa. La creciente conciencia de la necesidad del cuidado del medio ambiente, la operación sostenible y justicia ambiental, ha encaminado a muchos puertos en todo el mundo a considerar la transición hacia una economía más circular. Como parte de esta transición los puertos están analizando diferentes estrategias ambientales sobre cómo utilizar equipos de manejo de carga con diferentes tecnologías para reducir la huella ambiental. (Xinglu, et al., 2018).

Actualmente, existen y se están desarrollando tecnologías modernas de cero emisiones, tanto automatizadas como tripuladas, que pueden funcionar con baterías, celdas de combustible, combustibles alternativos (gas natural licuado e hidrógeno). Se busca que se reduzcan o eliminen los equipos de motor diésel en los puertos y se proporcionen beneficios para la población que trabaja y vive ahí. Para llevar a cabo el proceso de reducción de emisiones, se podría realizar un conjunto de técnicas por separado o como un concepto complejo, que incluye uso de tecnologías de reducción de emisiones, combustibles alternativos y estrategias de ahorro de combustible, entre otras. El autor (Chul-hwan, 2010), explica que las opciones de control de emisiones generalmente se pueden clasificar en tres categorías:

Estrategias tecnológicas: Están generalmente más enfocadas en las emisiones de NOx y SO₂, ya que son los únicos contaminantes del aire que están regulados internacionalmente. Las reducciones de NOx, se pueden lograr mediante mejoras al motor, al proceso de combustión y recirculación de gases de escape. Así mismo, se puede obtener mediante el uso de postratamientos de las emisiones, como el SCR. Por otro lado, la reducción de los SO₂, consisten principalmente en cambiar a combustibles marinos con menos azufre y el uso de lavadores o depuradores con agua de mar. Además, existe una alternativa que es para ambos contaminantes que es el uso de la energía eléctrica en tierra.

Estrategias operativas: Se relacionan con los cambios en la logística del puerto al modificar la forma en que operan las embarcaciones al arribar y zarpar, como la reducción de su velocidad. Asimismo, se refieren a reducir los tiempos de operación de las diferentes cesionarias para minimizar las emisiones generadas por sus diferentes equipos y maquinaria.

Estrategias basadas en el mercado: Son las que involucran políticas para abordar los impactos ambientales como los programas de reducción de emisiones, incentivos de mercado e imposición de tarifas, los cuales se adaptan a las características y necesidades del recinto portuario.

Existen distintas estrategias tecnológicas utilizadas por embarcaciones mercantes y aunque no todos reducen los mismos contaminantes, algunas se adaptan más a los gases tipo NO_x, SO₂, CO, partículas, entre otros. Las tecnologías de control de emisiones son parte fundamental de los procesos de combustión, por la necesidad de mitigar los impactos a la atmósfera. En la Tabla 7, se muestran los equipos de control sugeridos para las embarcaciones mercantes en la última guía publicada por la EEA del año 2021.

Tabla 7.

Sistemas de control de emisiones

Sistema de control de emisiones	Tipo de combustible	Contaminantes
Depurador húmedo (<i>Lavador de gases</i>)	Bunker Fuel Oil	NO _x , SO ₂ , NMVOC y PM
	MDO/MGO	No es significativo
Reducción Catalítica Selectiva (SCR)	Bunker Fuel Oil	NO _x , SO ₂ , NMVOC y PM
	MDO/MGO	NO _x , SO ₂ , NMVOC y PM
Catalizador de oxidación diésel (DOC)	Bunker Fuel Oil	CO, NO _x , NMVOC y PM
	MDO/MGO	CO, NO _x y NMVOC
Filtro de partículas diésel (DPF)	Bunker Fuel Oil	No es significativo
	MDO/MGO	PM
SCR + Depurador	Bunker Fuel Oil	NO _x , SO ₂ , NMVOC y PM
	MDO/MGO	No es significativo
SCR + Filtro de partículas diésel	Bunker Fuel Oil	No es significativo
	MDO/MGO	NO _x , NMVOC y PM
Catalizador de oxidación diésel + Depurador	Bunker Fuel Oil	CO, NO _x , SO ₂ , NMVOC y PM
	MDO/MGO	No es significativo

*Bunker Fuel Oil: Combustible residual

*MDO: Combustible Diésel Marino

*MGO: Combustible Gas Marino

Fuente: Adaptada de (Fontelle et al., 2021)

Aunque se considera que los buques son medios de transporte respetuosos con el medio ambiente comparados con vehículos de uso diario, maquinaria pesada, entre otros, también generan cantidades importantes de emisiones de gases contaminantes, impactando en la

calidad del aire y la salud pública. Aunado a lo anterior, se espera que las emisiones del sector sigan creciendo con rapidez a medida que la economía mundial se expande y el comercio internacional cada vez toma más relevancia. Es por esto que los recintos portuarios y las compañías navieras del mundo deben de considerar una política ambiental en sus actividades comerciales, pero también es prioritario para el gobierno implementar medidas más estrictas con el fin de lograr una reducción de la contaminación.

6.4 Metodologías para estimar emisiones en puerto

Los inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos relacionados con las actividades portuarias son la base para crear distintas mediciones de emisión, pronósticos y planes de acción. Estos pueden elaborarse con diferentes niveles de detalle según los datos con los que se cuentan, y según el propósito, los recursos y el tiempo que se tiene para llevar a cabo el trabajo. Los datos son uno de los elementos más importantes y pueden estar en diferentes formatos y provenir de distintas fuentes. Algunos son confidenciales y otros se publican en los sitios web oficiales de las autoridades portuarias, pero es importante entender todo elemento informativo y la incertidumbre de ellos y su relación. En caso de que un puerto no tenga datos específicos de sus operaciones puede recurrir a información de otro recinto portuario que realice actividades similares, que cuente con los mismos equipos, que arriben los mismos buques, etc. Asimismo, puede consultar guías y manuales elaborados por autoridades marítimas y medioambientales que cuentan con datos de potencias de motores, factores de emisión, horas promedio de uso, entre otros (GIOMEEP & IMO, 2018).

Por otro lado, las metodologías empleadas para calcular el nivel de actividad, los consumos energéticos, los factores de emisión y las emisiones de contaminantes atmosféricos son importantes, ya que la complejidad y especificidad de estas abarcan desde ecuaciones simples, hasta detalladas de los motores utilizados y los tipos de actividades. Hoy en día existen distintas metodologías, como la guía 1, 2 y 3 denominada “Herramientas para las emisiones portuarias” de la OMI, también está la guía elaborada por el puerto de Los Ángeles y Long Beach “*San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology*”, la metodología presentada por la Agencia de Protección al Ambiente de Suecia llamada “*Methodology for calculation emissions from ship*”, el manual elaborado por la agencia ENTEC del reino Unido denominado “*UK Ship Emissions Inventory*”, el documento realizado por California Air Resources Board, que lleva por nombre “*Cargo Handling Equipment Emissions Inventory*”, documento el creado por la Agencia de Protección Ambiental de los

Estados Unidos, llamado “*Methologies for estimating port-related and goods movement mobile source emissions inventories*” y el manual elaborado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, denominado “*EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*”.

6.4.1 Estimación de emisiones de buques mercantes

Para comenzar con la estimación de emisiones de los buques, primero se debe saber, qué datos disponibles se tienen y con base en eso se elige la metodología, por ejemplo, en la Figura 10, se muestra un diagrama presentado en el manual de la EMEP/EEA. El cual según la información con la que se cuente, es la manera en cómo se llevaran los cálculos.

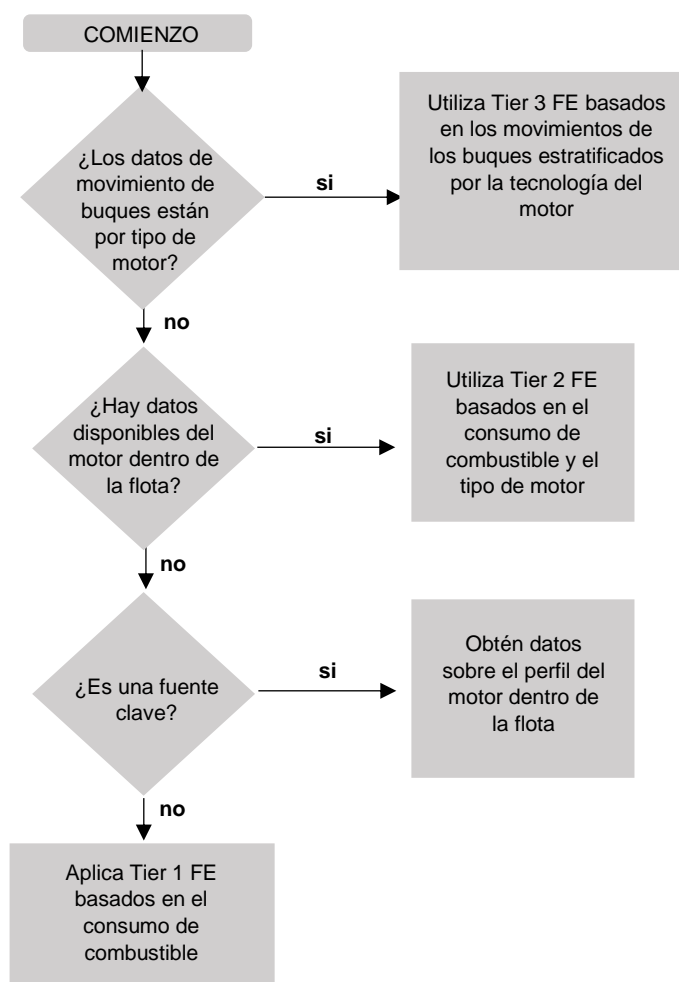


Figura 10. Tren de toma de decisiones

Fuente: Adaptada de EMEP/EEA (2021).

En el caso de este trabajo de investigación se escogió la metodología de Tier 3 mediante el método de bottom-up, esto debido a que los datos disponibles son por parte de la Administración del Sistema Portuario Nacional de Veracruz (ASIPONA). Para esta,

metodología es necesario tener información detallada sobre el movimiento de los buques, así como información técnica (tamaño de los motores, potencia, combustible, horas en diferentes actividades). A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas de la guía del EMEP/EEA (2021) con sus respectivas variables.

$$E_{\text{fase de viaje}} = E_{\text{hotelling}} + E_{\text{maniobra}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$E_{\text{viaje},i,j,m} = \sum_p [T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times FE_{e,i,j,m,p})] \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

E= Emisión (g/s)

FE= Factor de emisión (g/kWh),

LF = Factor de carga del motor (%)

P = Potencia del motor (kW)

T= Tiempo (horas)

e = categoría del motor (principal o auxiliar)

i = contaminantes

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

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

p = fase de viaje (estadía y maniobras)

Con respecto a los valores de los factores de emisión y factor de carga se obtienen de las diferentes tablas que trae el documento técnico, en cuanto al tipo de motor están en la Tabla 5 presentada anteriormente. En cuanto a la obtención de la potencia del motor principal y el auxiliar, se tienen que hacer cálculos en donde involucra el valor del GT, un valor adimensional que representa, el volumen del buque, dichos valores se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Datos para la obtención de las potencias de los motores

Tipo de buque	2010 Flota mundial	2010 Flota mundial
	Potencia MP	Potencia MA
Fluidos e Hidrocarburos	$14.755 * GT^{0.6082}$	0.30
Granelero	$35.912 * GT^{0.5276}$	0.30
Portacontenedores	$2.9165 * GT^{0.8719}$	0.25
Carga General	$5.56482 * GT^{0.7425}$	0.23
Ro-Ro	$164.578 * GT^{0.4350}$	0.24
Pasajeros	$9.55078 * GT^{0.7570}$	0.16
Pesca	$9.75891 * GT^{0.7527}$	0.39
Otros	$59.049 * GT^{0.5485}$	0.35
Remolcadores	$54.2171 * GT^{0.6420}$	0.10

Fuente: Adaptada de EMEP/EEA (2021)

Asimismo, es necesario utilizar los valores de carga MCR, del motor principal y auxiliar según la actividad que se estaba realizando, ya sea maniobra o estadía, dichos datos se encuentran en la tabla 3-20 del documento técnico.

6.4.1.1 Estimación de las concentraciones de los buques mercantes

La modelación de la dispersión de contaminantes provenientes de las distintas fuentes fijas presentes en un recinto portuario es una herramienta utilizada en la realización de estudios de calidad del aire y permite evaluar los cambios y desarrollos tecnológicos e implementar estrategias ambientales para minimizar, prevenir y controlar la contaminación atmosférica. Para simular y comprender las concentraciones de las emisiones atmosféricas de las fuentes fijas, se han creado diferentes modelos como: modelo gaussiano, euleriano, receptor, de caja, lagrangiano, estadísticos, entre otros (Méndez E. y Guevara L., 2022). Con respecto, a los modelos gaussianos, describen la dispersión en el eje horizontal y vertical con una distribución normal o de gauss que depende de los coeficientes de

dispersión, los cuales se establecen de acuerdo con la estabilidad atmosférica (A, B, C, D, E y F) presente en el momento del análisis (Fernández, 2012).

El modelo utilizado en este trabajo fue el de Screen View, el cual es un programa abierto denominado “*Lakes Environment*” basado en el modelo de la “*USEPA SCREEN3*”. Es una herramienta de modelación gaussiana unifuentes utilizada y aplicada para el análisis de dispersión de contaminantes (Lakes Environment, 2021). Este, es útil para obtener resultados iniciales o preliminares, además, parte de condiciones de emisión de la fuente fija y de las características meteorológicas y topográficas de la zona. El procesamiento de los datos estima que los contaminantes primarios dispersados tienen la forma de una campana de gauss. Sin embargo, esta distribución depende de los coeficientes de dispersión, los cuales se obtienen de las condiciones meteorológicas y de terreno. Además, el programa no considera reacciones, ni procesos de remoción y las concentraciones se van calculando respecto a la distancia de la fuente emisora. Así mismo, se estima la concentración en estado estable, es decir, que no existe cambio de la concentración respecto al tiempo, en un punto (x, y y z) vientos debajo de la fuente (Méndez E. y Guevara L., 2022).

6.4.2 Cálculo de emisiones de equipos de manejo de carga

La categoría de CHE incluye maquinaria que transporta carga, incluidos contenedores, carga general y carga a granel, desde buques hacia ferrocarriles, camiones y bodegas y viceversa. Las máquinas se operan comúnmente en terminales marítimas o en patios ferroviarios y no en carreteras públicas. Utilizan comúnmente combustible diésel, gasolina, propano, gas natural licuado y electricidad. Como consecuencia de la amplia y diversa carga que se maneja en los recintos portuarios, hay diferentes tipos de equipos. La mayoría se clasifican de la siguiente manera: vehículos, carretilla elevadora, grúa pórtico, grúas RTG, tractor de patio, montacargas, manipuladores, empujadores de rieles, entre otros.

Para comenzar con el cálculo de las emisiones, es necesario contar con información específica de la maquinaria como es: tipo de equipo, número de identificación del equipo, marca y modelo, marca y modelo del motor, potencia nominal, tipo de combustible utilizado, horas anuales de funcionamiento, tecnologías de reducción instaladas, equipo adquirido o retirado. Una vez que se cuenta con la información mencionada anteriormente, se comienza con los cálculos, en este trabajo se utilizó, la metodología creada por CARB, que lleva por nombre “*Cargo Handling Equipment Emissions Inventory*”. Y la ecuación principal es la siguiente:

$$E = P * A * FC * FE * FCC * FC \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

E= Emisión en g/año

P= Potencia máxima del motor en hp o kW

A= Actividad del motor del equipo en hr/año

FC= Factor de carga (valor promedio durante las operaciones normales comparado con el valor de la potencia máxima), adimensional

FE= Factor de emisión, en g/hp-hr o g/kW-hr

FCC= Factor de corrección de combustible, asociado al tipo de combustible usado para los motores diésel, es decir de ultra bajo contenido de azufre, bajo o alto.

FC= Factor de control, utilizado cuando se sabe que cuentan con sistemas de control de emisiones.

El factor de emisión depende de la tasa de emisión de hora cero por tipo de combustible (diésel, propano o gas natural licuado), por tipo de motor, año del modelo, tasa de deterioro y horas acumuladas de trabajo de la maquinaria desde su primer día de uso, hasta el momento en el que se hace el cálculo. La tasa de deterioro refleja el hecho de que las tasas de emisión van a cambiar dependiendo el desgaste de varias partes del motor del equipo, por otro lado, las horas acumuladas reflejan las horas totales de funcionamiento, lo cual también puede representar una baja eficiencia en la operación, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$FE = HZ + (TD * \text{Horas Acumuladas})$$

Donde:

FE= Factor de emisión, en g/hp-hr o g/kW-hr

HZ = Hora cero, dada para una potencia, modelo y año del equipo, en g/hp-hr o g/kW-hr

TD= Tasa de deterioro, en g/hp-hr² o g/kW-hr²

Horas acumuladas= Número de horas que el motor del equipo ha operado.

Con respecto a los valores del factor de carga, se encuentran en la Tabla 4.1 del documento mencionado, así como el factor de corrección de combustible en la Tabla 4.2, los valores de los equipos de control en la Tabla 4.4 y los datos de HZ y TD en el apéndice A.

6.5 Método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Evaluar alternativas es algo que realizamos de manera cotidiana, que en ocasiones puede generar un problema, debido a que existen criterios, influencias, patrones, entre otros, que determinan prioridades cuando se quiere encontrar una solución. Del mismo modo, sucede cuando se elige una estrategia de gestión en el sector industrial ya que integra diferentes variables y la participación de distintos actores. Cuando se afronta el proceso de toma de decisiones o selección de alternativas, comúnmente se tienen varios objetivos, que se contraponen entre ellos, lo que ocasiona que el proceso sea complejo y se necesite de una herramienta o un método que permita comparar esos múltiples criterios contra las diversas alternativas posibles (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008).

El análisis de decisiones multicriterio es el proceso de la identificación y selección de alternativas basadas en los valores del interesado o equipo de personas que toman la decisión, dicha herramienta logra reducir la subjetividad en la toma de decisiones mediante la generación de una serie de filtros de selección y permite la elección entre alternativas complejas (Muñoz y Romana, 2016). Los métodos multicriterio pueden ser usados en diversas áreas de aplicación como, localización de empresas, selección de maquinaria, predicciones financieras, programas informáticos, selección de estrategias aplicables a la industria, entre otros. Las principales diferencias entre estos están relacionadas con el nivel de complejidad de los algoritmos, los métodos de ponderación, la forma de representar los criterios de evaluación, los datos y el tipo de agregación de datos. Y se dividen en dos grandes categorías de agregación: total y parcial.

Los métodos de agregación total toman en cuenta tanto el peso o importancia que el decisor atribuye a los diferentes criterios como las valoraciones que el analista da a cada solución en función de los criterios, el más utilizado es el llamado "Pattern", seguido del denominado media ponderada ordenada. Por otro lado, el parcial se enfoca en la comparación de todas las alternativas 2 a 2 de forma ordenada ($a-b \neq b-a$) y se obtiene una síntesis de conjunto sobre un grafo, el más utilizado es el método de Electre I y el AHP (Zopounidis, et al., 2002).

En el caso particular de esta investigación, se seleccionó el proceso de jerarquía analítica (AHP), el cual fue desarrollado por Thomas Saaty entre 1971 y 1975, para resolver el

tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la Antigua URSS (Saaty, 1980). Esta se basa en la comparación por pares de elementos, con lo cual, también permite valorar diferentes alternativas, deja establecer por comparaciones pareadas la importancia relativa de cada criterio respecto a los demás y establecer prioridades de los elementos en cada nivel, asignándoles un valor de acuerdo con la escala de comparación de Saaty (Toskano Hurtado, 2018), el AHP utiliza una escala con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos, la cual se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9.

Escala de Saaty

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuerte y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderada y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igual y moderadamente preferible	2
Igualmente, preferible	1

Fuente: Elaboración propia adaptada de (Saaty, 1980)

El primer paso del método AHP, consiste en identificar el problema, es decir, la situación que se desea resolver a través la selección de las alternativas, las cuales serán comparadas unas con otras mediante la evaluación de criterios establecidos que permiten saber los pros y los contras incorporados en cada una de ellas. Posteriormente, se define el objetivo, el cual está en un nivel independiente y los otros elementos de la jerarquía serán los criterios, subcriterios y alternativas. Este puede ser de largo, mediano y corto plazo, lo cual influye en la construcción del modelo (Toskano Hurtado, 2018). Seguido, se establecen los criterios, los cuales afectan significativamente a los objetivos y deben incluir aspectos cuantitativos y cualitativos. El siguiente paso, es la identificación de las alternativas, es decir, propuestas factibles mediante las cuales se alcanzará el objetivo general. Una vez que ya se llevó a cabo esa selección se realiza un árbol de jerarquías como el que se muestra en la siguiente Figura 11.

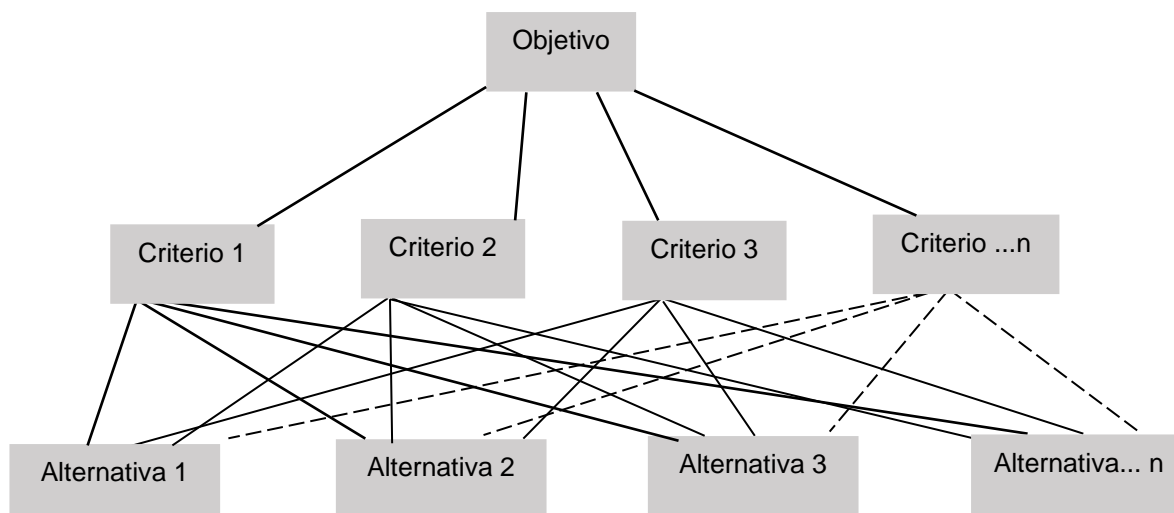


Figura 11. Árbol de jerarquías

Fuente: Elaboración propia, adaptada de (Ishizaka & Nemery, 2013)

Después, se elabora un modelo jerárquico con base en matrices de comparación de elementos y el uso de álgebra matricial. Una vez construida la estructura jerárquica del problema se prosigue a la valoración de los elementos, para lo cual, el decisor lleva a cabo la evaluación de los criterios a través de comparaciones pareadas y asigna un valor a las diferentes alternativas respecto a cada criterio, con los datos presentados en la tabla 8 (Ishizaka & Nemery, 2013). Esta herramienta permite realizar estas comparaciones basándose tanto en datos cuantitativos como cualitativos y el decisor puede externar sus preferencias entre dos elementos. Una vez concluidas las comparaciones se obtiene el resultado final, basado en las prioridades, en juicios y evaluaciones, realizadas por los expertos en el tema.

VII. Área de estudio

La vocación del Puerto de Veracruz, desde su origen histórico, ha sido comercial, siendo actualmente el puerto dentro del SPN que presenta mayor pluralidad de tipos de carga y que mantiene una importante participación en todos ellos (APIVER, 2017). Desde sus inicios de operación, el Recinto Portuario se ha consolidado en los flujos comerciales de la Ciudad de México y sus alrededores, siendo hoy en día el principal abastecedor de servicios y de bienes intermedios y de consumo para la zona centro del país. Es considerado como el principal puerto comercial del país, debido a que maneja la mayor diversidad de mercancías, variedad de cargas, mayor gama de embarcaciones, más variedad de servicios portuarios y modos de transporte (SCT, 2019). Hoy en día, cuenta con 22 posiciones de

atraque destinadas a manejo de carga, así como, dispone de 66 km de vías férreas de uso común utilizados por las empresas privadas concesionadas actualmente que son Ferrocarril del Sureste, S.A. de C.V. y Kansas City Southern de México S.A. de C.V., también se encuentran operando 24 cesionarias que manejan distintos tipos de carga.

Las 7 líneas de negocio que atiende el Puerto de Veracruz, descritas en su plan maestro (ASIPONA, 2022) son las siguientes:

Contenedores: Es el principal segmento de negocio del puerto por su tráfico, el cual en el año 2021 un movimiento de carga de 11.16 millones de toneladas. Esto ubica al puerto de Veracruz en el segundo lugar a nivel nacional. Las principales mercancías transportadas en este rubro son: productos de consumo básicos, de la industria automotriz e insumos de la industria limpia, cuyos principales orígenes y destinos son la zona centro de México.

Granel agrícola: Representa el segundo segmento de negocios del puerto, con un volumen de carga de 7.1 millones de toneladas en el año 2021, lo ubica en el primer lugar a nivel nacional. Los productos que conforman esta carga son de origen agrícola, siendo los más importantes el maíz, el trigo, la soya y la semilla de canola.

Granel mineral: En este sector de negocio el Puerto de Veracruz es netamente importador. En el año 2021 el volumen de carga manipulado fue de 3.85 millones de toneladas. Este mercado lo conforman tres grandes grupos de productos: el primero lo conforma la chatarra, la briqueta, el arrabio y otros materiales para la fundición; el segundo, el fertilizante y otros productos relacionados; y el tercero el pet-coke.

Carga general: En esta línea de negocio en el año 2021 se manipularon 3.3 millones de toneladas. La relación de importación y exportación en este sector está muy equilibrada, con un 54% y 46% respectivamente. Los productos más significativos operados en este rubro son: acero, tanto de importación como de exportación, así como tubería para la industria petrolera y maquinaria.

Carga rodada: Este segmento se transporta en buques especializados tipo RO-RO, en el año 2021 se manipularon 1.36 millones de toneladas, lo equivalente a 823,701 unidades. Las empresas que transfieren este tipo de carga para su importación son de Europa y su distribución es a nivel nacional, en cuanto a la carga de exportación, este tráfico se realiza hacia Estados Unidos, Centro y Sudamérica.

Fluidos e hidrocarburos: Esta área la conforman diferentes productos de origen vegetal, productos químicos, siendo los aceites vegetales los más significativos, así como diésel, gasolina magna, entre otros. La carga total manipulada en el año 2021 fue de 3.37 millones de toneladas.

Debido al alto tráfico marítimo que ha tenido el Puerto de Veracruz en los últimos años, se generaba congestión en el movimiento de embarcaciones y carga, dando lugar a niveles altos de ocupación en muelles, a tiempos de espera prolongados, reduciendo la eficiencia, eficacia y competitividad, desde el año 2014 se inició el proyecto de ampliación, el cual se ubica en la zona de la bahía norte, permitiendo el acceso de un mayor número de embarcaciones y de dimensiones más grandes.

El proyecto se dividió en dos fases: la primera entre los años 2014-2018 y la segunda entre 2019-2030. Actualmente, ya hay 3 cesionarias que operan ahí, ICAVE (contenedores), IENOVA (productos refinados) y grupo Gramosa (granel mineral y agrícola) (APIVER, 2022). Una vez que se concluya la ampliación estará organizada como se aprecia en la Figura 12.

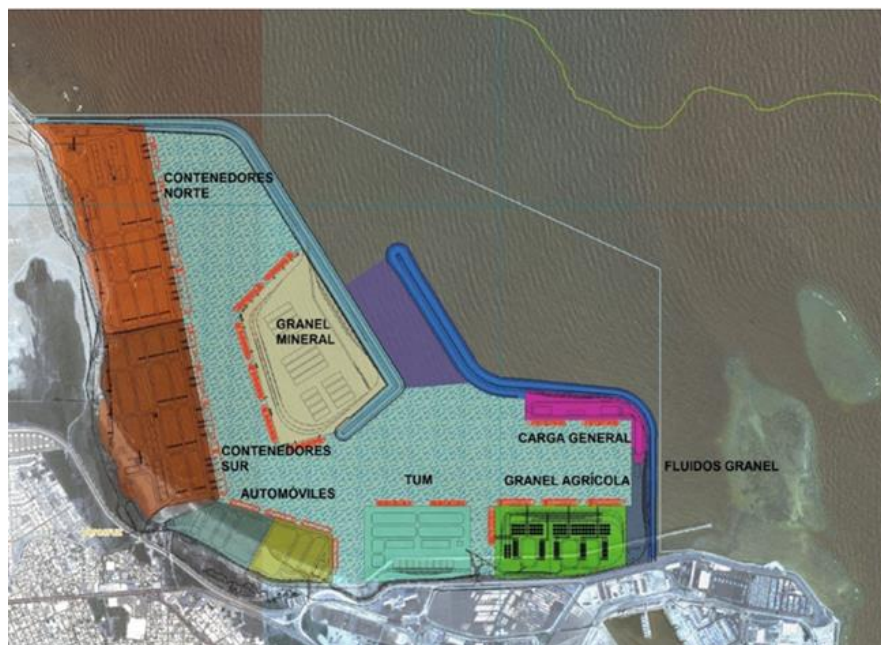


Figura 12. Ampliación Bahía Norte

Fuente: Manifestación de Impacto Ambiental (2012).

El puerto de Veracruz, al ser un recinto muy activo, debe de contar con la maquinaria necesaria para poder realizar las actividades de manipulación de mercancías de manera eficiente y segura, cuenta con los siguientes equipos: 65 almejas, 9 bandas transportadoras fijas, una barredora, 22 básculas, 2 camiones, 53 camioneta, 18 cargadores frontales, 52 grúas de más de 15 toneladas, 41 grúas de menos de 15 toneladas, 5 grúas de pórtico de muelle, 33 grúas de patio, 4 grúas Gottwald, 9 lanchas, 158 montacargas, 112 plataformas, 4 remolcadores de más de 4,000 HP, 2 torres móviles, 55 tolvas, 2 trackmóvil, 72 tractocamiones, 16 trascabo, 6 tractores ferroviarios y 42 spreaders (Tami, 2013), (ASIPONA, 2022).

Con respecto a su ubicación geográfica, está en la llanura costera, presenta climas cálidos húmedos y subhúmedos y la temperatura media anual varía entre 25.3 y 25.5°C. En la época más calurosa del año hay temperaturas medias mensuales máximas de entre 27.9 y 28.1°C, en la cual se tiene cielo despejado con casi ausencia de lluvias, debido a la presencia de aire cálido y una mejor afectación de las masas de aire y frentes fríos. La velocidad de los vientos con mayor dominio es en dirección norte con velocidades de 15.55 nudos, del NE entre 7.77 y 15.55 nudos, del E de 3.88 a 15.55 nudos y del NW de 7.77 a más de 15.55 nudos. Debido a su ubicación, durante el invierno el Golfo de México es influenciado por las masas de aire frío y seco que provienen del continente las cuales al encontrarse con las masas de aire de origen marítimo y tropical, provocan frentes fríos principalmente de octubre a abril (SEMAR, 2015).

Es importante mencionar, que anteriormente se han realizado diferentes estudios en la zona de estudio, así como en los sistemas portuarios de México, por parte de la sección de contaminación ambiental del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, los cuales se muestran en la Tabla 10. Abarcando temas de inventarios de emisiones, análisis de riesgo por el almacenamiento de materiales peligrosos, prevención del deterioro por las emisiones de SO₂, riesgos químicos, impactos en la calidad del aire, entre otros.

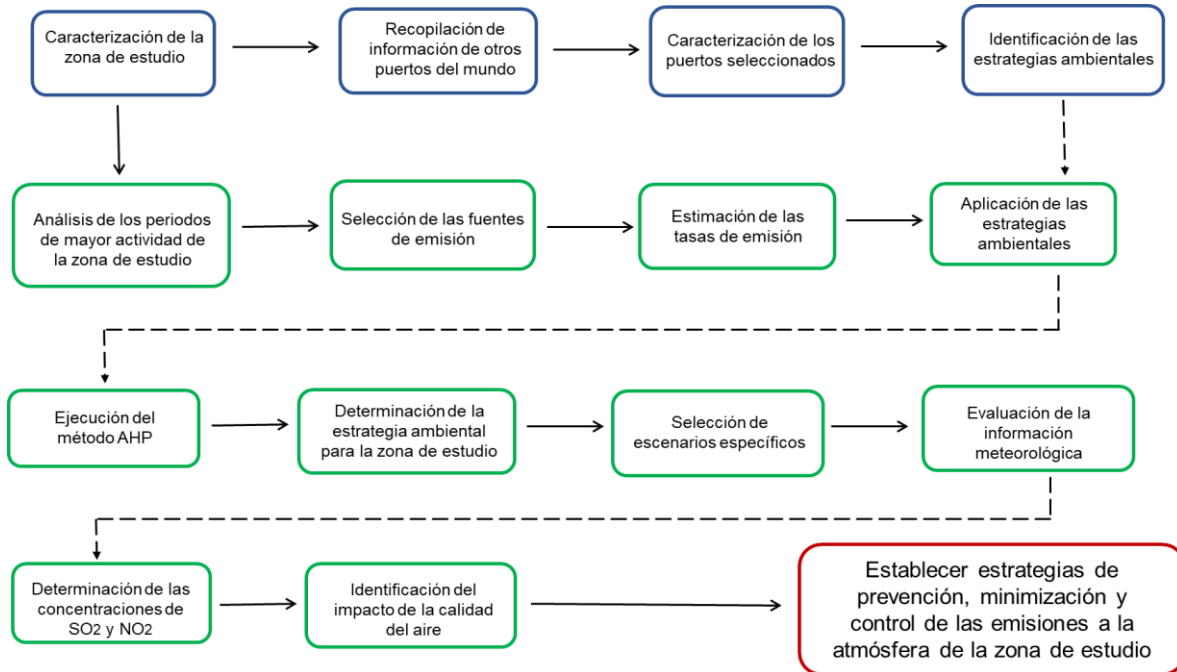
Tabla 10.

Estudios realizados por la sección de contaminación ambiental

Trabajo	Título	Referencia
Tesis de Maestría	Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México	(Tami, 2013)
Tesis de Licenciatura	Importancia y aplicación de factores de emisión para las actividades desarrolladas en un recinto portuario	(Nazario, 2014)
Tesis de Licenciatura	Análisis de riesgo en las áreas de almacenamiento para combustibles en el recinto portuario de Veracruz	(Salgado, 2015)
Tesis de Licenciatura	Estimación de emisiones de partículas por manejo de granel en recintos portuarios. Caso de estudio: recinto portuario de Veracruz	(Rojas, 2016)
Tesis de 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 de Maestría	Prevención del deterioro significativo por bióxido de azufre por la operación del recinto portuario de Veracruz	(Zamora, 2019)
Tesis de Maestría	Evaluación del impacto potencial de la calidad del aire por partículas debido a la operación del recinto portuario de Veracruz	(Antonio, 2019)
Tesis de Maestría	Riesgos químicos por manejo de combustibles asociados a fenómenos hidrometeorológicos en el recinto portuario de Veracruz	(Lara, 2020)
Tesis de Maestría	Evaluación del impacto de la calidad del aire por la ampliación del recinto portuario de Veracruz, a partir del monitoreo de dióxido de azufre y partículas	(Cortez, 2022)
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, México	(Fuentes et al., 2022a)
Artículo	Sea Port SO ₂ Atmospheric Emissions Influence on Air Quality and Exposure at Veracruz, Mexico	(Fuentes et al., 2022b)
Artículo	Air Quality and Atmospheric Emissions from the Operation of the Main Mexican Port in the Gulf of Mexico from 2019 to 2020	(González et al., 2023)

VIII. Metodología

En la Figura 13 se ilustran las diferentes etapas que se desarrollaron en este trabajo.



- *Color azul: Primera etapa
- *Color verde: Segunda etapa
- *Color rojo: Objetivo final

Figura 13. Diagrama general de la metodología empleada

A continuación, se indican los materiales y métodos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo, iniciando con la caracterización de la zona de estudio, recopilación de la información de los puertos, así como su caracterización, identificación de sus estrategias ambientales, selección de fuentes fijas y móviles para hacer la estimación de emisiones, ejecución del modelo AHP, selección de escenarios específicos, evaluación de la información meteorológica de la estación de monitoreo, seguido de la determinación de las concentraciones y finalizando con la implementación de estrategias de prevención, minimización y control.

8.1 Caracterización de la zona de estudio

En esta etapa del trabajo, se realizó una recopilación literaria del recinto portuario de Veracruz, se utilizó información proporcionada por la ASIPONA, documentos anuales emitidos por la Secretaría de Comunicación y Transporte, los últimos dos planes maestros realizados por las autoridades portuarias, documentación de la SEMAR e información y estadísticas del sitio oficial de ASIPONA de los movimientos de los buques mercantes tanto

mensuales como anuales. Además, se llevó a cabo una revisión del área geográfica que abarca el puerto, es decir cuántas bahías hay, el número de muelles y su vocación, canal de acceso, dimensiones de las dársenas y vías de navegación. Por otro lado, se encontró el tipo de buques que arriban, tanto por sus dimensiones como por su tipo de carga, país de origen, y al muelle que arribaron. Posteriormente, se buscó información de la bahía norte para conocer el avance de la ampliación del puerto y conocer qué cesionarias se encuentran operando en la bahía sur y cuáles, en la bahía norte, qué tipo de carga y materiales manejan estos sectores y en dónde lo almacenan y de qué forma.

Después, se evaluó en que meses del año hay mayor movimiento de embarcaciones con base en el número de arribos, y el tiempo que permanecen en puerto realizando sus maniobras de carga y descarga de mercancías, del periodo del año 2018 al 2022, con el objetivo de seleccionar los meses más representativos. Asimismo, se analizó la información de las dimensiones de las embarcaciones, ya que entre más voluminosas sean, operan con motores de mayores dimensiones, los cuales demandan altos consumos de combustible y generan más emisiones. Por último, se analizó el total de arribos y de horas por buque con el fin de seleccionar 2 como fuentes fijas.

8.2 Caracterización de otros puertos del mundo

Se buscó información de diferentes puertos en el mundo y se seleccionaron únicamente siete, los cuales contarán con el certificado de “Puerto Verde”. Se estableció que fueran únicamente aquellos que pertenecen a Estados Unidos de América, Europa, Canadá y México. Una vez que se definieron los puertos a estudiar, se recabó información sobre el tipo de buques que arriban, tipo de carga transportada y manipulada, número de toneladas anuales, número de muelles en puerto, número de terminales y las dimensiones del puerto.

Después se investigó su situación ambiental, es decir bajo qué criterios o circunstancias obtuvieron su certificado verde, cuáles son las estrategias verdes que ellos utilizan, el tipo de maquinaria, si operan con motores diésel o energía eléctrica, si cuentan con uso de energías renovables, entre otros además de conocer en qué área se enfocaban más, si en aire, agua, residuos o suelo, o en todas así como, la institución que les otorgo la certificación, ya que como se mencionó anteriormente cada una tiene distintos criterios. Por último, se seleccionaron las estrategias ambientales que más se adaptaron al Puerto de Veracruz, las cuales fueron aplicadas en la estimación de las emisiones de las fuentes que se seleccionaron.

8.3 Cálculo de las tasas de emisión con diferentes contenidos de azufre

Previo a la estimación se realizó un análisis del número de arribos a los diferentes muelles de la zona portuaria, abarcando desde el año 2018 al 2022, debido a que, se necesitó conocer la ubicación de las dos fuentes emisoras seleccionadas en el paso 1. Los cálculos de las emisiones de los buques se realizaron mediante el método bottom-up, esto debido al tipo de datos con los que se contó, así como con la metodología presentada por la EEA en su manual “EMEP/EEA 2021- guía para el inventario de emisión de contaminantes atmosféricos”, presentada en el capítulo 5.3.1 y con ayuda de las ecuaciones 1 y 2. La estimación se realizó para los siguientes contaminantes atmosféricos: CO, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y CO₂. Debido a las normas actuales establecidas por la OMI, se decidió realizar el análisis con diferentes porcentajes de azufre en el combustóleo (3.5%, 2.5%, 0.5% y 0.1%).

Por otra parte, se decidió que una vez que se encontraran los contaminantes que más se emiten en la zona de estudio, se seleccionaran los sistemas de control que ayudaran a disminuirlas, y se calcularon utilizando sistemas de control como: Lavador de gases tipo cerrado, SCR y la combinación de ambos.

8.4 Ejecución del análisis multicriterio (AHP)

Una vez que se obtuvieron los resultados de las emisiones con sus diferentes porcentajes de azufre en el combustible y con el uso de equipos de control, se decidió realizar un análisis multicriterio, que permitiera definir cuál estrategia ambiental sería la más conveniente para la zona de estudio. Lo primero fue definir el problema que hay en el recinto portuario, lo cual requirió de la realización de una lluvia de ideas y la selección final de un solo problema, seguido del objetivo del análisis, es decir, qué es lo que se quería encontrar con dicha metodología. Después, se seleccionaron diferentes criterios cuantitativos y alternativas, los cuales posteriormente se sometieron a una selección más específica para reducir el tamaño de las matrices y se pudieran realizar comparaciones pareadas lógicas.

Es importante mencionar que por la diversidad de las fuentes de emisión y del número de datos se debe sintetizar y concretar el análisis para una sola fuente fija, además de que se requiere información muy precisa para ejecutar el proceso matricial. Una vez que se realizaron todos los pasos explicados en el capítulo 5.4, se evalúa la mejor alternativa.

8.5 Selección de los escenarios específicos y la evaluación de la información meteorológica

Debido a que los resultados de las emisiones se obtuvieron únicamente para los barcos y se calcularon a una escala mensual durante el periodo 2018-2021, de todos los contaminantes mencionados en el paso 3, se decidió que se seleccionaran escenarios específicos en donde se consideraron también las grúas RTG y se determinara la emisión diaria de los contaminantes NO₂ y SO₂, de las fuentes emisoras, esto debido a que son los únicos que se encuentran regulados internacionalmente por la OMI.

Los escenarios se escogieron primeramente con base en los meses de mayor movimiento de buques, se seleccionaron los años en función de la información meteorológica disponible obtenida del proyecto UNAM-APIVER, y posteriormente, se estableció que se consideraran únicamente tres días por cada mes. Estos días se determinaron a partir de encontrar las mejores condiciones climatológicas, navegables, de operación, y del día que hubo mayor presencia de buques en el recinto portuario.

Primero se llevó a cabo una búsqueda de tablas de marea en donde se descartaron los días en los que se presentaron los fenómenos de bajamar y pleamar. Después, se estableció que se trabajara únicamente con los días en donde hubo presencia de vientos en calma <2 m/s. Posteriormente, con ayuda de las estadísticas del movimiento de buques de ASIPONA, se encontraron las fechas en las que hubo un mayor número de barcos operando. Simultáneamente se obtuvo información de las autoridades portuarias, sobre el horario en el que hay mayor actividad, para así definir un periodo de tiempo laboral (8 horas) de los días de estudio. Para finalizar, se escogieron los días que concordaban con todas las condiciones mencionadas y previo a continuar con la estimación de las concentraciones se analizó la meteorología de cada día elegido, encontrando las velocidades y direcciones de viento promedio, así como, la realización de las rosas de viento para cada escenario.

8.6 Determinación de las emisiones y concentraciones de SO₂ y NO₂ con el uso de sistemas de control

Con respecto al cálculo de las emisiones de las fuentes terrestres, únicamente se seleccionó un tipo de equipo de manejo de carga, esto debido a la falta de datos reales por parte de las cesionarias por lo que se decidió trabajar con las grúas RTG de la cesionaria de ICAVE ubicada en la Bahía Norte. La estimación se realizó con la metodología de CARB, que lleva por nombre “*Cargo Handling Equipment Emissions Inventory*”, con ayuda de las

ecuaciones explicadas en el capítulo 5.3.2. También se obtuvieron resultados haciendo uso de diferentes estrategias para minimizar y controlar la contaminación atmosférica, tanto por cambio de combustible como por el uso de equipos de control.

La estimación de las concentraciones de los gases contaminantes se ejecutó únicamente para los buques con sus respectivos criterios, es decir, a 3.5% de azufre utilizando un equipo de control y sin equipo de control usando un combustible de bajo contenido de azufre (0.5%), esto debido a la falta de información técnica específica de las grúas RTG. Con respecto al cálculo, se usó el modelo de dispersión *Screen View* de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, para poder ejecutar el programa se requieren datos de entrada de la fuente como: emisión (g/s), altura de la chimenea (m), diámetro interno de la chimenea (m), velocidad de los gases de escape (m/s), temperatura de salida de los gases (K) y la temperatura ambiente (K). Primero se recopiló la información propia de la fuente de planos de arreglo general y de memorias de cálculo, y por otro lado se buscó información de proveedores y fichas técnicas de los motores principales y auxiliares.

Por consiguiente, se trabajó con la información meteorológica, debido a que el modelo *Screen View* requiere valores de temperatura de aire ambiente y velocidad de viento de los días estudiados para definir la estabilidad atmosférica. Además, se encontraron las direcciones de viento con el objetivo de saber hacia dónde era la dispersión del contaminante y determinar las distancias de estudio. Así mismo, el programa te indica que establezcas a que nivel quieres calcular las concentraciones, en qué tipo de terreno y a que distancias, en este estudio se calcularon a nivel del suelo ($z=0$), por las características del recinto portuario y su infraestructura, se seleccionó un escenario de terreno simple, sin flujo descendente de algún edificio y se establecieron distancias concretas de no más de 5 km.

IX. Resultados y discusión

9.1 Evaluación de la zona de estudio

9.1.1 Identificación de los periodos de mayor actividad por arribo de buques

En la Figura 14, se muestra el número de arribos de los buques mercantes que hubo en la zona de estudio comprendidos en el periodo del 2018 al 2022. Por lo cual se identificó que los meses con mayor actividad portuaria son marzo, mayo, julio, octubre y diciembre. Sin embargo, como se estableció que únicamente se seleccionarían tres meses, se consideró realizar una evaluación por el número de horas que permanecen los buques atracados en el puerto y con esto, elegir los periodos de estudio. La cantidad de tiempo que los barcos permanecen en los muelles es un dato relevante, ya que representa la duración de sus operaciones de manipulación de carga, lo que conlleva a tener sus motores encendidos, es decir, emitiendo emisiones de gases hacia la atmosfera.

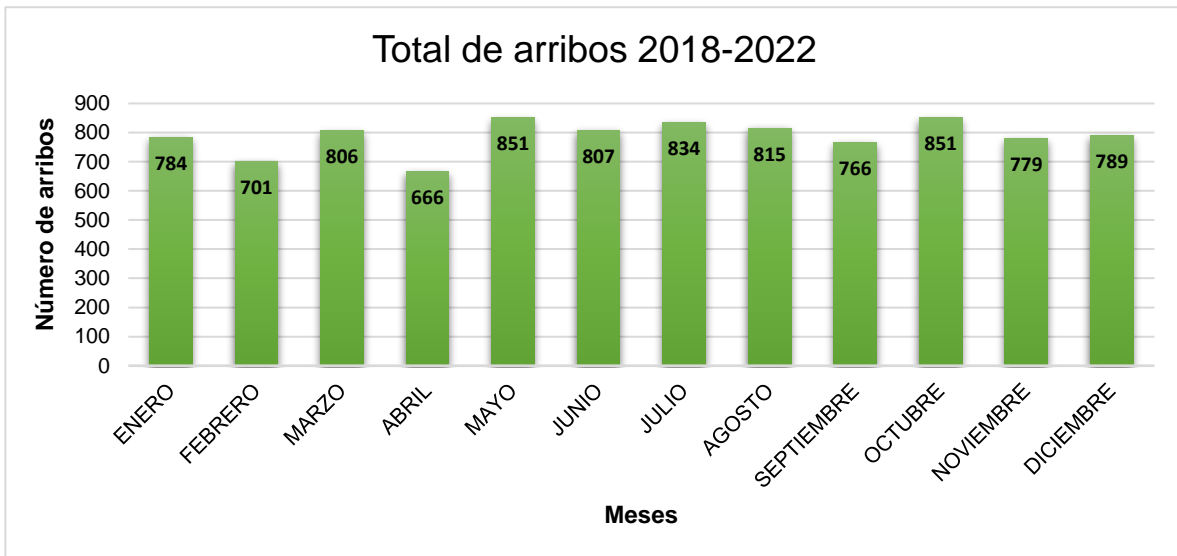


Figura 14. Total, de arribos en el puerto de Veracruz

En la Figura 15, se observa el total de horas por mes que permanecen los barcos en puerto, estableciendo que diciembre, a pesar de no ser el periodo que cuenta con el mayor número de llegadas, es el que cuenta con el número de horas más alto con 149,135. Con respecto al mes de marzo su tiempo en muelle es menor del que se podría tener considerando el número de arribos, por lo tanto, los meses seleccionados para este estudio fueron mayo, octubre y diciembre.

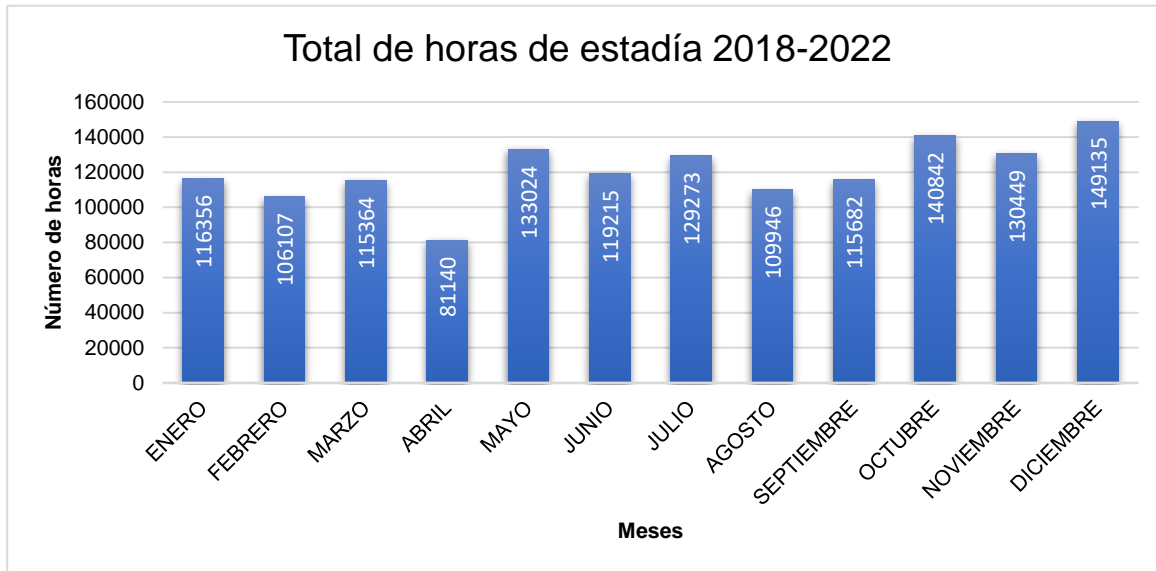


Figura 15. Horas totales en puertos

9.1.2 Selección de los buques más representativos de la zona de estudio

Una vez seleccionados los meses de más actividad, se prosiguió con el análisis de los barcos. Un dato importante que se tomó en cuenta para poder seleccionar las fuentes fijas es el valor del GT de los buques. En la Figura 16, se puede ver que los portacontenedores y los Roll-on Roll off, cuentan con los valores más altos, seguidos de los de granel agrícola y los de combustible.

Posteriormente, se evaluaron los barcos que más arriban a puerto y que permanecen operando una mayor cantidad de horas en muelle. En la Figura 17 y 18, se muestran dichos resultados en donde se aprecia que el buque portacontenedores especializado supera a las demás embarcaciones con más de 900 arribos dentro de ese periodo de estudio, seguido de los Roll-on Roll-off con 1,421 y finalmente los de carga general con 1,178 llegadas a puerto. Con respecto a las horas de estadía, se puede ver que, del periodo de estudio, el de carga de granel agrícola es el que más tiempo permanece en puerto realizando la manipulación de sus mercancías con un porcentaje de 29%, seguido del de combustible con 23% y granel mineral con 18%.

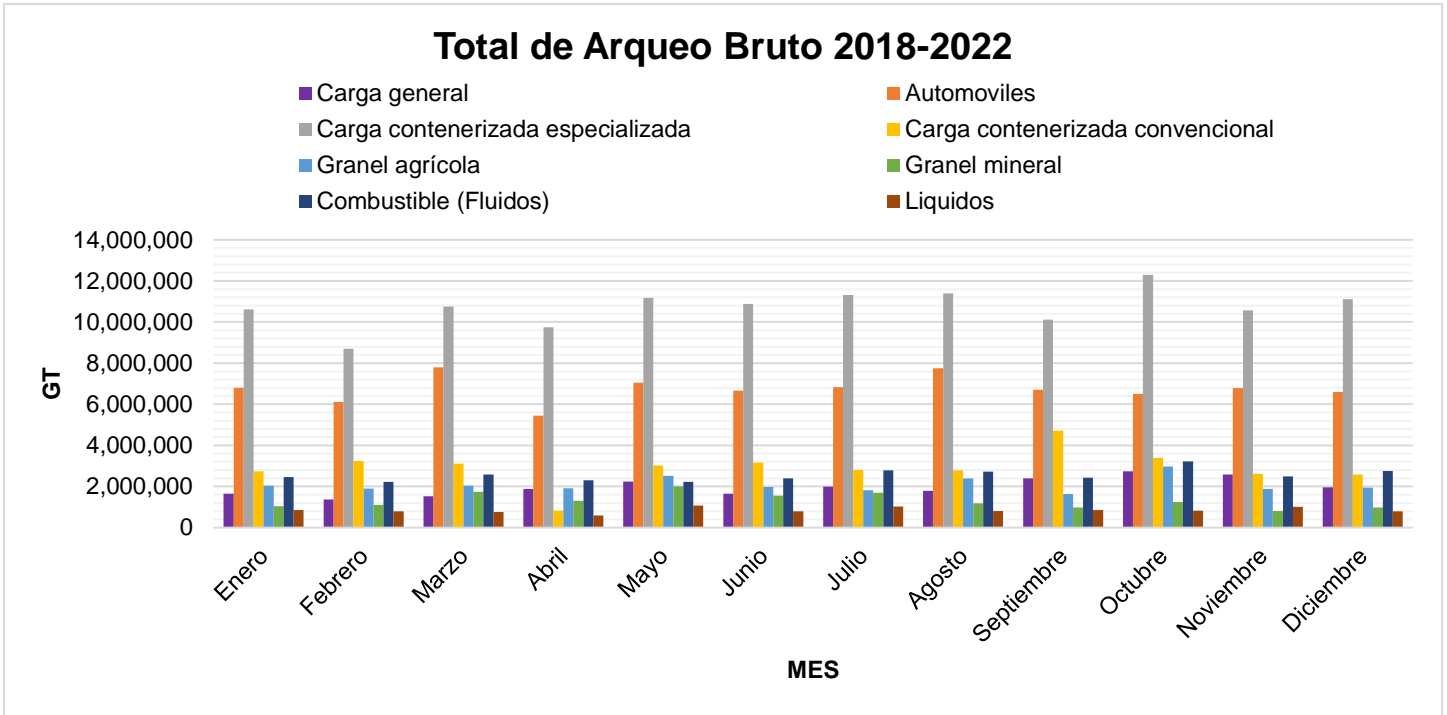


Figura 16. Total, de arribos por tipo de embarcación en la zona de estudio

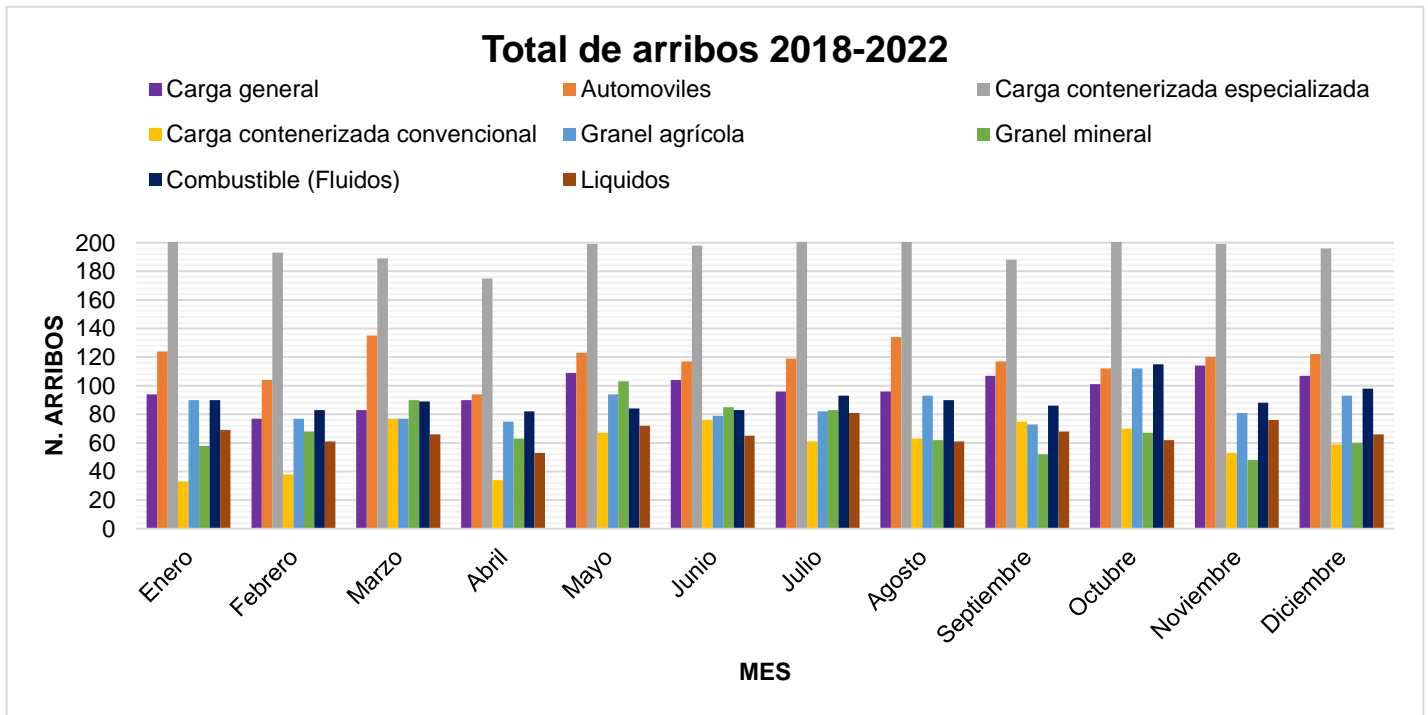


Figura 17. Total, de horas de estadía por tipo de embarcación en la zona de estudio

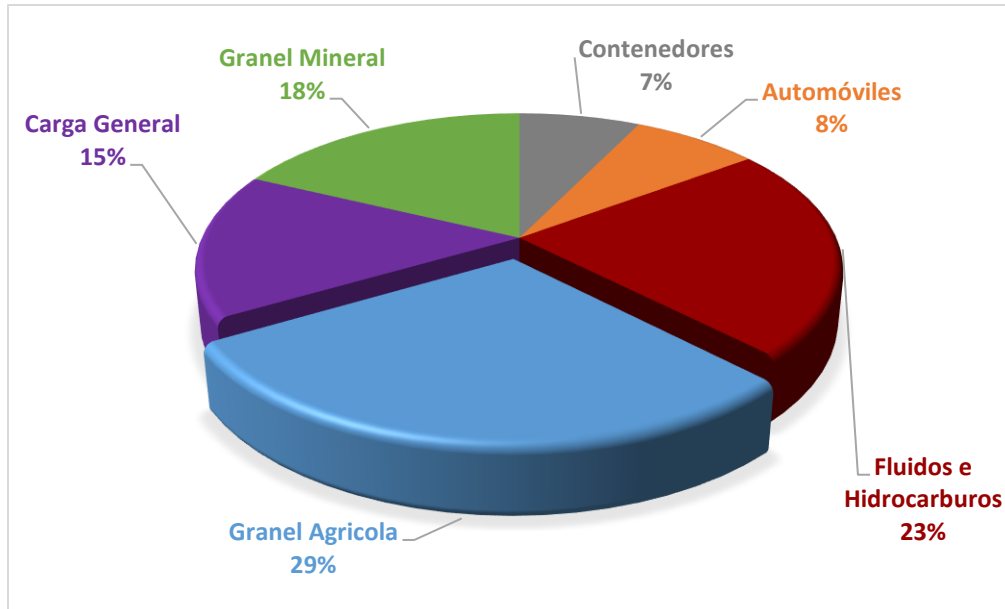


Figura 18. Porcentaje total de horas de estadía

Con base, en los resultados presentados en las figuras anteriores, se establecieron como fuentes fijas a los buques portacontenedores por su número de arribos y dimensiones, así como los barcos graneleros por su tiempo de estadía en muelle.

9.2 Recopilación de información de otros puertos del mundo

Después de haber realizado la investigación literaria se seleccionaron siete puertos verdes, entre estos, los únicos dos que existen en México, el puerto de Ensenada y Lázaro Cárdenas. Además, se seleccionaron cinco de los más importantes del comercio marítimo y que son líderes en la aplicación y uso de estrategias ambientales en sus operaciones portuarias. En la tabla 9, se ilustran sus principales características. El puerto de Rotterdam es el más grande con un total de 122 posiciones de atraque, seguido de Montreal y Long Beach. Se observa que la carga contenerizada es la más representativa para todos los puertos, únicamente el de Lázaro Cárdenas, manipula más carga de granel mineral. Por otro lado, todos los puertos a excepción de Veracruz cuentan con certificación de puerto verde, sin embargo, únicamente los que se encuentran fuera de México hacen uso de conexiones a tierra y de energías renovables como solar, eólica, geotérmica e hidráulica. De igual forma, utilizan combustibles alternos como el GNL, equipos de control de emisiones y combustibles con bajo contenido de azufre.

Tabla 11.

Caracterización de los puertos verdes seleccionados

Puerto	Puerto Verde	Ampliación	Conexiones a tierra	Astilleros	Energías Renovables	Tipo de carga
Veracruz 23 posiciones de atraque	NO	SI	NO	SI	NO	Contenedores -38.48 % Granel agrícola – 23.55% Granel mineral – 12.77% Carga rodada -4.51% Carga general Fluidos e hidrocarburos
Ensenada 13 posiciones	SI	En proceso	NO	NO	NO	Contenedores -56% Granel agrícola Carga general – 10% Granel mineral -27% Cruceros y Turismo náutico
Lázaro Cárdenas 14 posiciones	SI	SI	NO	SI	NO	Contenedores -27% Granel agrícola Granel mineral -53% Carga rodada Carga general -6% Fluidos e hidrocarburos -9%
Long Beach 80 posiciones	SI	SI (remodelación)	SI	SI	SI	Contenedores -63% Granel agrícola -10% Granel mineral Carga rodada -20% Carga general
Hamburgo 75 posiciones	SI	En proceso	SI	SI	SI	Contenedores – 68% Granel agrícola -15% Granel mineral -15% Carga rodada Carga general Fluidos e hidrocarburos Cruceros
Rotterdam 122 posiciones	SI	En proceso y remodelación	SI	SI	SI	Contenedores -57% Granel agrícola Granel mineral -16% Carga rodada Carga general Fluidos e hidrocarburos -27%
Montreal 84 posiciones de atraque	SI	SI (terminal de contenedores)	SI	SI	SI	Contenedores -42% Granel agrícola -24% Granel mineral Carga general Fluidos e hidrocarburos -34% Cruceros y Carga Rodada

9.3 Estimación de las emisiones con el uso de estrategias ambientales

9.3.1 Ubicación de las fuentes fijas

Previamente al cálculo de las tasas de emisión, se recopiló información de las horas totales de estadía en los muelles que reciben barcos graneleros y portacontenedores del año 2018 al 2022, con el objetivo de conocer en cuál de ellos pasan más tiempo operando dichos buques y establecerlo como el punto de ubicación de la fuente fija.

En la Figura 19, se muestran los resultados obtenidos para el buque portacontenedores, y se observa que invierte más tiempo en la manipulación de carga en los atracaderos 14 y 13 de la bahía norte con un 28% y 26%, al contrario del 6 N donde solo estuvo un 5%. Con respecto a los barcos graneleros, se observa en la ilustración 20, que el embarcadero 4 N es el que predomina con un 21% sobre los 12 distintos que cumplen con la vocación de la carga a granel. Por estos motivos, se seleccionaron los muelles 14, 13 y 4N como la ubicación de las fuentes emisoras.

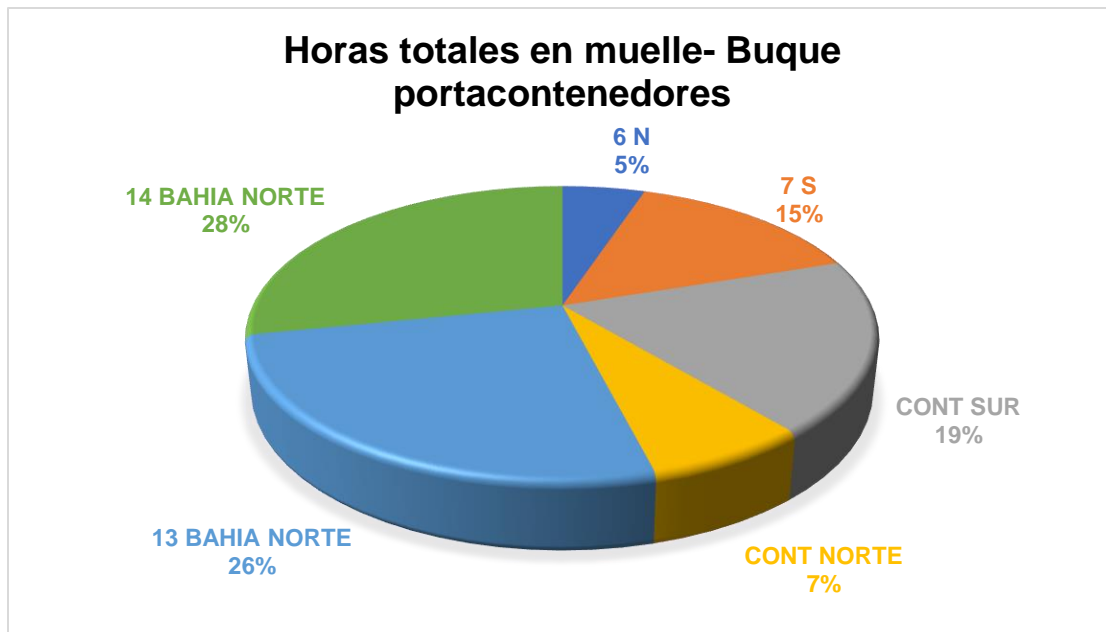


Figura 19. Total de horas invertidas por muelle del buque portacontenedores

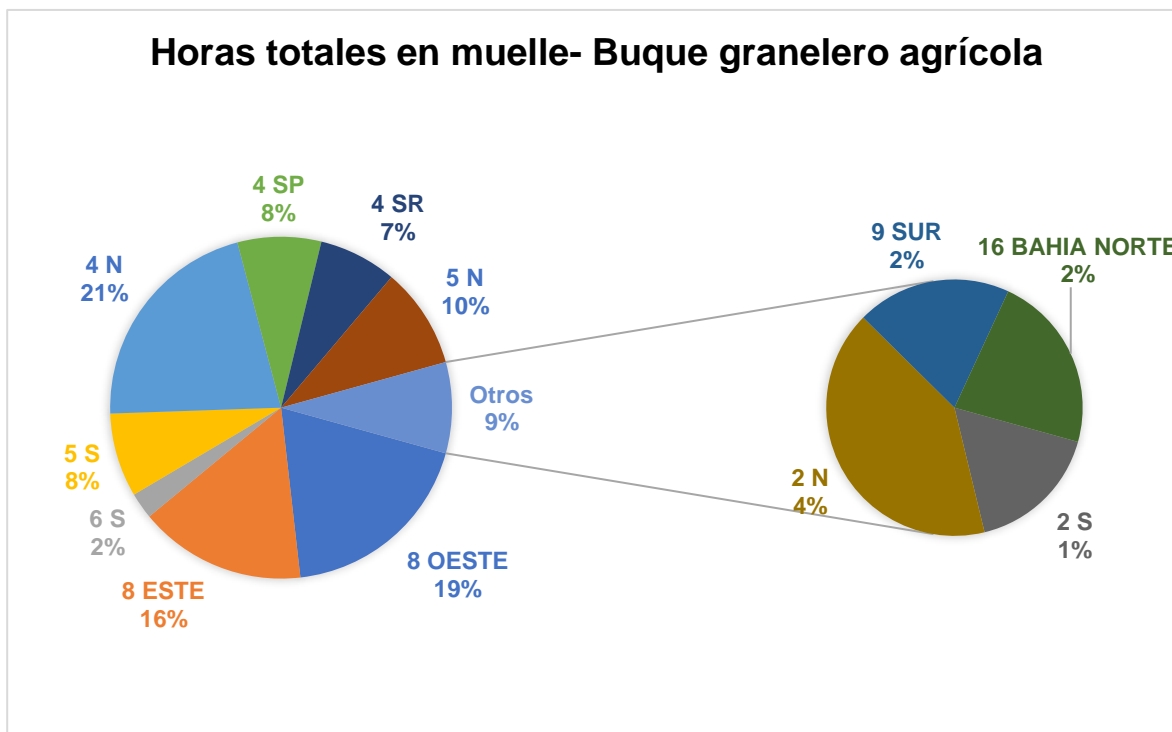


Figura 20. Total de horas invertidas por muelle del buque granelero agrícola

9.3.2 Cálculo de las tasas de emisión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la estimación de las emisiones de los años 2018 al 2021, a diferentes contenidos de azufre en el combustible. Se observa que los valores más altos se le atribuyen al CO₂, con un porcentaje del 94% de los datos totales. Además, no se aprecia una reducción entre el 2018 y 2020, esto debido a que hubo un mayor movimiento de buques durante esos años, sin embargo, entre el 2020 y el 2021 a mismos porcentajes de azufre hay una minimización del 57%. Por otro lado, comparando el 2021 con el escenario de la ZCE, se reduce un 35% y con el del año 2019 un 84%.

Estos resultados, concuerdan con lo dicho por Liu et al., (2014), quienes determinaron que la sustitución de los combustibles con bajo contenido de azufre da resultados positivos reduciendo las emisiones entre un 30% a 90%. Esto, coincide con el estudio realizado por Finlayson et al. (2000), que concluyeron que la reducción del azufre tiene un impacto significativo en las emisiones de SO₂, y también coincide con Barregard *et al.* (2019), que demostraron que la reducciones del contenido de azufre del combustible establecido por el Convenio Internacional MARPOL en el año 2015 del 0.5% al 0.10%, trajo consigo una disminución significativa de las emisiones, así como de las contribuciones del transporte marítimo a la contaminación atmosférica por medio del SO₂ y a la deposición del azufre (S) y una reducción de la contribución a las concentraciones de partículas. Del mismo modo,

López-Aparicio et al., (2017), encontraron que el cumplimiento del convenio MARPOL suponen una reducción del 90% de las emisiones de SO₂.

Tabla 12.

Emisiones totales del periodo de estudio

	Emisiones totales				
	2018	2019	2020	2021	ZCE (2019)
% de azufre m/m	3.50%	2.50%	0.50%	0.50%	0.10%
Mg NOx/año	427.73	529.72	429.37	242.71	84.69
Mg SO₂/año	357	385.1	53.54	74.04	16.27
Mg PM₁₀/año	30.77	21.08	6.84	9.26	15.22
Mg PM_{2.5}/año	30.77	21.08	6.84	9.26	15.22
Mg CO/año	31.64	36.88	28.73	39.67	32
Mg CO₂/año	14,425.82	27,394.62	21,728.87	30,080.49	22,555.53

Una de las principales operaciones que realiza un buque mercante en el puerto son las maniobras de arribo y zarpe, es decir cuando el buque cruza la dársena, comenzando a adentrarse en la zona de atraque, o al revés, comienza a salir de las cordilleras hacia mar abierto. La otra actividad fundamental es la estadía, cuando lleva a cabo sus actividades de carga y descarga de mercancía. Sin embargo, es importante analizar en cuál de las dos etapas se están emitiendo más gases contaminantes y cuales son éstos para poder, contrarrestar el problema con el uso de estrategias de minimización o de control de la contaminación atmosférica.

En la Tabla 13, se muestran los resultados de los contaminantes por actividad, en donde se ve que en la etapa de estadía se genera el mayor número de contaminación atmosférica, representando más del 80% de la emisión total generada. Esto coincide con lo concluido por Kotrikla et al., (2017), quienes detectaron que las emisiones más representativas se dan en el periodo de estadía, debido a sus largos tiempos de operación. También, Campling et al. (2013), determinaron que las operaciones de estadía contribuyen a la emisión total en un porcentaje del 95%, mientras que las maniobras de arribo y zarpe son responsables del 5% restante. Por otro lado, Papaefthimiou *et al.* (2016), reportó que la fase de estadía representa generalmente la mayor fracción de las emisiones totales en el puerto, calculando un 90.1% de NO_x y 88.5% de SO₂, sin embargo, mencionó que estos porcentajes pueden variar dependiendo del tiempo de cada operación.

Tabla 13.

Emisiones totales por etapa de navegación

Emisiones totales		
Contaminante	Estadía	Maniobra
Mg NOx/año	467.4	62.2
Mg SO ₂ /año	340.8	44.2
Mg PM ₁₀ /año	16.9	4.1
Mg PM _{2.5} /año	16.9	4.1
Mg CO/año	30.4	6.3
Mg CO ₂ /año	24,363.7	3,030.8

En la Figura 21 se muestran los resultados de las emisiones generadas por contaminante, con el propósito de conocer los más representativos. Se observa que los NOx dominan con un 49% seguido del SO₂ con 41%. De igual forma, Karl et al. (2019), demostraron que en el mar Báltico se presenta una contribución de hasta el 40% de NOx. Del mismo modo, en la ciudad portuaria de Hamburgo, Ramacher et al. (2018), identificaron que las máximas contribuciones relativas del transporte marítimo provienen de los NOx en un 45% a 23%. Por consecuencia, los sistemas de control seleccionados deben ser enfocados a la reducción de los NOx y los SO₂, por lo que se seleccionaron los siguientes equipos: Lavador de gases, SCR y la combinación de ambos (Lavador de gases + SCR).

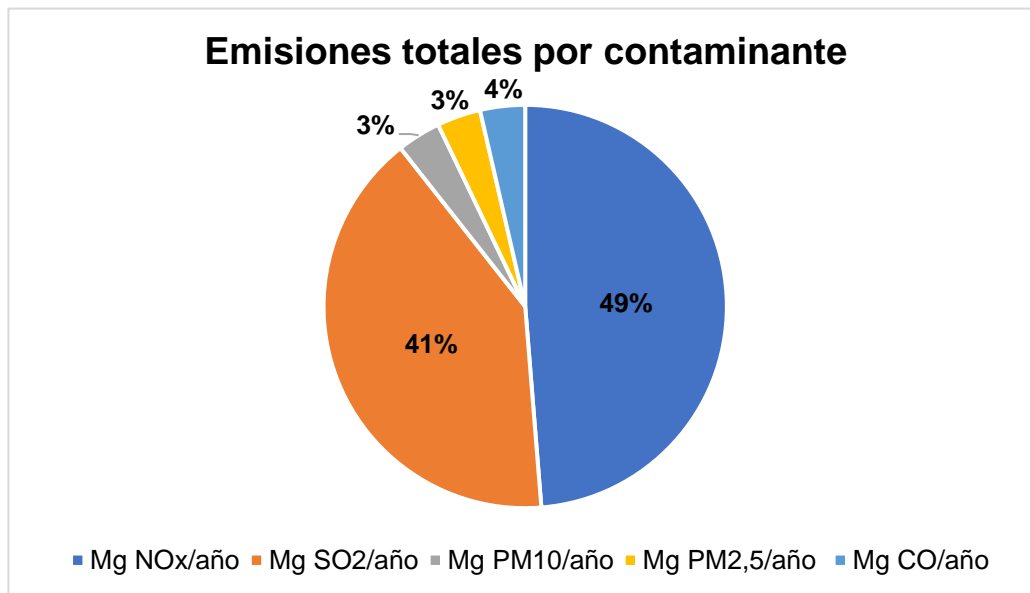


Figura 21. Emisiones por contaminante

En la Tabla 14, se observan las emisiones obtenidas con el uso de equipos de control. En relación con los NOx, el sistema más favorable es el SCR, disminuyendo un 89.6% la contaminación y el menos conveniente es el lavador de gases ya que solo logra reducir un 5.84%. Por otro lado, hablando de los SO₂, la combinación SCR + Lavador de gases logra minimizar un 99.1%, seguido del lavador de gases que permiten mitigar un 98.8%. Esto concuerda con lo reportado por Seddiek y Elgohary, (2014), quienes calcularon las emisiones haciendo uso del SCR y un lavador de gases, y encontraron que la mejor estrategia es el uso del SCR con respecto a los NOx.

Tabla 14.

Cálculo de las emisiones con equipos de control (Mg/año)

		2018	2019	2020	2021
NOx	Sin equipo	427.73	529.72	429.37	242.71
	Lavador de gases	402.75	498.78	404.29	228.54
	SCR	44.48	55.09	44.65	25.24
	S+SCR	85.12	105.41	85.44	48.30
SO₂	Sin equipo	357.00	385.10	53.54	74.08
	Lavador de gases	4.28	4.62	0.64	0.89
	SCR	273.11	294.60	40.96	56.67
	S+SCR	1.07	1.16	0.16	0.22

9.4 Aplicación del modelo analítico jerárquico AHP

Puesto que se obtuvieron múltiples resultados de emisiones, se necesitó definir sólo un caso de estudio con el objetivo de poder ejecutar el modelo y las matrices pareadas. Además, por los criterios seleccionados, se requirió basarse en un mes específico, en un tipo de embarcación, en un tipo de motor, en dos tipos de combustibles y dos contaminantes. Para este análisis, se estableció como objetivo principal reducir las emisiones en puerto de los buques graneleros, porque son los que más tiempo invierten en sus operaciones de manipulación de carga seguido de sus criterios, los cuales consideran los costos de los equipos de control, las emisiones generadas en un mes del año 2021 y el costo del ULSD y del BFO. Por último, se seleccionaron las alternativas de operar con un contenido de azufre de 0.5%, o con el uso de los diferentes equipos de control. En la Figura 22, se observa el árbol de jerarquías al que se llegó.

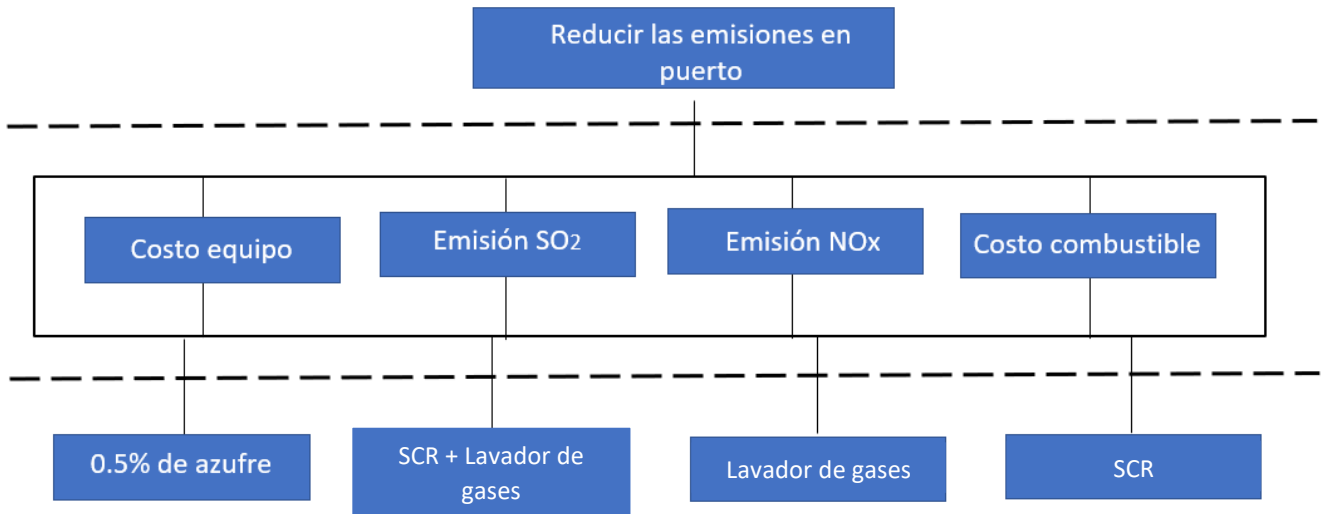


Figura 22. Árbol de jerarquías método AHP

Se realizó una investigación en diferentes fichas técnicas de sistemas de control y además se consultó información en astilleros y en páginas oficiales, para conocer los costos involucrados en el estudio. En la Tabla 15, se pueden ver los datos que se utilizaron para proseguir con el cálculo matricial y poder encontrar la estrategia ambiental más adecuada para la zona de estudio.

Tabla 15.
Caso de estudio

Caso de estudio				
Alternativas	Criterios			
	Emisión SO ₂ (Mg/mes)	Emisión NO _x (Mg/mes)	Costo del combustible x Mg	Costo del equipo
0.5% de azufre	13.05	82.92	\$624.50	\$0
3.5% con Lavador de gases	1.13	100.48	\$435.50	\$240,000.00
3.5% con SCR	72.24	11.09	\$435.50	\$225,000.00
3.5% Lavador de gases + SCR	0.28	21.23	\$435.50	\$465,000.00

*Los costos son en dólares americanos

Después de que se procesaran las matrices pareadas y se encontraran las ponderaciones de cada una, se encontraron los resultados que se muestra a continuación.

Tabla 16.

Resultados del método AHP

Criterios					
Alternativas	Emisión SO ₂ (Mg/mes)	Emisión NO _x (Mg/mes)	Costo del combustible x Mg	Costo del equipo	Priorización
0.5% de azufre	0.09	0.05	0.10	0.57	11.06%
3.5% con Lavador de gases	0.27	0.09	0.30	0.24	16.81%
3.5% con SCR	0.05	0.57	0.30	0.14	37.05%
3.5% Lavador de gases + SCR	0.58	0.29	0.30	0.05	35.07%
Ponderación	0.27	0.56	0.09	0.08	100%

Como se ilustra en la Tabla 16, la estrategia ambiental más favorable con un 37.05% de priorización es utilizar un combustible residual con un SCR como sistema de control, seguido de la alternativa del combustible con un contenido de azufre del 3.5%, pero haciendo uso del equipo de control combinado lavador de gases + SCR, logrando minimizar las emisiones de SO₂ en un 99.7% y los NO_x un 80.1%.

9.5 Selección de los escenarios específicos

Los casos de estudio se seleccionaron en función de encontrar las mejores condiciones para que los barcos operen en el recinto portuario. Por esto se realizó, la evaluación de datos meteorológicos obteniendo los promedios de las velocidades de viento, la moda de las direcciones de viento y la media de las temperaturas, y se consideró el movimiento de buques y datos de marea. Además, se realizaron las rosas de viento para cada escenario seleccionado, en la Figura 23, se presenta la rosa de vientos del día 11 de mayo del año 2018 y en la Figura 24 la del día 11 de octubre de 2019. Las figuras restantes, se encuentran en el anexo B. En la Tabla 17 se observan los días que se eligieron, por año, mes, día, así como los datos de meteorología.

Se puede ver que las direcciones de viento predominantes en los meses y días evaluados son las provenientes del oeste, seguido de las del oeste noroeste. Con respecto a la temperatura, se registró que los días más calurosos son en el mes de mayo, en especial el día 28 del 2019, que se tuvo la más alta con 30.45 °C. Por el contrario, en el mes de diciembre se tuvieron las más bajas, llegando a los 19.26 °C. Por lo tanto, el viento fue muy variable, no se determinó un mes con las velocidades de viento más bajas.

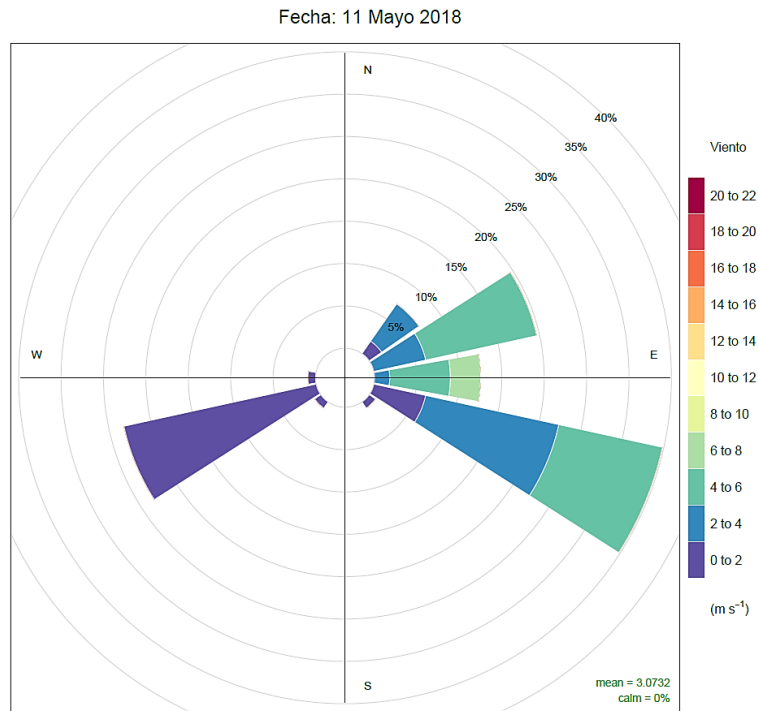


Figura 23. Rosa de vientos 11 de mayo de 2018

Fuente: Elaboración propia con datos meteorológicos de la estación de monitoreo UNAM-APIVER

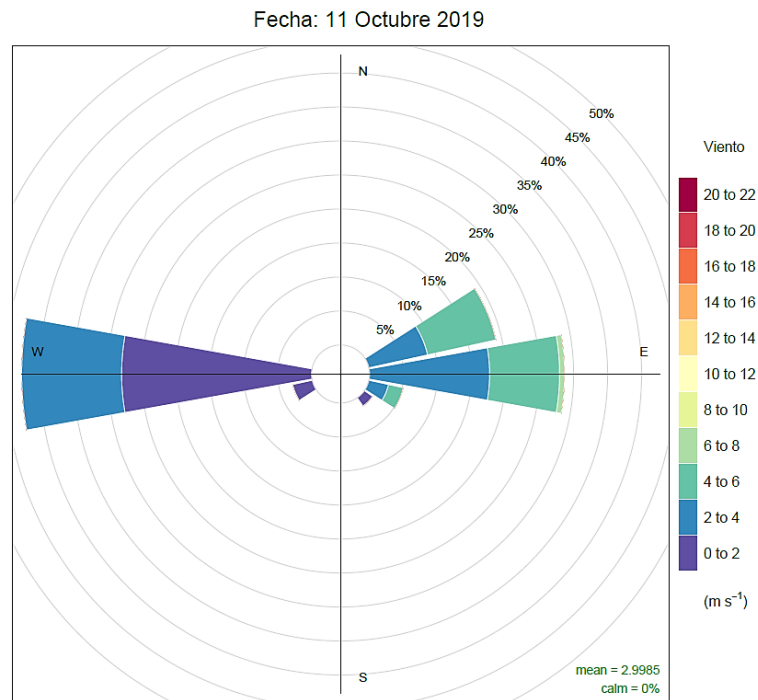


Figura 24. Rosa de vientos 11 de octubre de 2019

Fuente: Elaboración propia con datos meteorológicos de la estación de monitoreo UNAM-APIVER

Tabla 17.

Escenarios específicos seleccionados

MES	AÑO	DIA	VELOCIDAD DE VIENTO	DIRECCIÓN DE VIENTO	TEMPERATURA
MAYO	2018	11	1.14	WSW	25.5
MAYO	2018	12	1.21	NW	27
MAYO	2018	24	1.33	W	26.9
OCTUBRE	2018	21	1.63	W	22.9
OCTUBRE	2018	22	0.64	WNW	23.7
OCTUBRE	2018	23	1.08	SSW	23.64
DICIEMBRE	2018	1	1.09	SE	26.43
DICIEMBRE	2018	16	0.88	WNW	20.65
DICIEMBRE	2018	17	1.35	W	20.45
MAYO	2019	1	1.13	W	26.6
MAYO	2019	15	1.2	ENE	27.8
MAYO	2019	28	1.8	SW	30.45
OCTUBRE	2019	10	0.98	W	27.3
OCTUBRE	2019	11	1.13	W	27.47
OCTUBRE	2019	12	1.21	WNW	25.1
DICIEMBRE	2019	6	1.08	W	22.7
DICIEMBRE	2019	20	1.47	WNW	19.26
DICIEMBRE	2019	21	1.6	WNW	20.32
MAYO	2020	3	1.8	E	28.06
MAYO	2020	17	0.98	NE	27.8
MAYO	2020	19	1.36	WSW	29.26
OCTUBRE	2020	3	1.55	WNW	24.4
OCTUBRE	2020	27	1.37	W	26.17
OCTUBRE	2020	28	0.98	WNW	25.7
DICIEMBRE	2020	9	1.64	W	20.03
DICIEMBRE	2020	10	1.71	WSW	19.89
DICIEMBRE	2020	22	1.8	WNW	20.77

Fuente: Elaboración propia con datos meteorológicos de la estación de monitoreo UNAM-APIVER

9.6 Cuantificación de las emisiones y concentraciones de los escenarios elegidos

9.6.1 Estimación de las emisiones de las grúas RTG

Con los días establecidos en el apartado anterior, se recopiló la información para el cálculo de las emisiones de las grúas RTG, que operan en la cesionaria ICAVE en la bahía norte, como se muestran a continuación.

Tabla 18.

Datos específicos para el cálculo de las emisiones de las grúas RTG

Grúa	Mes	Año	Día	Número de barcos	Número de RTG operando	Horas	Potencia del motor kW
Mitsubishi-Cummins-1999	OCTUBRE	2019	10	2	9	24	387
Mitsubishi-Cummins-2004	OCTUBRE	2019	11	3	13	24	242
ZPMC-Cummins-2009	OCTUBRE	2019	12	2	9	24	448
Ferrari-Cummins-2016	DICIEMBRE	2019	6	1	4	22.63	250
SANY-Cummins-2018	DICIEMBRE	2019	19	3	13	24	164
Mitsubishi-Cummins-1999	DICIEMBRE	2019	20	2	9	24	242
Mitsubishi-Cummins-2004	MAYO	2020	3	1	4	20.55	387
ZPMC-Cummins-2009	MAYO	2020	17	1	4	19.7	242
Ferrari-Cummins-2016	MAYO	2020	19	2	9	20.86	448
SANY-Cummins-2018	OCTUBRE	2020	3	1	4	23.66	250
Mitsubishi-Cummins-1999	OCTUBRE	2020	27	3	13	24	164
Mitsubishi-Cummins-2004	OCTUBRE	2020	28	3	13	17.91	242
ZPMC-Cummins-2009	DICIEMBRE	2020	9	2	9	24	387
Ferrari-Cummins-2016	DICIEMBRE	2020	10	3	13	24	242
SANY-Cummins-2018	DICIEMBRE	2020	22	1	4	20.23	448

En la Tabla 18, se observan las características de las grúas (tipo y motor), además del número de barcos, ya que de eso depende el número de grúas RTG que se encuentran trabajando. El dato de horas de operación se obtuvo con base en el tiempo que estuvieron los barcos considerados en el muelle realizando sus actividades de estadía.

La estimación de las emisiones se analizó en gramos/día, para los contaminantes SO₂ y NO_x, y se realizó para cuatro casos distintos. Primero sin ningún factor de corrección de combustible, es decir utilizando uno con un porcentaje superior a 0.5% y sin equipo de control, después se evaluó sin factor de corrección, pero con el uso de equipos de control denominados VYCON REGEN® Y VYCON DPF®. Posteriormente, con factor de corrección de combustible utilizando ULSD y sin equipo de control y por último con factor de corrección y equipo de control con el objetivo de determinar cuál de las opciones es la más adecuada para la minimización de las emisiones a la atmosfera. Los resultados obtenidos se muestran a continuación

Tabla 19.

Resultados de las emisiones de SO₂ en g/día generadas por las grúas RTG

Días	Sin FCC y sin equipo de control	Sin FCC y con equipo de control	Con ULSD y sin equipo	Con ULSD y equipo de control
10/10/2019	1170.3	994.7	128.7	109.4
11/10/2019	1057.1	898.5	116.3	98.8
12/10/2019	1354.8	1151.5	149.0	126.7
06/12/2019	316.8	269.3	34.9	29.6
19/12/2019	818.7	695.9	90.1	76.5
20/12/2019	731.8	622.0	80.5	68.4
03/05/2020	445.4	378.6	49.0	41.6
17/05/2020	267.0	226.9	29.4	25.0
19/05/2020	1177.5	1000.9	129.5	110.1
03/10/2020	378.6	321.8	41.6	35.4
27/10/2020	716.4	608.9	78.8	67.0
28/10/2020	788.8	670.5	86.8	73.8
09/12/2020	1170.3	994.7	128.7	109.4
10/12/2020	1057.1	898.5	116.3	98.8
22/12/2020	580.0	493.0	63.8	54.2

La Tabla 19 demuestra que las emisiones más altas se generan cuando se utiliza un combustible con alto contenido de azufre y sin considerar un equipo de control. Por el contrario, cuando se usa el sistema, se tiene una reducción del 15%, seguido del uso de un

combustible ULSD con 89% y un escenario ideal es cuando se reduce un 90.66%, utilizando ULSD y equipo de control demostrando la importancia que tiene operar con un combustible ULSD con bajo contenido de azufre.

A continuación, se presentan los resultados de las emisiones de NOx en g/día de las grúas RTG, con los criterios mencionados con anterioridad.

Tabla 20.

Resultados de las emisiones de NOx en g/día generadas por las grúas RTG

Días	Sin FCC y sin equipo de control	Sin FCC y con equipo de control	Con ULSD y sin equipo	Con ULSD y equipo de control
10/10/2019	36,037	25,226	34,163	23,914
11/10/2019	12,688	8,882	12,028	8,420
12/10/2019	12,099	8,470	11,470	8,029
06/12/2019	435	305	412	289
19/12/2019	310	217	294	206
20/12/2019	22,534	15,774	21,363	14,954
03/05/2020	17,374	12,162	16,470	11,529
17/05/2020	5,365	3,755	5,086	3,560
19/05/2020	719	503	681	477
03/10/2020	466	326	442	309
27/10/2020	15,271	10,690	14,477	10,134
28/10/2020	9,469	6,628	8,976	6,283
09/12/2020	10,452	7,316	9,908	6,936
10/12/2020	447	313	423	296
22/12/2020	715	500	677	474

Con respecto a lo presentado en la Tabla 20, se observa que las emisiones de NOx no disminuyen de manera significativa cuando hay cambio de combustible sino únicamente hay una reducción de un 5.2%, esto comprueba el hecho de que las emisiones de este contaminante no dependen en gran parte del porcentaje del contenido de azufre en el combustible, sino de la eficiencia con la que se genera la combustión. Ahora bien, Patel *et al.* (2014), concluyeron que las emisiones de NOx están relacionadas con la eficiencia del trabajo del motor, es decir de la temperatura que alcanza el combustible y del tiempo en el que se produce la combustión, la disponibilidad de oxígeno y el retardo de ignición. Yin *et al.* (2005) estudió las emisiones de NOx de un motor diésel marino Wärstila W6L20C en un banco de prueba, y demostró que el nivel de emisiones cambiaba según la eficiencia con

la que funcionaba el motor. Sin embargo, al usar los equipos de control hay reducciones del 30% y el 33.64%. Estos resultados concuerdan con lo investigado por Fahdi et al., (2019), quienes mencionan que el uso de estrategias ambientales puede reducir las emisiones hasta en un 80%. Otro dato que le da relevancia a estos resultados es lo encontrado por, Densberger y Bachkar (2022), donde establecen que gran parte del progreso de encaminar a los puertos a cero emisiones se ha centrado en los equipos de manejo de carga, debido a sus horas de operación y que representan un alto consumo de energía.

A continuación, en la Tabla 21, se observan los resultados de las emisiones generadas en g/día de las grúas RTG y de los buques graneleros y portacontenedores. Se puede ver que las embarcaciones emiten altas cantidades de SO₂, representando aproximadamente el 99% de la emisión total comparado con un 1% de los equipos de manipulación de carga. Asimismo, el 98% de las emisiones de los NO_x provienen de las operaciones de los barcos y solo un 2% se les atribuye a las grúas. Esto coincide con lo encontrado por Joseph et al., (2009), quienes mencionan que la mayor contribución de las emisiones de SO₂ en un recinto portuario es generada por los buques.

Tabla 21.

Resultados de las emisiones de los buques y de las grúas RTG

MES	año	Dia	Barco		Grúa	
			Emisión gSO ₂ /día	Emisión gNO _x /día	Emisión gSO ₂ /día	Emisión gNO _x /día
Octubre	2019	10	619,680	14,681,896	130	36,037
Octubre	2019	11	1,783,974	11,564,625	81	12,688
Octubre	2019	12	1,321,503	8,506,712	151	12,099
Diciembre	2019	6	505,723	3,316,564	79	435
Diciembre	2019	19	1,597,422	10,467,394	63	310
Diciembre	2019	20	694,819	4,533,982	81	22,534
Mayo	2020	3	673,107	5,883,110	111	17,374
Mayo	2020	17	836,798	6,516,013	67	5,365
Mayo	2020	19	860,495	7,930,009	131	719
Octubre	2020	3	574,325	5,045,699	95	466
Octubre	2020	27	786,547	6,977,148	55	15,271
Octubre	2020	28	1,082,959	9,477,975	61	9,469
Diciembre	2020	9	762,842	5,009,626	130	10,452
Diciembre	2020	10	1,349,819	8,914,764	81	447
Diciembre	2020	22	713,719	4,675,826	145	715

Dichos resultados, reafirman que las emisiones contaminantes del aire en los puertos provienen principalmente de los buques mercantes mientras están atracados en el muelle realizando la carga y descarga de mercancía, esto debido a que mantienen los motores auxiliares encendidos para poder suministrar energía para sus maniobras (Jahangiri *et al.*, 2018). Según Campling *et al.* (2013) las principales razones de la contaminación atmosférica en los puertos es la operación de los motores principales y auxiliares de los buques.

9.6.2 Resultados de las concentraciones del modelo screen view

El análisis de las concentraciones se ejecutó para un día por mes del periodo analizado para los contaminantes de NO_x y SO₂. En la Figura 25, se muestran los resultados en ppm de las concentraciones de SO₂ que se obtuvieron del periodo de estudio (8 horas) a 5km de la fuente de emisión el día 11 de mayo de 2018, el mes en donde se presentaron las temperaturas máximas y vientos en calma. Esto podría justificarse con lo citado por Xu *et al.* (2010), quien encontró que las concentraciones de los gases dependen fuertemente de las velocidades del viento observando mayores dispersiones durante las épocas de más viento. De igual forma, He *et al.* (2017), confirmó que las condiciones meteorológicas son el principal factor causante de las variaciones diarias de las concentraciones de gases y concluyó que el viento afecta la dispersión y el transporte local y regional de los contaminantes en la atmosfera.

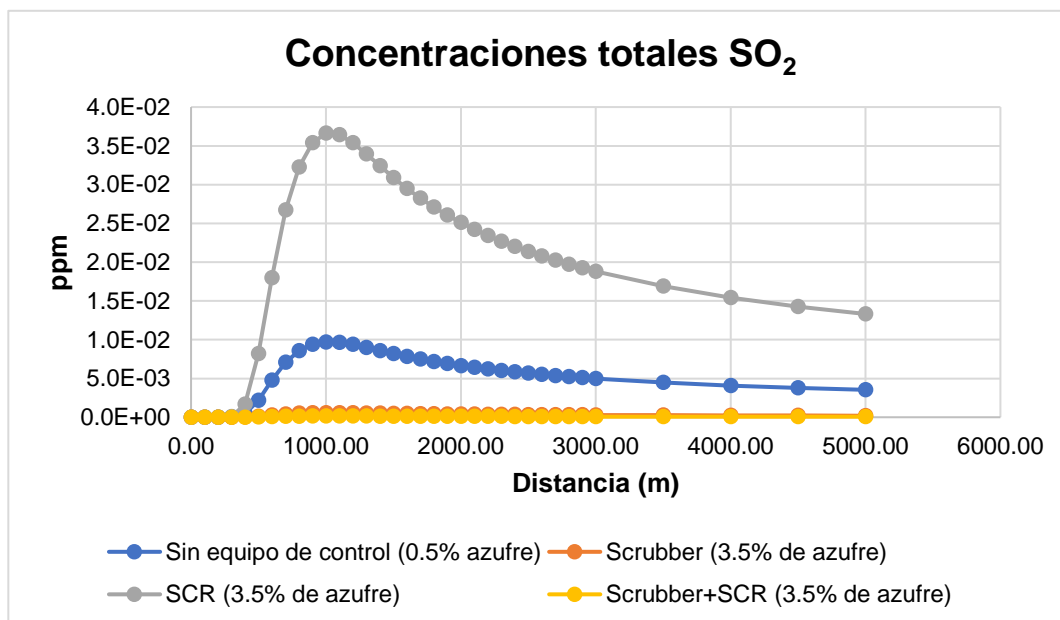


Figura 25. Concentraciones totales de SO₂ en ppm con uso de estrategias ambientales

Se puede ver que las concentraciones obtenidas del periodo de 8 horas, más altas de SO₂ se presentan cuando se utiliza un combustible residual en combinación con un SCR, superando las 0.03 ppm, a diferencia de cuando se utiliza un ULSD disminuyendo a 0.01 ppm. Los escenarios más favorables son con el uso de los sistemas de control lavador de gases y la combinación de SCR + Lavador de gases.

En la Figura 26 se presentan los resultados obtenidos para los NO_x, los cuales se calcularon bajo los mismos criterios. Sin embargo, en este caso se observa que las emisiones más altas se presentan cuando se utiliza únicamente el equipo lavador de gases, a diferencia del SCR que refleja el escenario más apropiado, seguido de la combinación de los dos equipos.

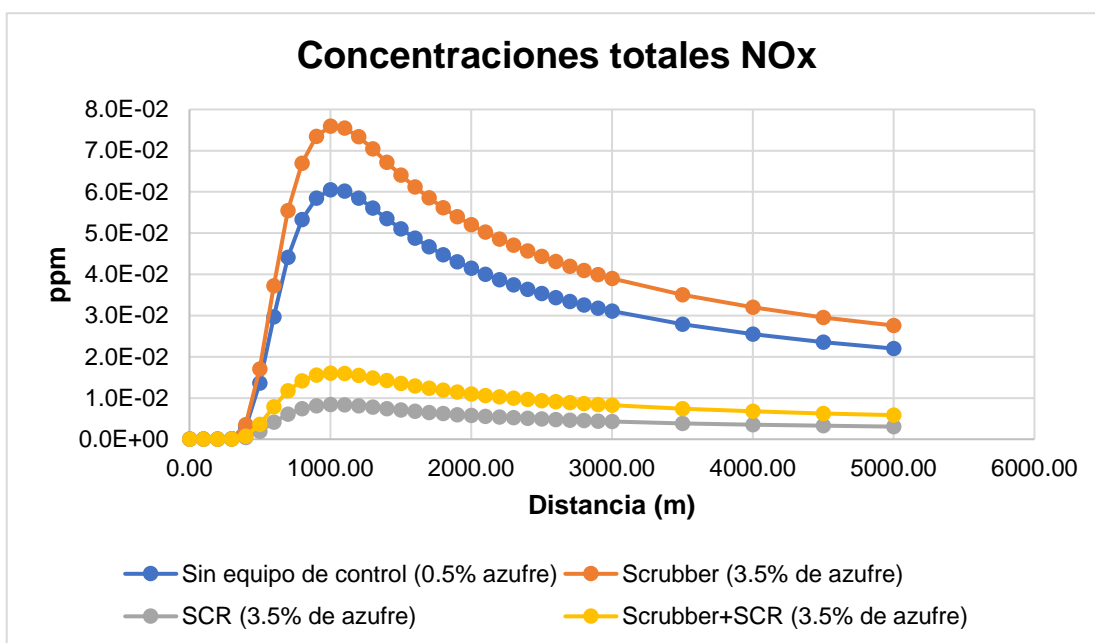


Figura 26. Concentraciones totales de NO_x en ppm con uso de estrategias ambientales

Si bien los resultados nos ayudan a establecer cuál es el sistema de control más eficiente para cada contaminante, es importante también considerar que estas concentraciones varían con respecto a la meteorología presente en el momento del cálculo, si se utilizaran velocidades de viento más altas se podrían obtener concentraciones más bajas, ya que favorece la dispersión. Whiteman, et al. (2014), concluyó que las condiciones atmosféricas son un factor que puede generar variaciones temporales y espaciales de los contaminantes ambientales.

El recinto portuario de Veracruz está cerca de zonas urbanas y debido a esto las emisiones generadas por los buques pueden afectar la calidad del aire a la que están expuestos los habitantes, lo cual concuerda con lo analizado por Donateo *et al.* (2014), quienes

mencionan que el transporte marítimo y las actividades portuarias pueden contribuir en gran medida a la contaminación atmosférica, dando lugar a una exposición prolongada a los gases contaminantes, lo que provoca efectos adversos para la salud de la población local. Por esta razón el impacto ambiental de las emisiones de los buques y de los equipos de carga ha atraído recientemente un nivel de atención cada vez mayor (Ye, 2014).

9.7 Estrategias Ambientales aplicables a la zona de estudio

En la Tabla 22 se muestran las distintas estrategias tecnológicas, de operación y de mercado para prevenir, minimizar y controlar la contaminación atmosférica por la operación y ampliación que pueden ser aplicadas en la zona de estudio destacando el uso de combustibles más limpios y alternos.

Tabla 22.
Estrategias ambientales

Estrategia	Prevención	Minimización	Control
Combustibles alternos (GNL y biocombustibles)		X	
Uso de combustibles limpios (ULSD)		X	
Equipos de manejo de carga con ULSD			
Equipos de manejo de carga con sistemas de control de emisiones			X
Sistemas de control de emisiones en buques			X
Uso de vehículos de carga híbridos o eléctricos	X		
Empleo de generador – motor de eje (sistema híbrido)	X		
Conexión a tierra (<i>Cold Ironing</i>)	X		
Uso de paneles solares y banco de baterías	X		
Reducción de velocidad de los barcos		X	
Reducción de tiempos en la manipulación de la carga		X	
Reducción en el arribo y el zarpe de las embarcaciones		X	
Almacenamiento en pilas con protección (lona)	X		
Almacenamiento en lugares confinados	X		
Grúas con sistema de tornillo	X		
Camiones transportadores con protección	X		
Supresores de polvo en la tolva de distribución de granel		X	
Uso de lonas en el proceso del Sandblast		X	
Bandas de distribución de granel cerradas			X
Limpieza y recolección de material de construcción	X		
Utilizar aspersores de agua durante y posterior a la construcción		X	
Establecer una Zona de Control de Emisiones		X	X
Ser parte del Anexo VI y exigir el cumplimiento de las normativas vigentes	X		
Ampliación del recinto portuario de Veracruz	X	X	

En referencia a la Tabla 22, algunas investigaciones han demostrado que las estrategias seleccionadas para la zona de estudio son viables ya que han sido utilizadas en distintos

puertos del mundo, por otro lado, Liang *et al.*, 2016, encontró que los combustibles de bajo contenido de azufre pueden reducir la contribución del transporte marítimo a las concentraciones de PM_{2.5} en las zonas portuarias. También, Van *et al.*, 2019 concluyeron que el gas natural y el biocombustible pueden ser viables para lograr la reducción necesaria de los contaminantes atmosféricos de las zonas costeras y las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, mencionaron que estos dos combustibles pueden presentar el 50% de la demanda energética para el transporte marítimo en el año 2050 y afirmaron que los vehículos de carga híbridos o eléctricos, así como el empleo de generador- motor de eje (sistema híbrido), lograrán una reducción significativa de las emisiones en puerto. Además, cabe resaltar que existen investigaciones que sustentan que los buques son aptos para hacer uso de sistemas combinados, como el trabajo realizado por (Geronimo-Miguel *et al.*, 2022), quienes concluyeron que un barco puede operar con un sistema de propulsión híbrido sin arriesgar su autonomía en la navegación. También Díaz (2019), determinó que una embarcación menor puede obtener la potencia necesaria en sus motores principales con el uso de paneles solares y un banco de baterías. Otra de las alternativas propuestas es utilizar el sistema de conexión a tierra. El autor *Adamo et al.* (2013), menciona que el uso del sistema eléctrico en puerto para abastecer a los barcos atracados implicaría una probable reducción de alrededor del 94% de las emisiones de NOx, 42% de las de CO₂ y 90% de las PM, trayendo beneficios sociales y al medio ambiente por la reducción del uso de combustibles de alto contenido de azufre.

X. Conclusiones

Los principales hallazgos de este proyecto de investigación fueron:

Las mayores emisiones de NO_x y SO₂ provinieron del barco tipo granelero debido a que permanecen el 29% de horas operando en puerto, seguido del portacontenedores especializado por sus dimensiones, potencia de sus motores y demanda de consumo de combustible.

El sistema de reducción catalítica (SCR) representó el sistema de control apropiado para minimizar el 90% las emisiones de NO_x de los buques, mientras que, el sistema lavador de gases tuvo una reducción del 98% para SO₂. Finalmente, el uso combinado de SCR + Lavador de gases redujo al 99% la emisión de NO_x y SO₂.

Después de analizar el método analítico jerárquico, se encontró una priorización del 37% para el uso de un sistema de control SCR con el 3.5% de contenido de azufre, debido a que se consideran costos de equipo de \$225,000, y un costo de combustible de \$436 por Mg, a diferencia de utilizar un 0.5% de contenido de azufre en donde el costo de combustible no es viable.

El uso de un combustible con bajo contenido de azufre y la combinación de los sistemas de control VYCON REGEN® y VYCON DPF® es la mejor opción para la reducción de las emisiones de las grúas tipo RTG hasta un 91%.

El uso de un sistema de control combinado, lavador de gases + SCR, logró reducir la concentración de SO₂ al 200% (0.15 ppb), a diferencia de 37 ppb cuando se considera un sistema de control SCR. En el caso de la concentración de NO_x se reduce al 160% (0.84 ppb) cuando se considera un sistema de control SCR.

Las estrategias ambientales que son aplicables para prevenir, minimizar y controlar las emisiones atmosféricas provenientes del puerto de Veracruz, corresponden al uso de combustibles limpios y alternos, sistemas de control de emisiones, uso de paneles solares, vehículos eléctricos e híbridos, conexiones a tierra, reducción de la velocidad de los barcos, minimizar los tiempos de arribo y zarpe, almacenamiento de productos a granel en espacios confinados, grúas tipo tornillo, uso de lonas de protección en el proceso del Sandblast, manipulación de carga agrícola y mineral, implementación de tarifas y compensaciones monetarias por operar de manera sustentables.

XI. Recomendaciones

Para posteriores estimaciones de concentraciones de gases contaminantes provenientes de buques mercantes se recomienda ampliar el tamaño de muestra, incluyendo la totalidad de las fuentes emisoras de acuerdo con el máximo de embarcaciones que pueden atracar en los muelles del recinto portuario de Veracruz.

Para la realización de futuras estimaciones se sugiere complementar el análisis con gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos tóxicos, a fin de estimar la tasa total de emisiones e identificar si éstas dependen de algún factor en específico como el tiempo de operación, tipo de combustible, etc. Aunado a lo anterior, evaluar su comportamiento respecto a la dispersión y la concentración, considerando la meteorología del sitio.

Se necesita contar con información más específica de las actividades y equipos utilizados en las cesionarias, ya que cada una de ellas realiza distintas operaciones portuarias, además de utilizar diferentes tipos de grúas, almacenes, vehículos de carga, etc., y recabar características técnicas de los motores (potencia y tipo) y dimensiones estructurales de las embarcaciones.

Realizar la estimación de las emisiones con diferentes estrategias técnicas y de operación, que involucren distintas alternativas para todos los contaminantes criterio o de efectivo invernadero con el objetivo de encontrar cual es la más adecuada.

Considerar la realización de mediciones en campo de las concentraciones de contaminantes atmosféricos presentes en el área de estudio y comparar los resultados con los obtenidos de modelos de dispersión, a fin de validar los resultados.

XII. Referencias bibliográficas

Administración Portuaria Integral de Veracruz (APIVER). (2017). *Programa Maestro de Desarrollo Portuario del Puerto de Veracruz-2016-2021*.

Adamo, F., Andria, G., Cavone, G., De Capua, C., Lanzolla, A.M.L., Morello, R., Spadavecchia, M. (2013). Estimation of ship emissions in the port of Taranto. *Measurement*, 47, 982-988.

Barregard, L., Molnar, P., Jonson, E.J., Stockfelt, L., (2019). Impact on population health of Baltic shipping emissions. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 1-11.

Campling, P., Janssen, L., Vanherle, K., Cofala, J., Heyes, Sander, R. (2013) Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emissions control areas in European Seas. Recuperado el 11 de junio de 2020, de Vision on technology: http://www.assoporti.it/media/1504/finalreport_vito_internationalshipping_15march-main.pdf

Chul-hwan, H. (2010). *Strategies to Reduce Air Pollution in Shipping Industry*.

Defra UK Ship Emissions Inventory Final Report. (2010).

Densberger, N. L., & Bachkar, K. (2022). Towards accelerating the adoption of zero emissions cargo handling technologies in California ports: Lessons learned from the case of the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Journal of Cleaner Production*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131255>

Díaz-Vázquez, A.M. (2019). Modelación de un catamarán eléctrico utilizando como generador de electricidad paneles solares y un banco de baterías. Tesis de Licenciatura, Universidad Veracruzana, Boca del Río.

Donateo, A. Gregoris, E., Gambaro, A., Merico, E. (2014). Contribution of harbor activities and ship traffic to PM_{2.5}, particle number concentrations and PAHs in a port city of the Mediterranean Sea (Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 9415–9429.

EPA. (2022, June 27). *Cartilla de puertos: Emisiones al aire EPA de EE. UU.* <https://www.epa.gov/community-port-collaboration/ports-primer-72-air-emissions>

Fahdi, S., Elkhechafi, M., & Hachimi, H. (2019). *Green Port in Blue Ocean: Optimization of Energy in Asian Ports* (Vol. 31). IEEE.

Fontelle, J.-P., Fridell, E., Grigoriadis, A., Hill, N., Kilde, N., Lavender, K., Mamarikas, S., Reynolds, G., Rypdal, K., Thomas, R., Webster, A., & Winther, M. (n.d.). *Category Title NFR 1.A*.

Finlayson-Pitts, B.J.; Pitts, J.N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1–969.

Geronimo-Miguel, J. C., Sanchez-Mondragon, J., Cruces-Giron, A. R., & Hernandez-Hernandez, J. (2022). Analysis of vessel hybrid engine upgrade by a CFD study. *Ships and Offshore Structures*, 17(2), 448–456. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1835049>

GIOMEPP, & IMO. (2018). *Herramientas Para Las Emisiones Portuarias Guía N.º 1: Evaluación de las emisiones portuarias*. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/Port-emissions-toolkit-Guide-1-ES-online_compressed.pdf

- Han, C. H. (2010). Strategies to reduce air pollution in shipping industry. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 26(1), 7–29. [https://doi.org/10.1016/S2092-5212\(10\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S2092-5212(10)80009-4)
- Hossain, T., Adams, M., & Walker, T. R. (2019). Sustainability initiatives in Canadian ports. *Marine Policy*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103519>
- ICCT. (2012). *Developing Port Clean Air Programs*. https://theicct.org/sites/default/files/ICCT_SCG_Developing-Clean-Air-Programs_June2012.pdf
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multicriteria Decision Analysis: Methods and Software*. 1–25.
- Joseph, J., Patil, R. S., & Gupta, S. K. (2009). Estimation of air pollutant emission loads from construction and operational activities of a port and harbour in Mumbai, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1–4), 85–98. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0614-x>
- Jahangiri, S., Nikolova, N., Tenekedjiev, K., (2018). An improved emission inventory method for estimating engine exhaust emissions from ships. *Sustain. Environ. Res.* 28, 374–381.
- Kotrikla, A. M., Lilas, T., & Nikitakos, N. (2017). Abatement of air pollution at an aegean island port utilizing shore side electricity and renewable energy. *Marine Policy*, 75, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.01.026>
- Lakes Environmental. (2021). SCREEN View Freeware (Versión 4.0.1) [Software]. Lakes Software. <https://www.weblakes.com/products/screen/index.html>
- Lee, P. T. W., Kwon, O. K., & Ruan, X. (2019). Sustainability challenges in maritime transport and logistics industry and its way ahead. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su11051331>
- Liang, C.S., Duan, F.K., He, K. Bin, Ma, Y.L. (2016). Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM 2.5. *Environ. Int.* 86, 150–170.
- Liu, T. K., Sheu, H. Y., & Tsai, J. Y. (2014). Sulfur dioxide emission estimates from merchant vessels in a Port area and related control strategies. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1), 413–421. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.02.0061>
- López-Aparicio, S., Tønnesen, D., Thanh, T. N., & Neilson, H. (2017). Shipping emissions in a Nordic port: Assessment of mitigation strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.021>
- Mendez Espinosa, J. F., & Guevara Luna, M. A. (2022). Uso del modelo de dispersión de contaminantes Screen View. *Notas De Campus*, 1, 1-34. <https://doi.org/10.22490/notas.4626>
- Okubo, M., & Kuwahara, T. (2020). Introduction. In *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812307-2.00001-8>
- OMI. (2015, February). *MARPOL 73/78*. https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/LOTAIP2015_marpol_73_78.pdf#page18
- Osorio Gómez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. *Scientia et Technica*, 39, 1–6.

- Papaefthimiou, S., Maragkogianni, A., Andriosopoulos, K., (2016). Evaluation of cruiseships emissions in the Mediterranean basin: the case of Greek ports. *Int. J. Sustain. Transp.* <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1185484>, 00e00, 8318.
- Patel, J.S., Kumar, N., Deep, A., Sharma, A., Gupta, D., (2014). Evaluation of emission characteristics of blend of algae oil methyl ester with diesel in a medium capacity diesel engine. *SAE International*. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1378>
- Ramacher, M.O.P., Karl, M., Bieser, J., Jalkanen, J.-P., Johansson, L. (2019). Urban population exposure to NOx emissions from local shipping in three Baltic Sea harbour cities – a generic approach. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 1–45. <https://doi.org/10.5194/acp-2019-127>
- Seddiek, I. S., & Elgohary, M. M. (2014). Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SOx and NOx emissions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 737–748. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0209>
- Sifakis, N., & Tsoutsos, T. (2021). Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 286). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125448>
- Toskano Hurtado, G. B. (2018). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la. *European Journal of Operational Research*, 48, 1–21.
- UNCTAD. (2022a). *Naciones Unidas PANORAMA GENERAL PANORAMA GENERAL*.
- UNCTAD. (2022b). *REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2021*. UNITED NATIONS.
- Whiteman, C.D., Hoch, S.W., Horel, J.D., Charland, A., 2014. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmos. Environ.* 94, 742-753.
- Xia, Z., Guo, Z., Wang, W., & Jiang, Y. (2021). Joint optimization of ship scheduling and speed reduction: A new strategy considering high transport efficiency and low carbon of ships in port. *Ocean Engineering*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109224>
- Ye, S.Q. (2014). Study of Characteristics of Marine Vessel Emission and its Impact on Regional Air Quality of the Pearl River Delta Region. South China University of Technology Guangzhou, Ch
- Yin, Z.B., Li, Z.Q., Sun, P.T., (2005). Experimental investigation on NOx-emission of a marine medium diesel engine and discussion on NOx-emission measurement on board. *China Sustainable Transportation*. 27, 81–84.
- Zis, T. P. V. (2019). Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 119, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.003>
- Zopounidis, C.; Doumpos, M. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *Eur. J. Oper. Res.* 2002, 138, 229–246

XIII. Anexos

A. Resultados de las emisiones por año con sus diferentes porcentajes de azufre

Las tablas que se ilustran a continuación muestran los resultados de las emisiones en Mg/año de los diferentes contaminantes analizados a distintos porcentajes de contenido de azufre en el combustible y por las actividades portuarias analizadas, del año 2018, 2019, 2020 y 2021.

Tabla 23. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 3.5% del año 2018						
	NOx 3.5%	SO ₂ 3.5%	PM ₁₀ 3.5%	PM _{2.5} 3.5%	CO 3.5%	CO ₂ 3.5%
Maniobra	66.7	44.5	7.3	7.3	6.9	2,022.1
Estadía	361.0	312.5	23.5	23.5	24.7	12,403.7
Total	427.7	357.0	30.8	30.8	31.6	14,425.8

Tabla 24. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 2.5% del año 2018						
	NOx 2.5%	SO ₂ 2.5%	PM ₁₀ 2.5%	PM _{2.5} 2.5%	CO 2.5%	CO ₂ 2.5%
Maniobra	53.3	25.7	3.5	3.5	6.4	2,613.7
Estadía	279.1	225.7	12.9	12.9	33.1	18,650.2
Total	332.4	251.4	16.5	16.5	39.5	21,263.9

Tabla 25. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.5% del año 2018						
	NOx 0.5%	SO ₂ 0.5%	PM ₁₀ 0.5%	PM _{2.5} 0.5%	CO 0.5%	CO ₂ 0.5%
Maniobra	51.6	6.1	1.6	1.6	3.7	1,783.9
Estadía	291.4	43.9	5.2	5.2	23.3	16,070.2
Total	343.1	50.1	6.8	6.8	26.9	17,854.1

Tabla 26. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.1% del año 2018						
	NOx 0.1%	SO ₂ 0.1%	PM ₁₀ 0.1%	PM _{2.5} 0.1%	CO 0.1%	CO ₂ 0.1%
Maniobra	12.7	1.5	2.2	2.2	7.0	2,418.7
Estadía	61.5	10.5	9.7	9.7	34.3	17,003.8
Total	74.1	12.0	11.9	11.9	41.3	19,422.5

Tabla 27. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 3.5% del año 2019						
	NOx 3.5%	SO ₂ 3.5%	PM ₁₀ 3.5%	PM _{2.5} 3.5%	CO 3.5%	CO ₂ 3.5%
Maniobra	73.3	49.4	8.5	8.5	8.0	3,273.7
Estadía	482.6	390.2	31.5	31.5	33.0	26,717.4
Total	555.9	439.5	40.0	40.0	41.0	29,991.2

Tabla 28. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 2.5% del año 2019						
	NOx 2.5%	SO ₂ 2.5%	PM ₁₀ 2.5%	PM _{2.5} 2.5%	CO 2.5%	CO ₂ 2.5%
Maniobra	62.3	194.3	4.1	4.1	6.4	3,030.8
Estadía	467.4	190.8	16.9	16.9	30.5	24,363.8
Total	529.7	385.1	21.1	21.1	36.9	27,394.6

Tabla 29. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.5% del año 2019						
	NOx 0.5%	SO ₂ 0.5%	PM ₁₀ 0.5%	PM _{2.5} 0.5%	CO 0.5%	CO ₂ 0.5%
Maniobra	54.5	7.2	1.4	1.4	4.2	2,906.2
Estadía	365.8	57.6	6.8	6.8	30.5	23,371.2
Total	420.3	64.8	8.2	8.2	34.7	26,277.3

Tabla 30. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.1% del año 2019						
	NOx 0.1%	SO ₂ 0.1%	PM ₁₀ 0.1%	PM _{2.5} 0.1%	CO 0.1%	CO ₂ 0.1%
Maniobra	12.7	1.8	2.6	2.6	5.5	2,826.3
Estadía	72.0	14.5	12.6	12.6	33.9	23,729.3
Total	84.7	16.3	15.2	15.2	39.3	26,555.5

Tabla 31. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 3.5% del año 2020						
	NOx 3.5%	SO ₂ 3.5%	PM ₁₀ 3.5%	PM _{2.5} 3.5%	CO 3.5%	CO ₂ 3.5%
Maniobra	72.1	50.0	8.2	8.4	7.7	3,084.5
Estadía	388.9	337.3	25.5	27.1	30.5	21,020.1
Total	461.0	387.3	33.7	35.5	38.1	24,104.7

Tabla 32. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 2.5% del año 2020						
	NOx 2.5%	SO ₂ 2.5%	PM ₁₀ 2.5%	PM _{2.5} 2.5%	CO 2.5%	CO ₂ 2.5%
Maniobra	61.3	43.0	4.0	4.0	6.1	2,939.5
Estadía	375.6	289.7	13.7	13.7	24.7	19,800.5
Total	436.8	332.7	17.7	17.7	30.7	22,740.0

Tabla 33. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.5% del año 2020						
	NOx 0.5%	SO ₂ 0.5%	PM ₁₀ 0.5%	PM _{2.5} 0.5%	CO 0.5%	CO ₂ 0.5%
Maniobra	65.8	6.9	1.4	1.4	4.1	2,796.9
Estadía	363.6	46.6	5.5	5.5	24.7	18,932.0
Total	429.4	53.5	6.8	6.8	28.7	21,728.9

Tabla 34. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.1% del año 2020						
	NOx 0.1%	SO ₂ 0.1%	PM ₁₀ 0.1%	PM _{2.5} 0.1%	CO 0.1%	CO ₂ 0.1%
Maniobra	13.2	1.7	2.5	2.5	5.3	2,710.9
Estadía	64.2	11.8	10.7	10.7	27.4	19,226.0
Total	77.4	13.5	13.2	13.2	32.7	21,936.9

Tabla 35. Emisiones totales con un contenido de 3.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 3.5% del año 2021						
	NOx 3.5%	SO ₂ 3.5%	PM ₁₀ 3.5%	PM _{2.5} 3.5%	CO 3.5%	CO ₂ 3.5%
Maniobra	72.6	52.5	8.6	8.6	7.8	3,309.1
Estadía	475.8	398.4	40.9	40.9	40.4	24,824.0
Total	548.4	450.9	49.5	49.5	48.1	28,133.1

Tabla 36. Emisiones totales con un contenido de 2.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 2.5% del año 2021						
	NOx 2.5%	SO ₂ 2.5%	PM ₁₀ 2.5%	PM _{2.5} 2.5%	CO 2.5%	CO ₂ 2.5%
Maniobra	62.0	45.2	4.2	4.2	6.5	3,085.6
Estadía	461.6	344.4	27.3	27.3	39.9	22,717.0
Total	523.6	389.5	31.5	31.5	46.4	25,802.6

Tabla 37. Emisiones totales con un contenido de 0.5% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.5% del año 2021						
	NO _x 0.5%	SO ₂ 0.5%	PM ₁₀ 0.5%	PM _{2.5} 0.5%	CO 0.5%	CO ₂ 0.5%
Maniobra	54.3	21.5	1.4	1.4	4.3	2,935.9
Estadía	361.3	108.2	17.9	17.9	39.9	21,710.7
Total	415.5	129.7	19.3	19.3	44.2	24,646.6

Tabla 38. Emisiones totales con un contenido de 0.1% de azufre

Emisiones totales en Mg/año a 0.1% del año 2021						
	NO _x 0.1%	SO ₂ 0.1%	PM ₁₀ 0.1%	PM _{2.5} 0.1%	CO 0.1%	CO ₂ 0.1%
Maniobra	13.3	2.0	2.6	2.6	5.5	2,850.9
Estadía	76.5	39.5	24.4	24.4	43.1	22,088.6
Total	89.8	41.5	27.0	27.0	48.6	24,939.5

B. Rosas de vientos de los escenarios específicos

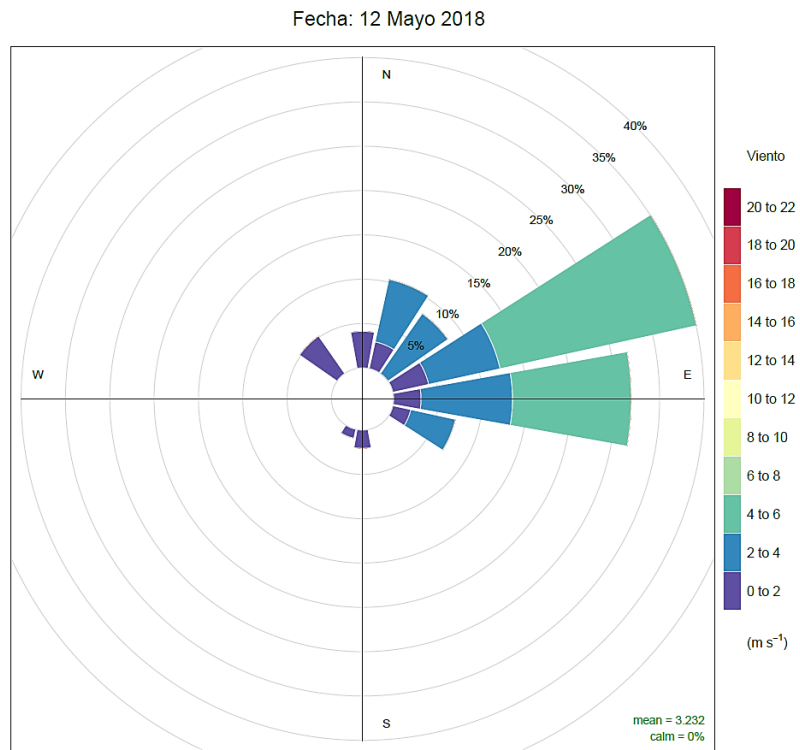


Figura 27. Rosa de vientos 12 de mayo de 2018

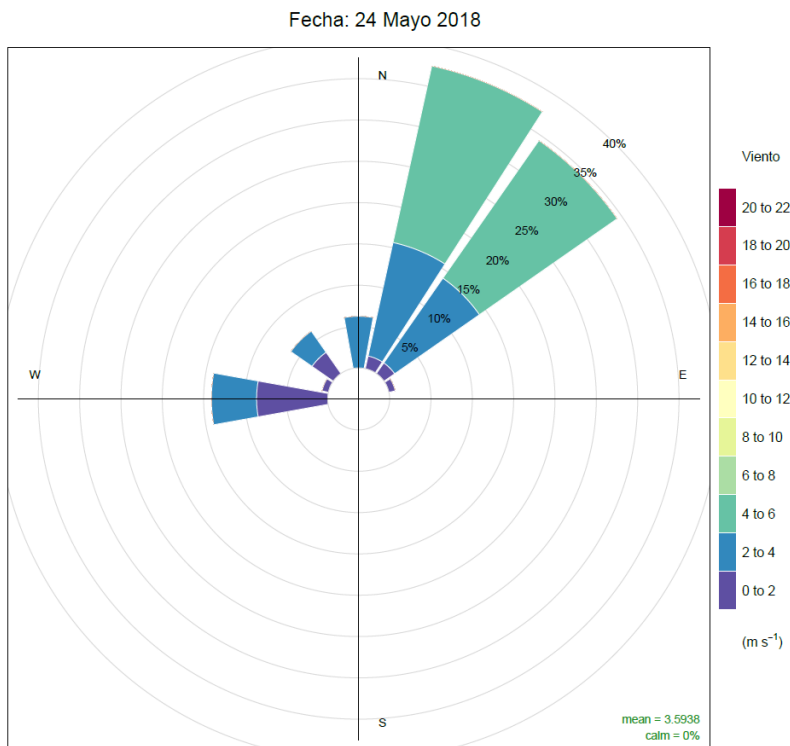


Figura 28. Rosa de vientos 24 de mayo de 2018

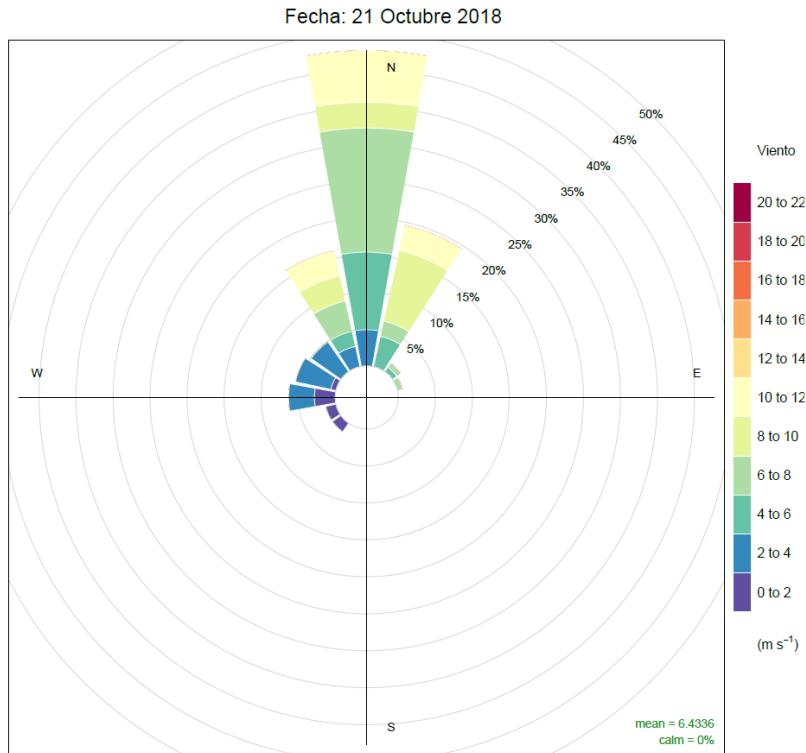


Figura 29. Rosa de vientos 21 de octubre de 2018

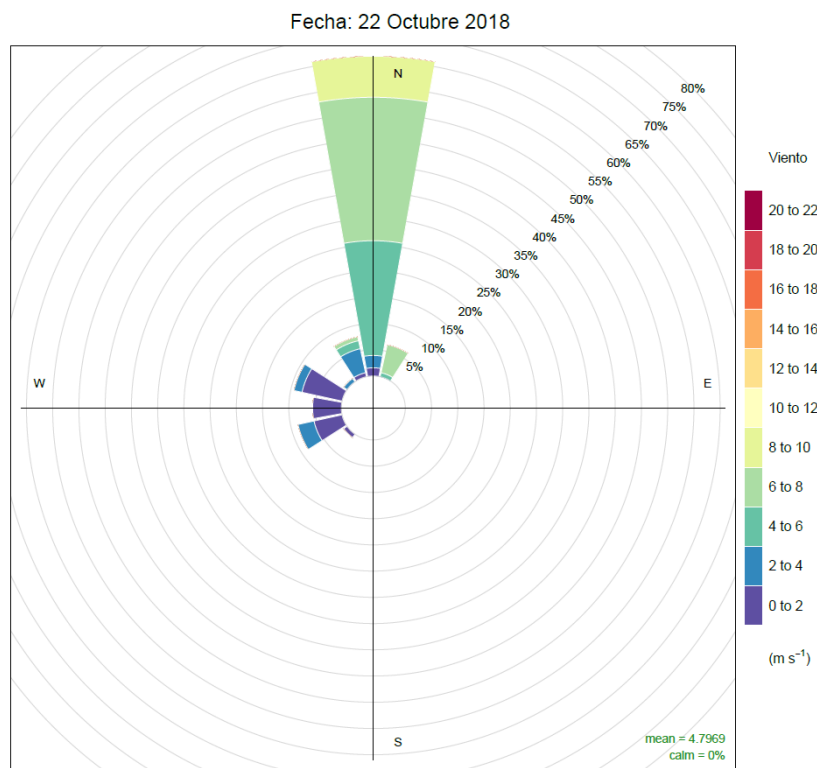


Figura 30. Rosa de vientos 22 de octubre de 2018

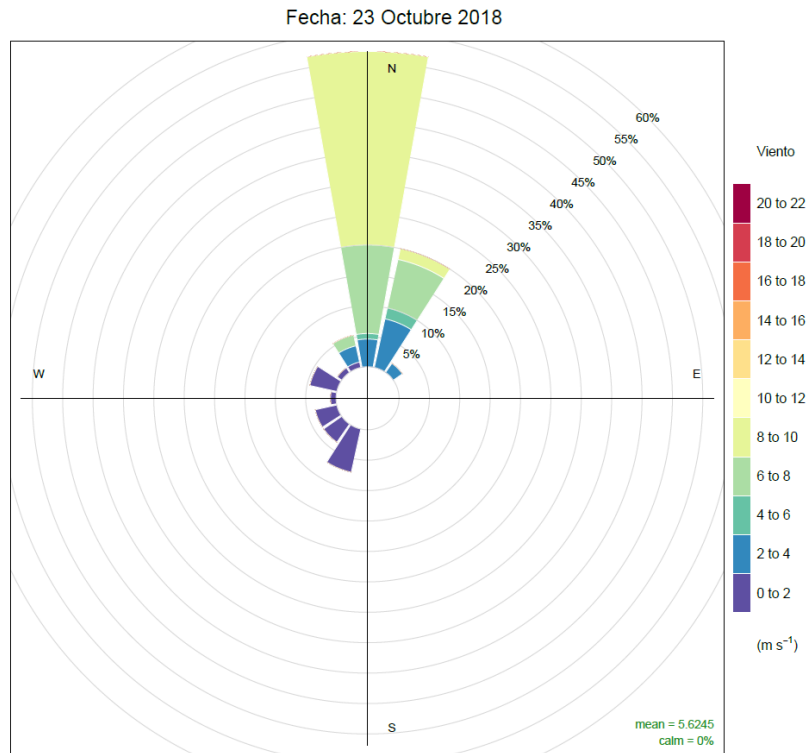


Figura 31. Rosa de vientos 23 de octubre de 2018

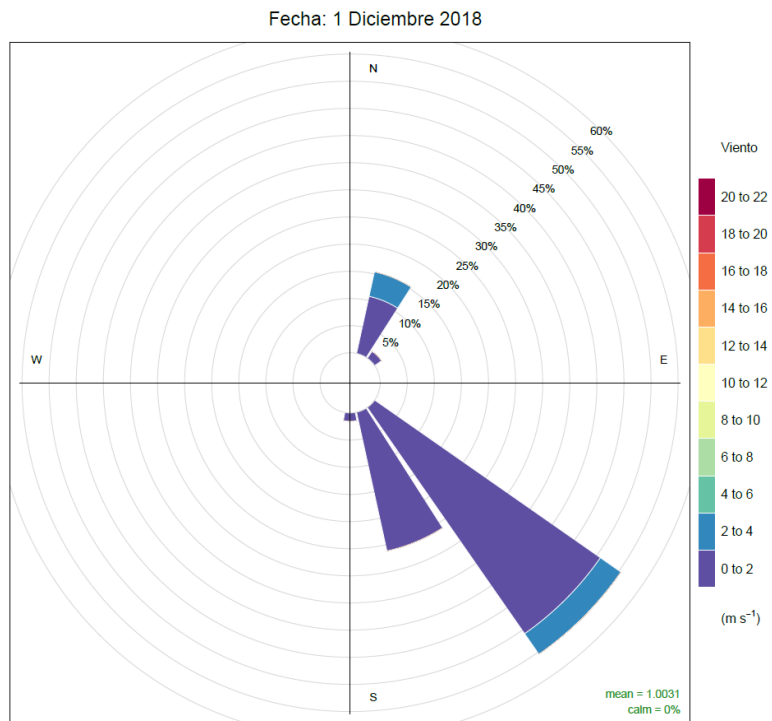


Figura 32. Rosa de vientos 01 de diciembre de 2018

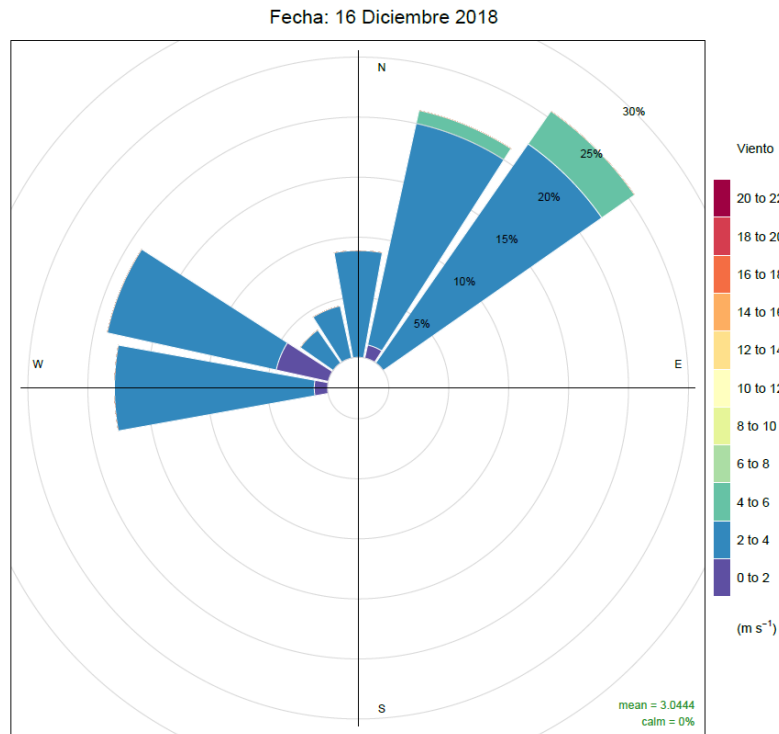


Figura 33. Rosa de vientos 16 de diciembre de 2018

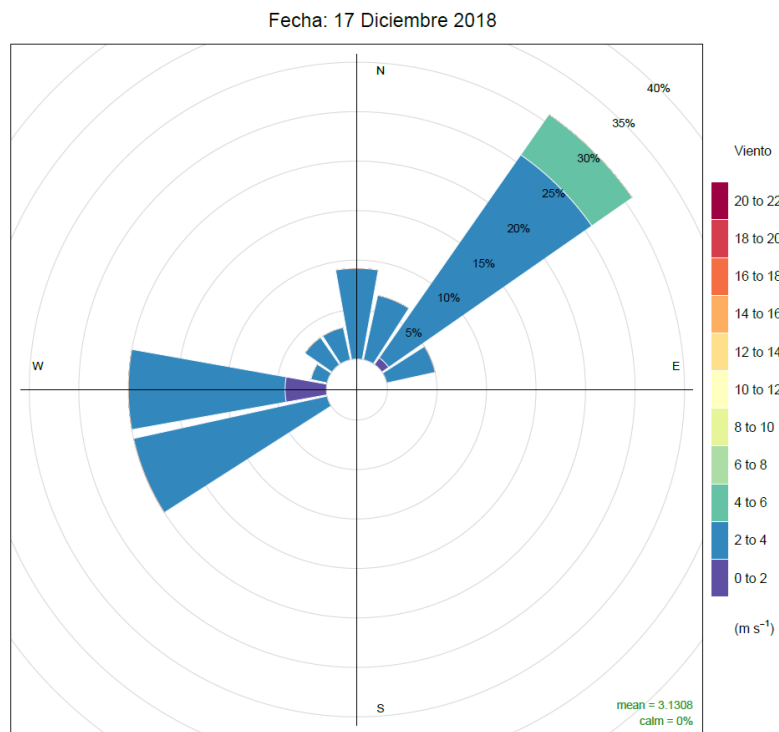


Figura 34. Rosa de vientos 17 de diciembre de 2018

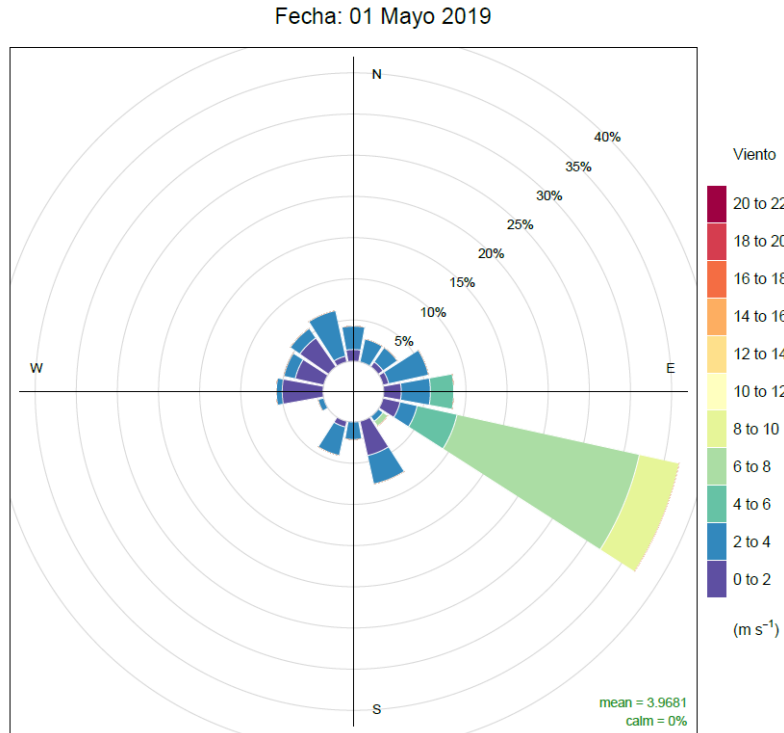


Figura 35. Rosa de vientos 01 de mayo de 2019

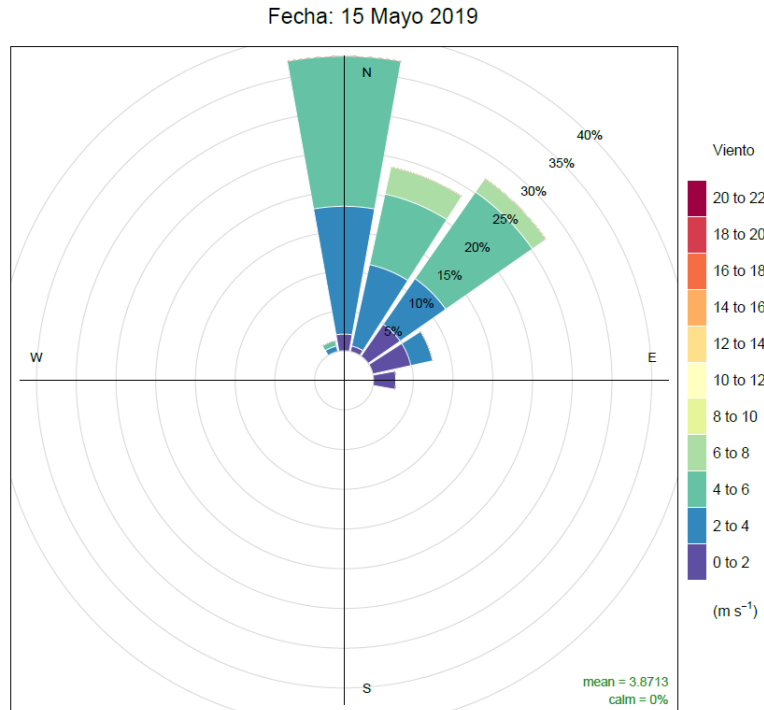


Figura 36. Rosa de vientos 15 de mayo de 2019

<

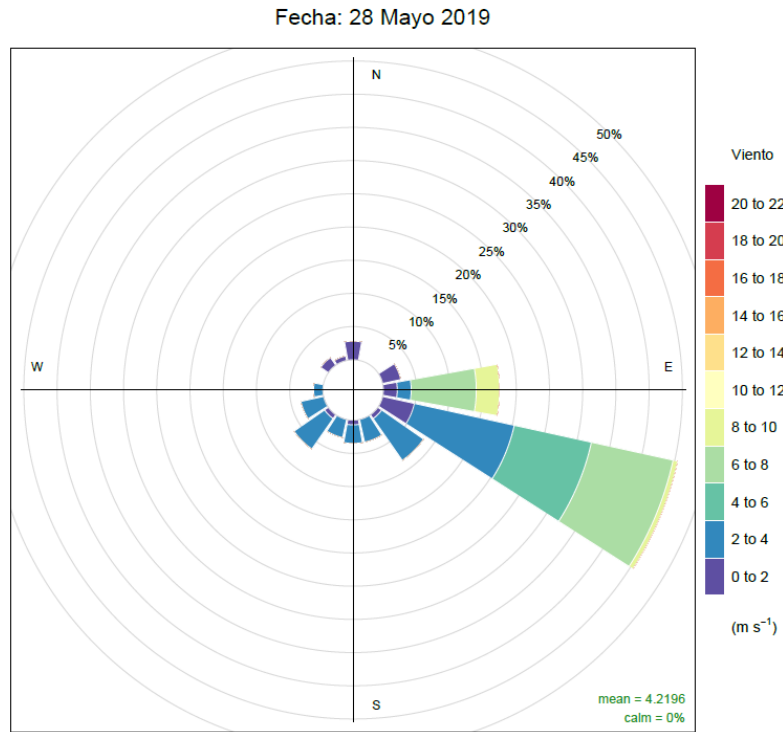


Figura 37. Rosa de vientos 28 de mayo de 2019

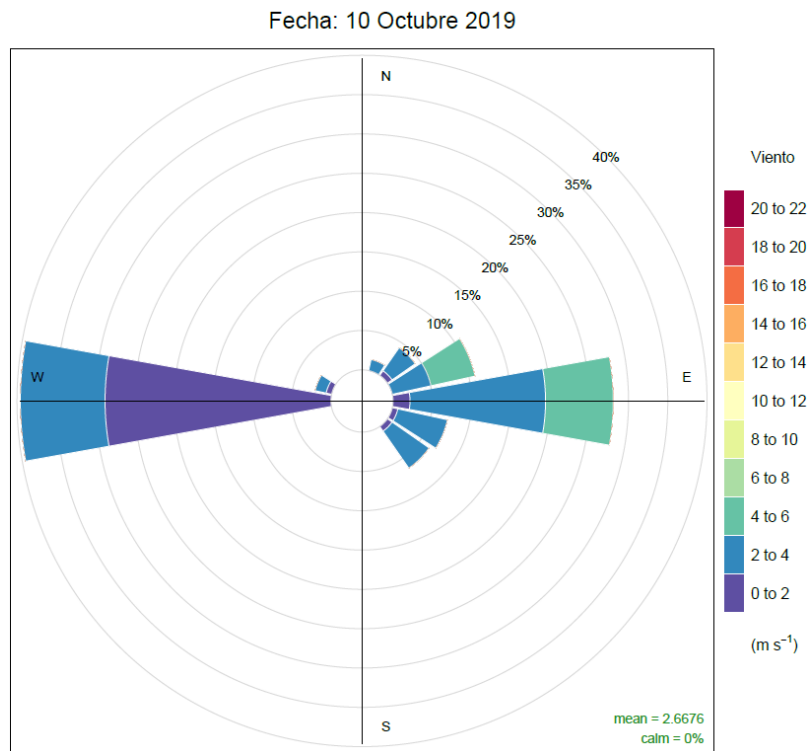


Figura 38. Rosa de vientos 10 de octubre de 2019

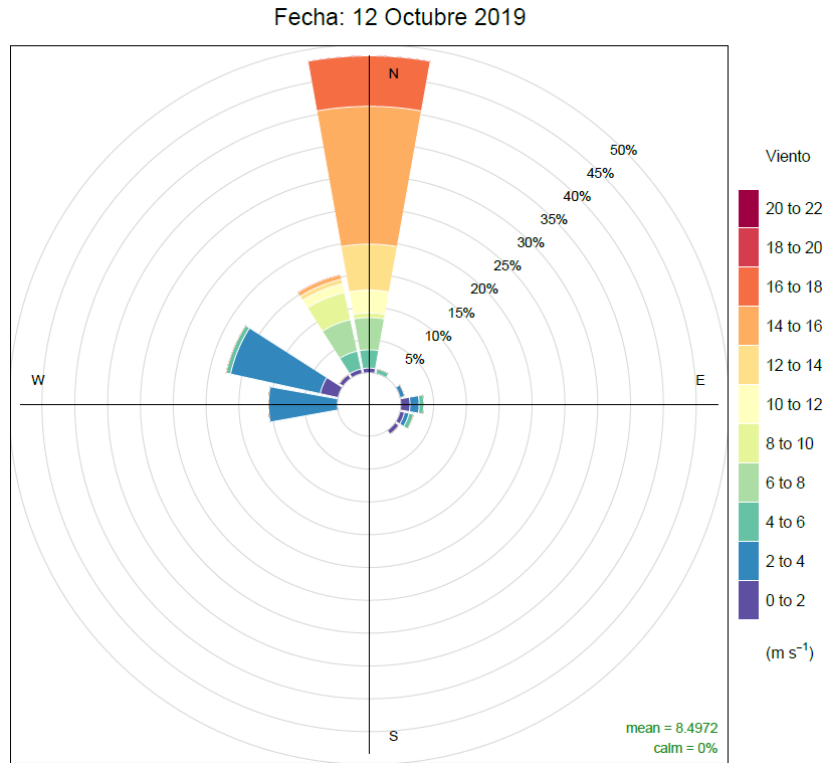


Figura 39. Rosa de vientos 12 de octubre de 2019

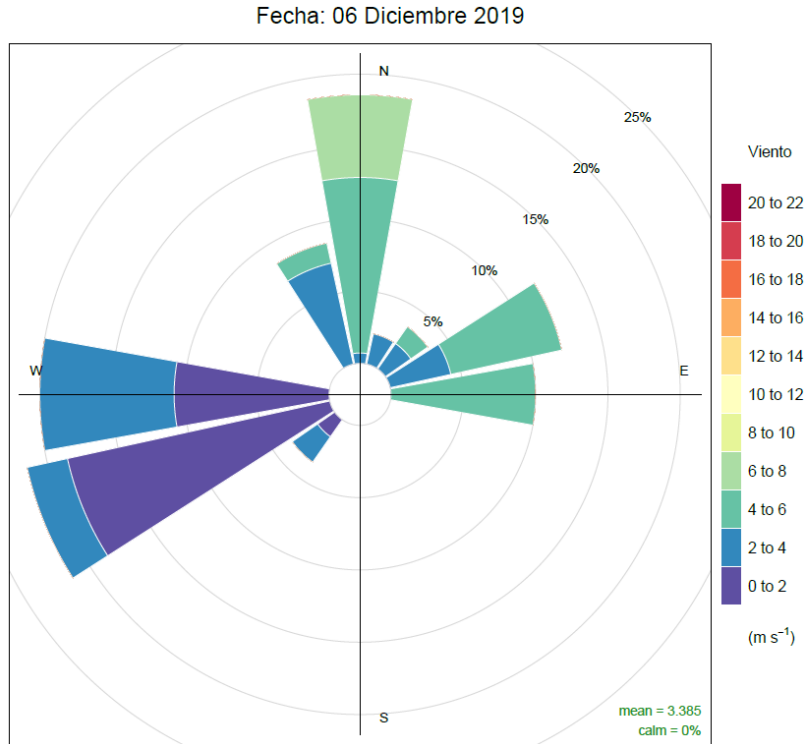


Figura 40. Rosa de vientos 06 de diciembre de 2019

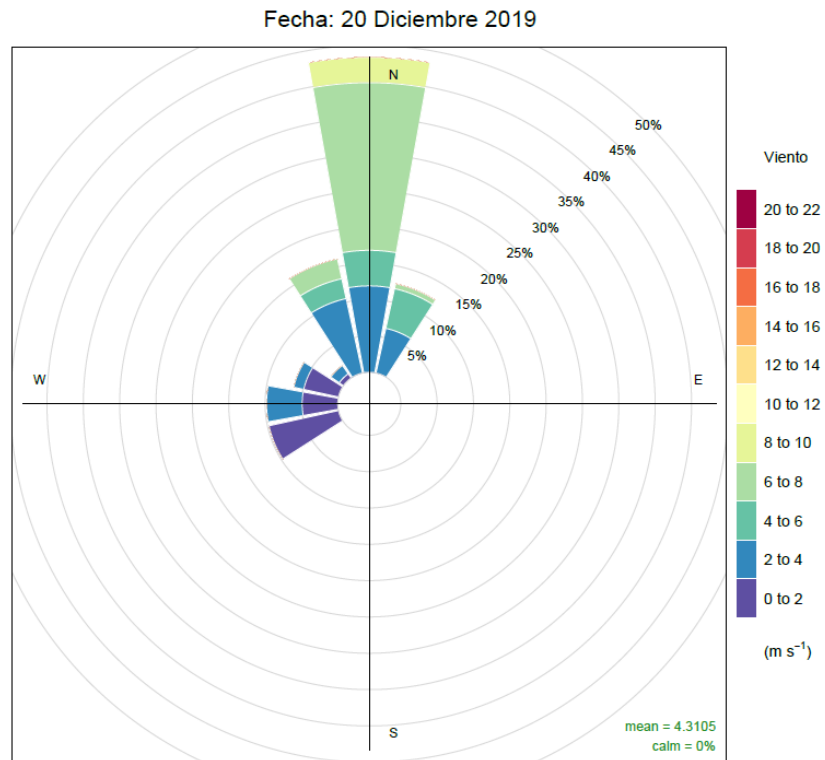


Figura 41. Rosa de vientos 20 de diciembre de 2019

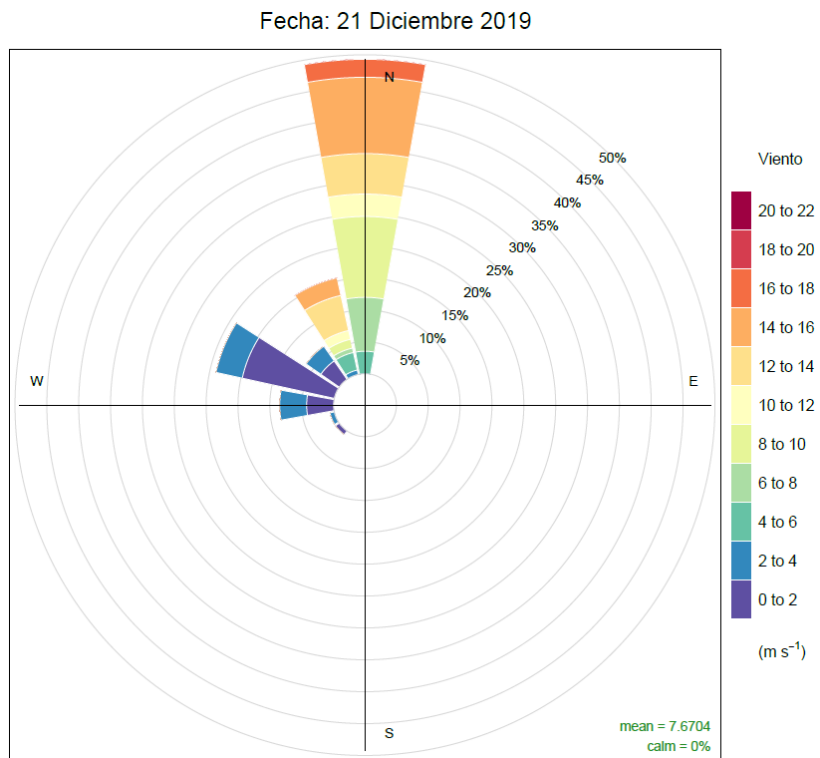


Figura 42. Rosa de vientos 21 de diciembre de 2019

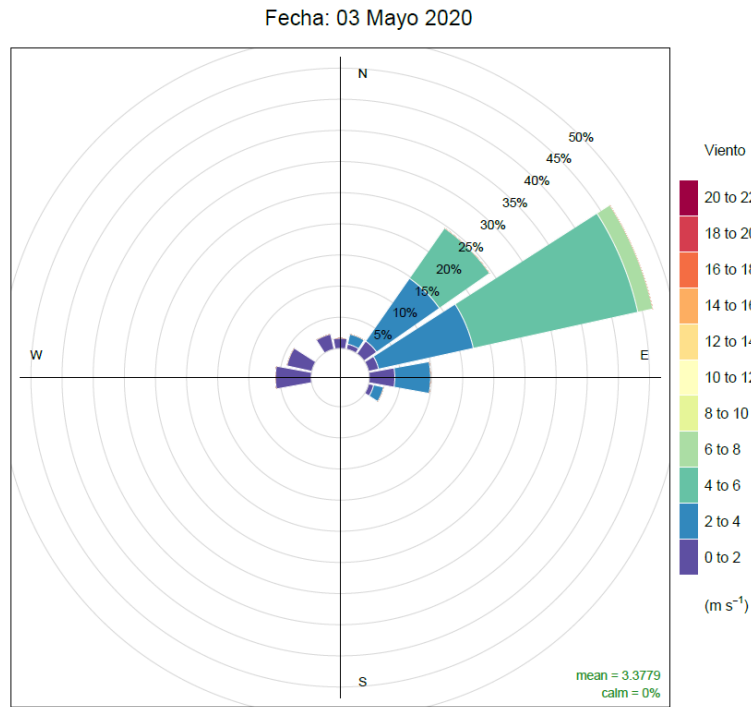


Figura 43. Rosa de vientos 03 de mayo de 2020

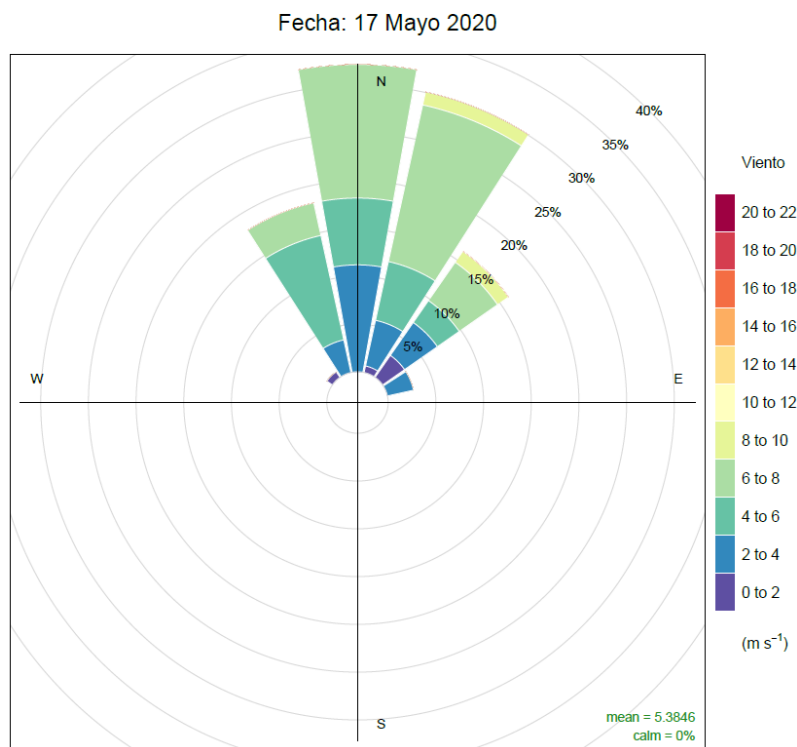


Figura 44. Rosa de vientos 17 de mayo de 2020

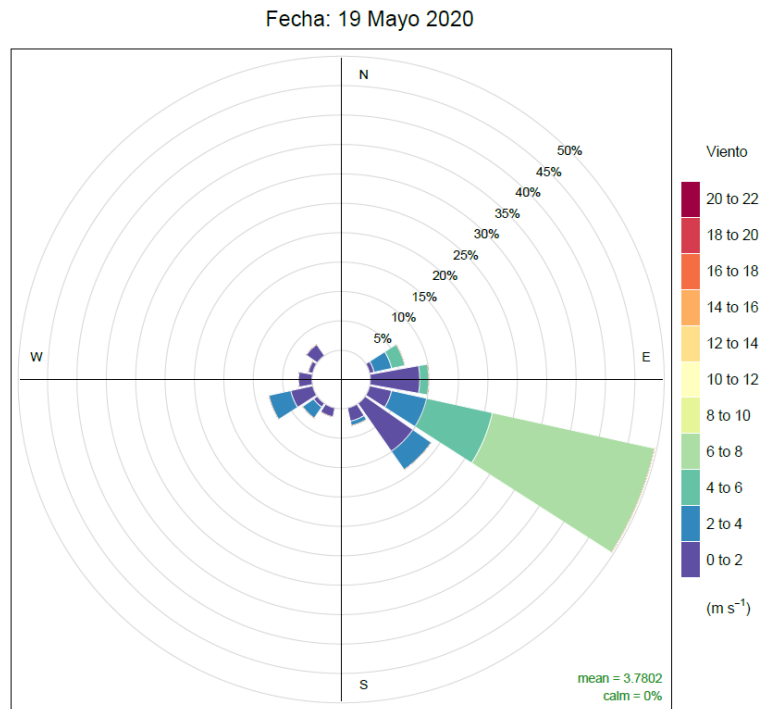


Figura 45. Rosa de vientos 19 de mayo de 2020

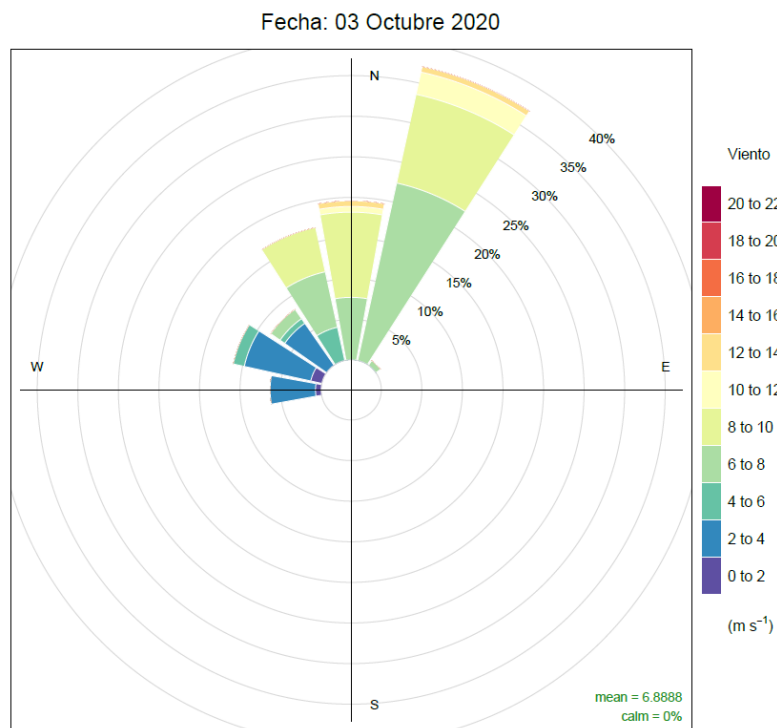


Figura 46. Rosa de vientos 03 de octubre de 2020

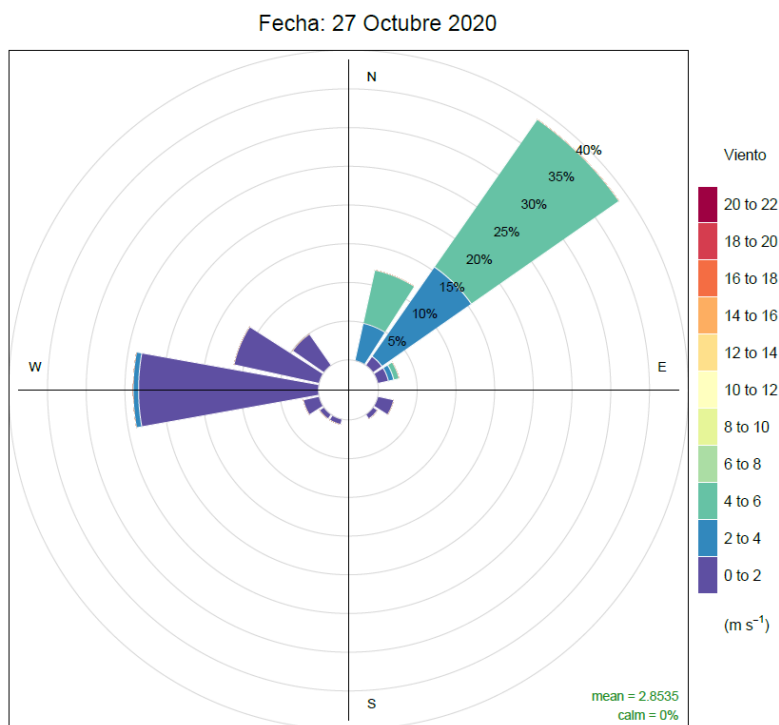


Figura 47. Rosa de vientos 27 de octubre de 2020

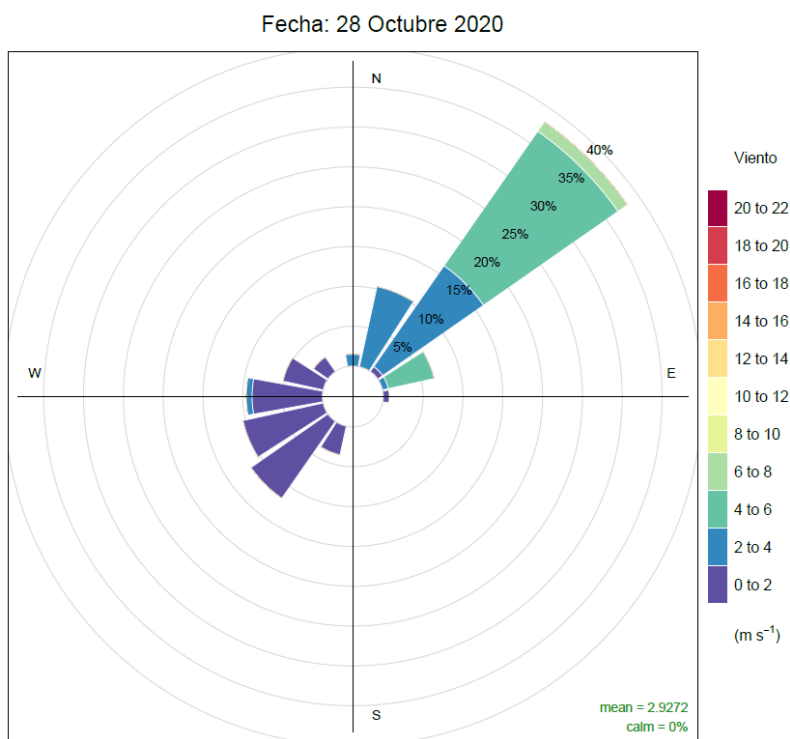


Figura 48. Rosa de vientos 28 de octubre de 2020

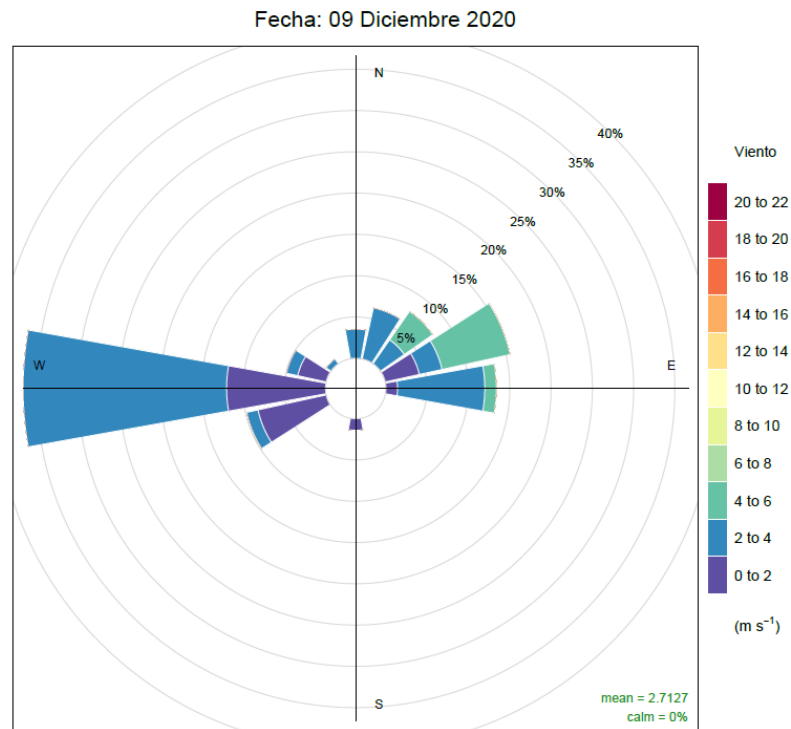


Figura 49. Rosa de vientos 09 de diciembre de 2020

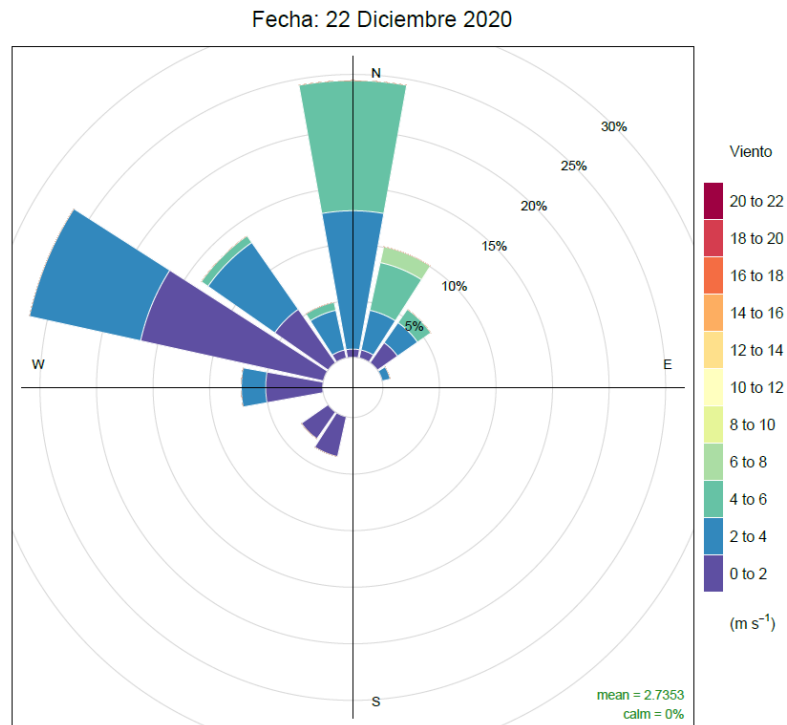


Figura 50. Rosa de vientos 22 de diciembre de 2020

C. Resultados de las concentraciones de los escenarios específicos

En las siguientes figuras, se muestran los resultados de las concentraciones de los gases SO_2 y NO_x , de los escenarios seleccionados, con sus respectivos criterios de análisis.

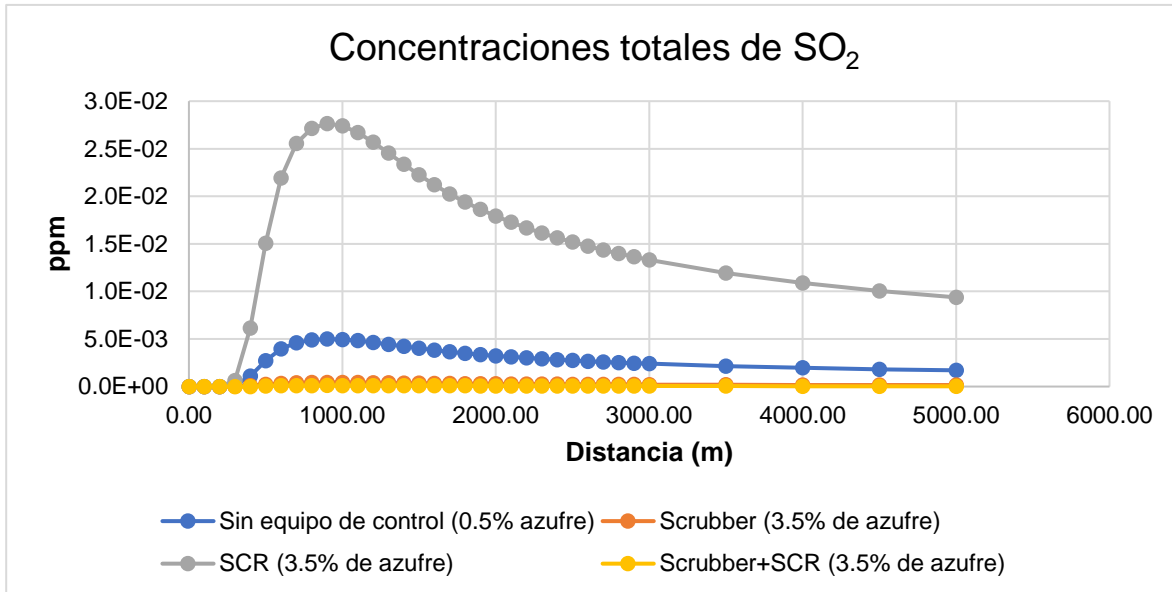


Figura 51. Concentraciones totales del 21 de octubre del 2018

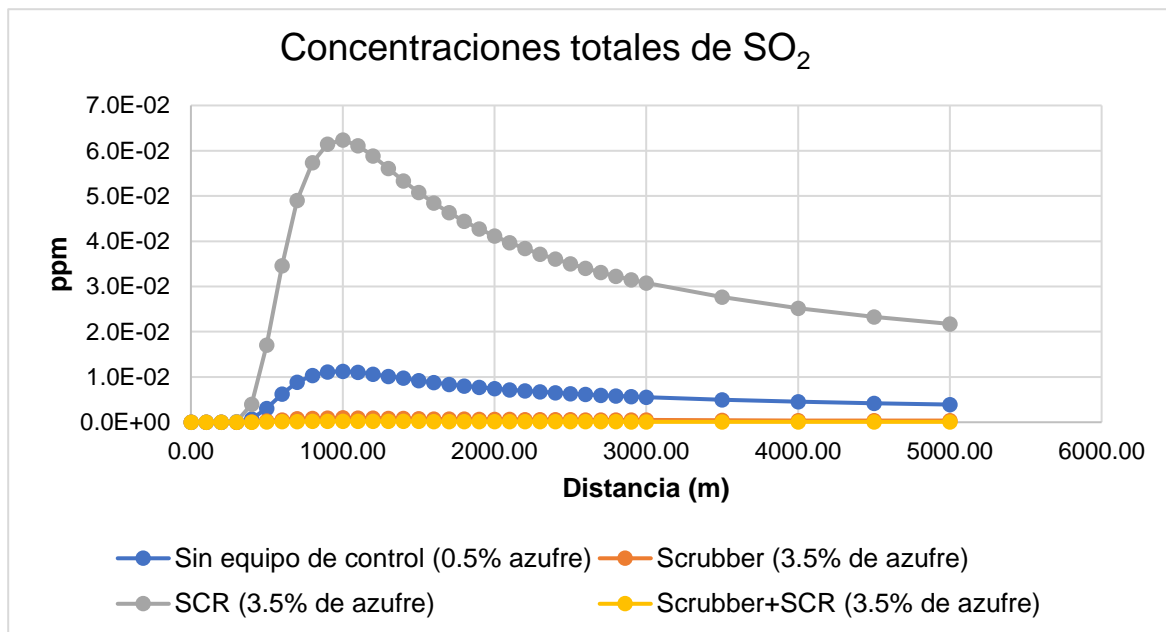


Figura 52. Concentraciones totales del 16 de diciembre del 2018

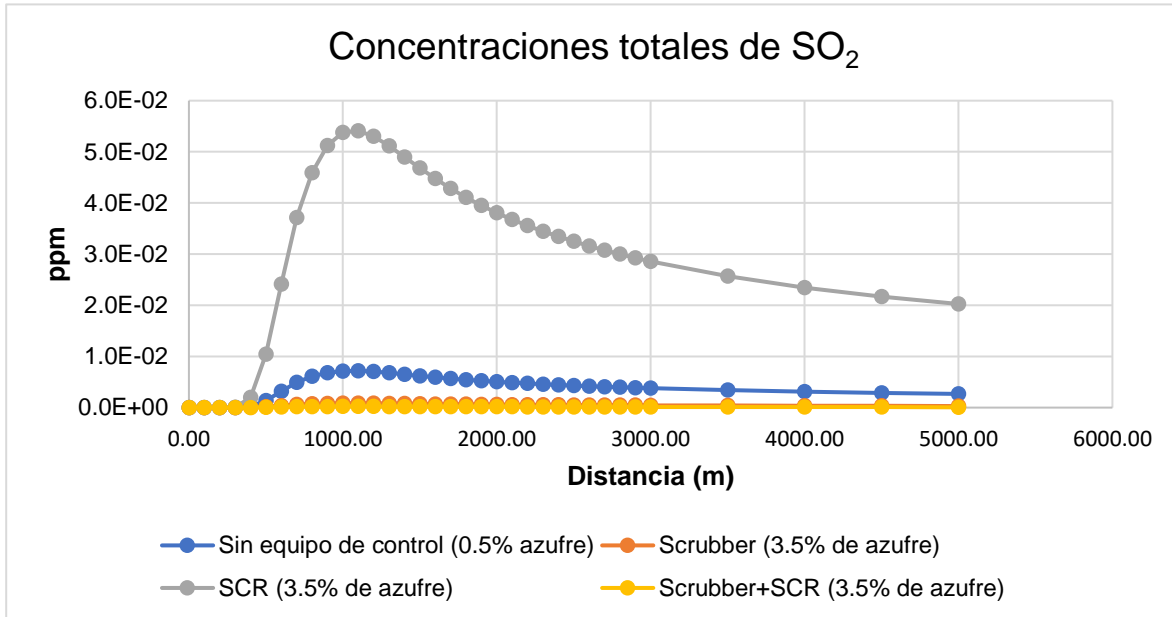


Figura 53. Concentraciones totales del 15 de mayo del 2019

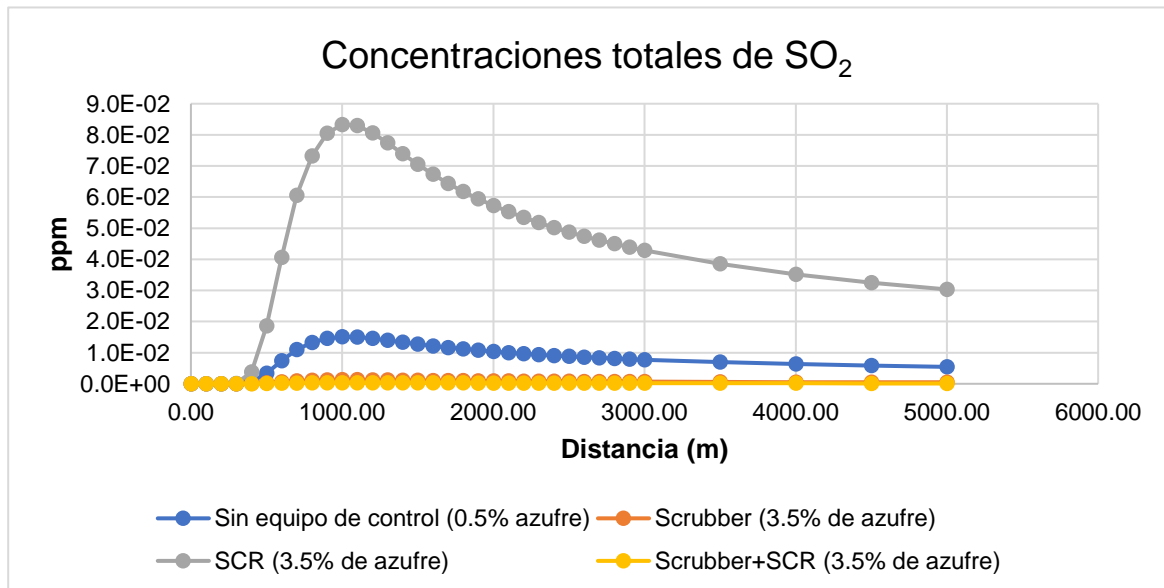


Figura 54. Concentraciones totales del 11 de octubre del 2019

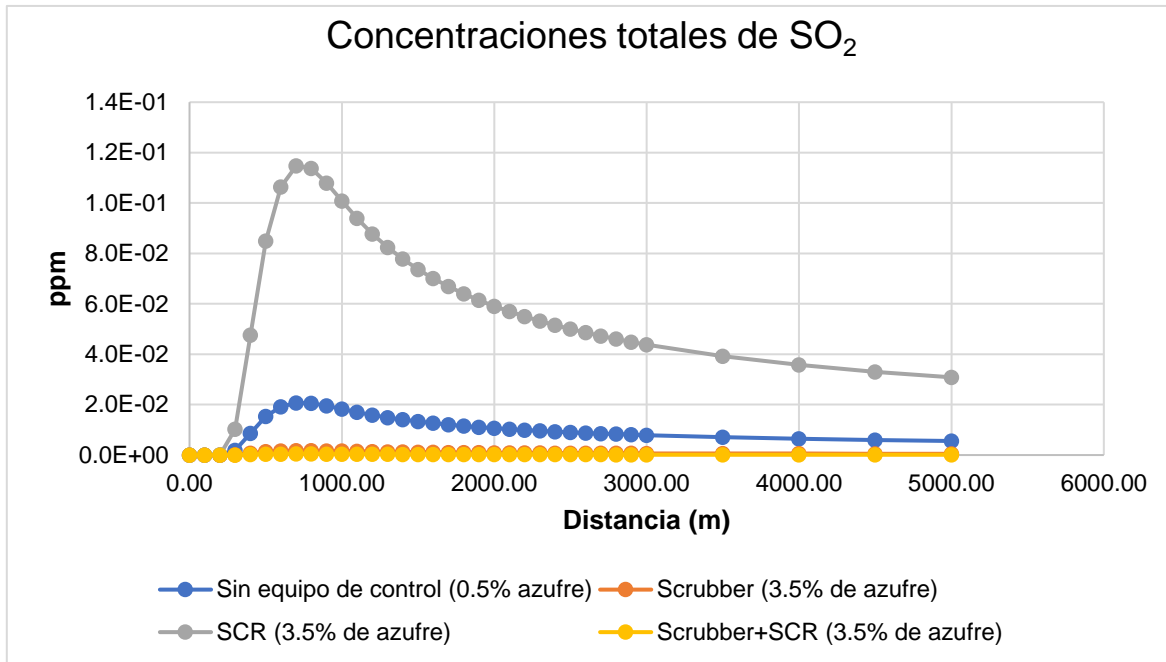


Figura 55. Concentraciones totales del 19 de diciembre del 2019

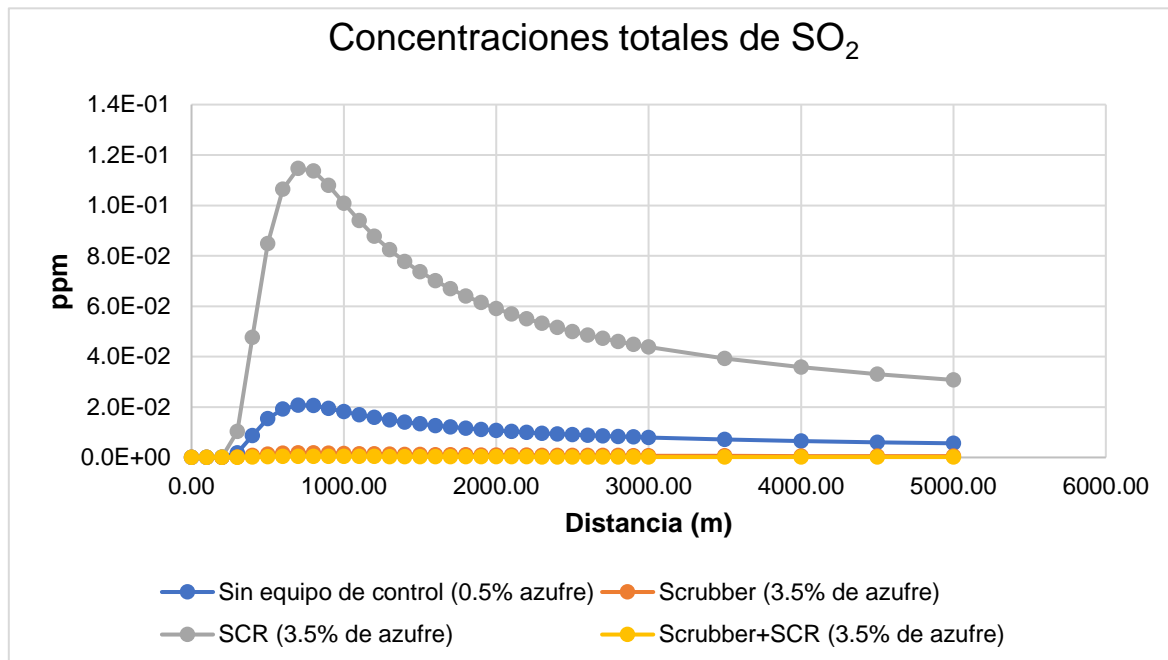


Figura 56. Concentraciones totales del 19 de mayo del 2020

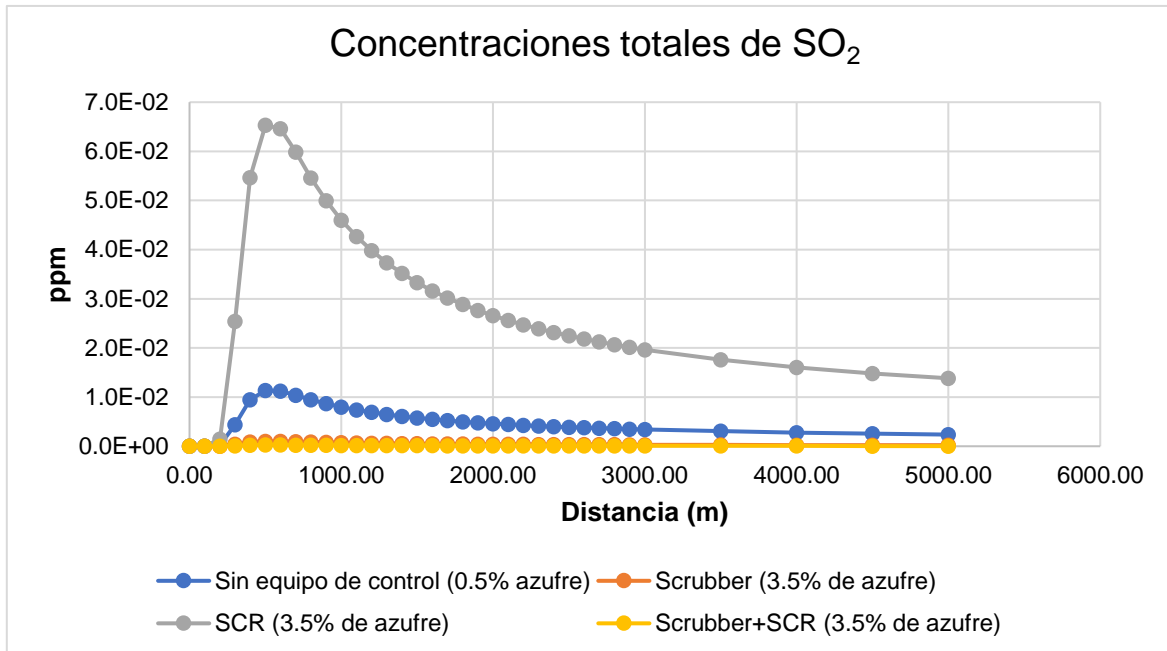


Figura 57. Concentraciones totales del 28 de octubre del 2020

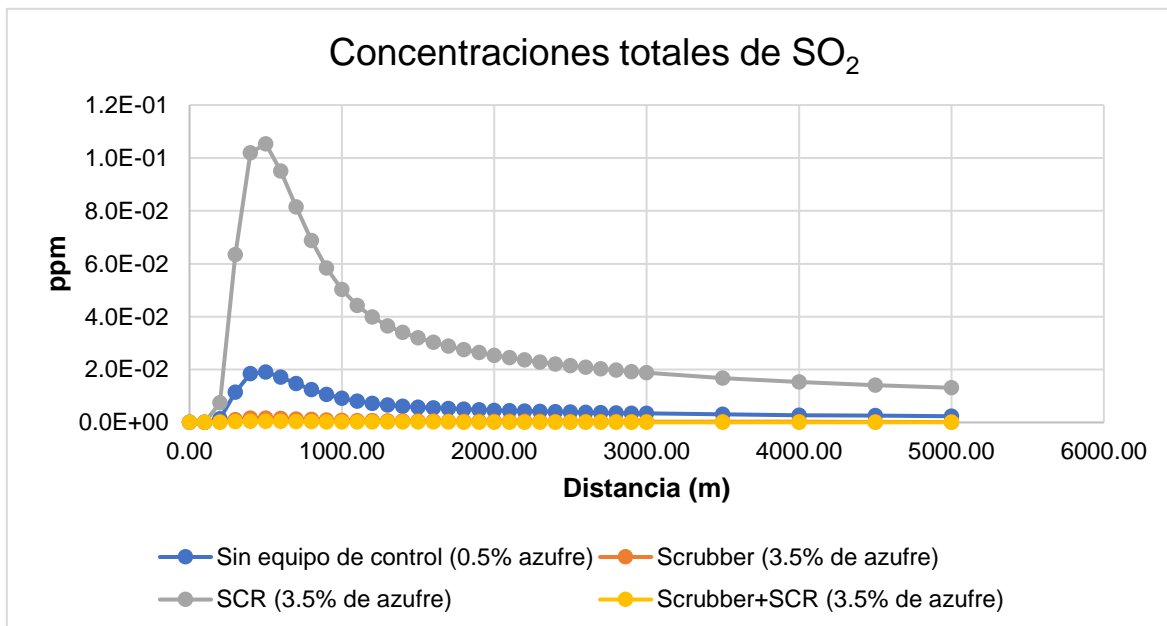


Figura 58. Concentraciones totales del 10 de diciembre del 2020

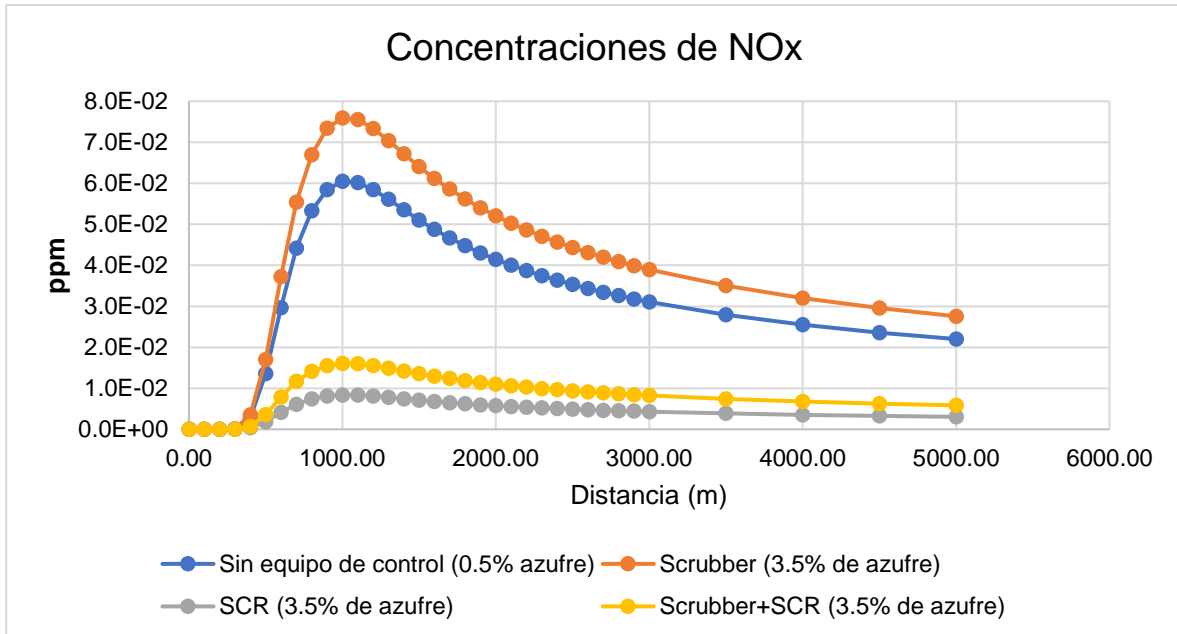


Figura 59. Concentraciones totales del 21 de octubre del 2018

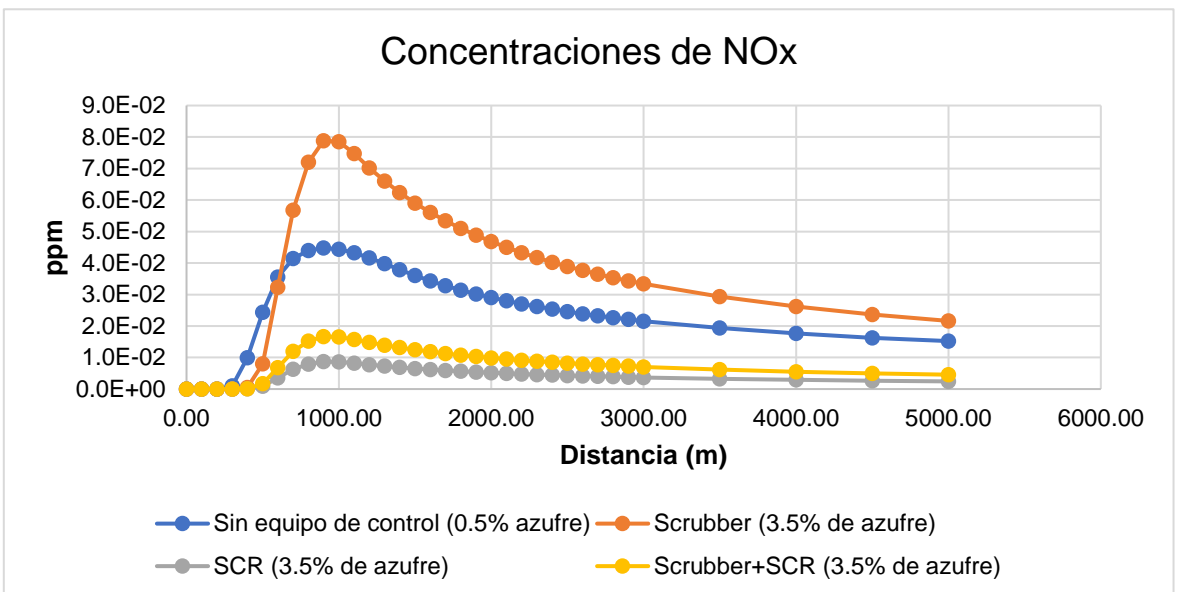


Figura 60. Concentraciones totales del 16 de diciembre del 2018

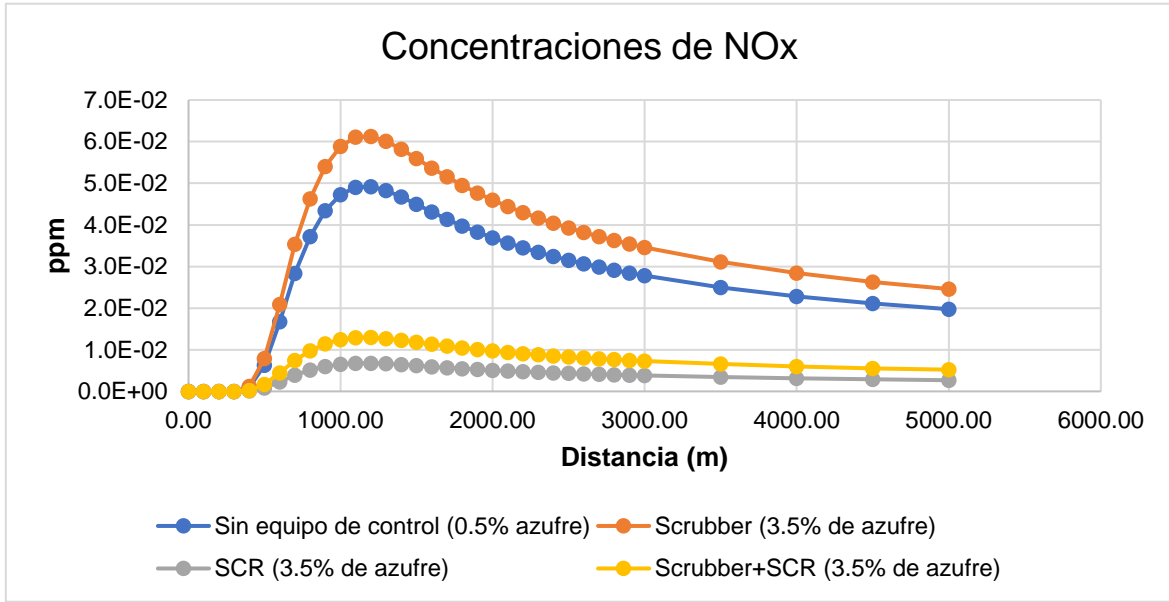


Figura 61. Concentraciones totales del 15 de mayo del 2019

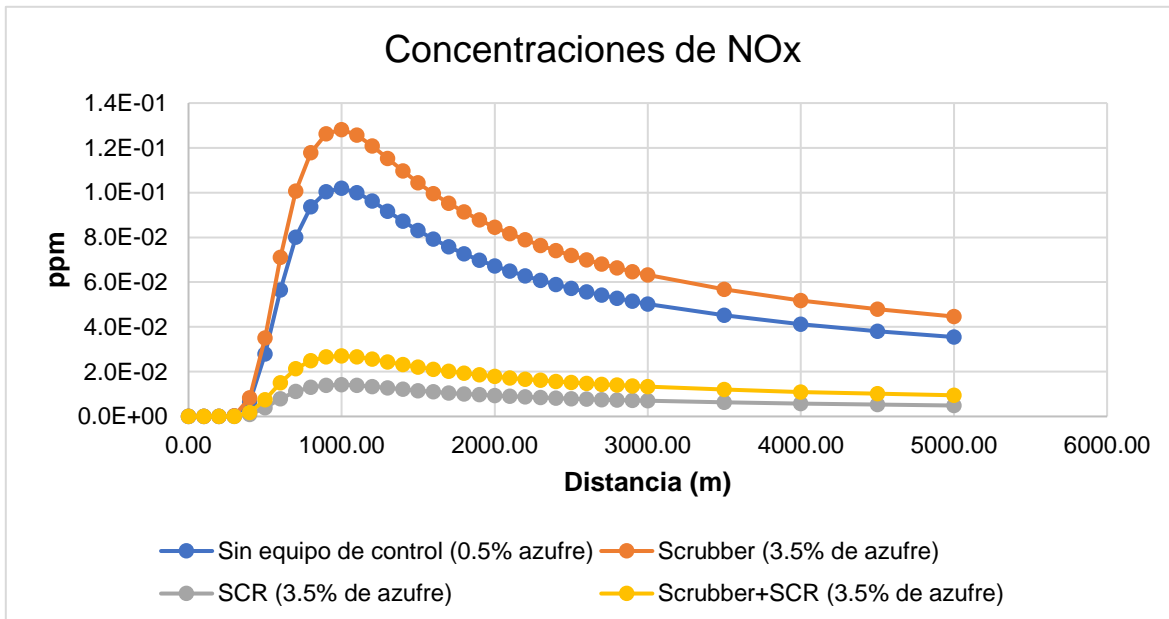
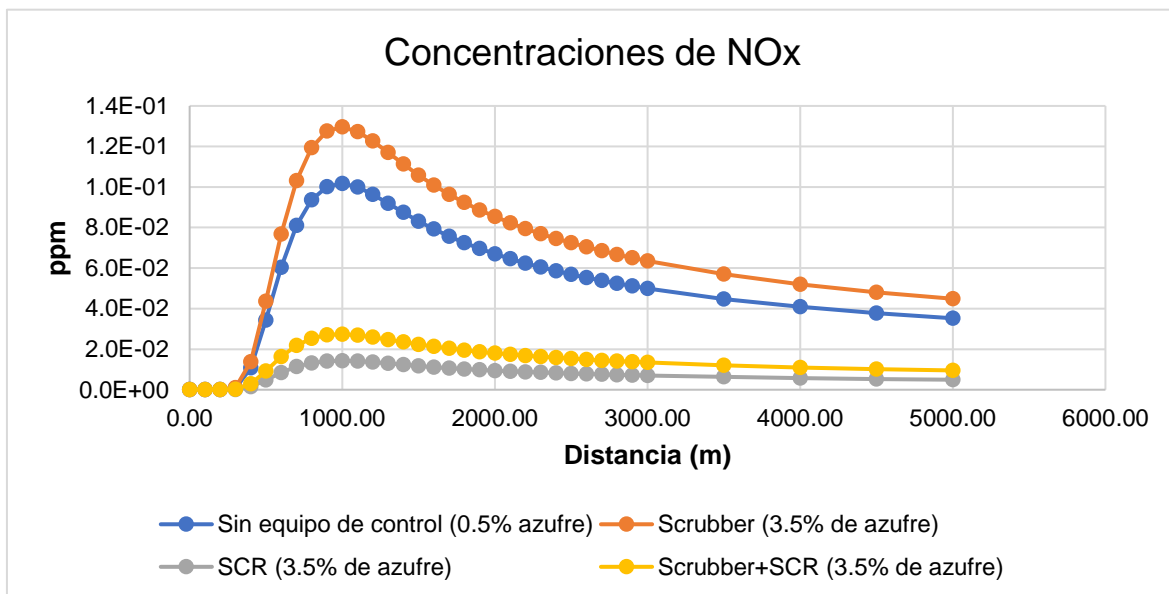
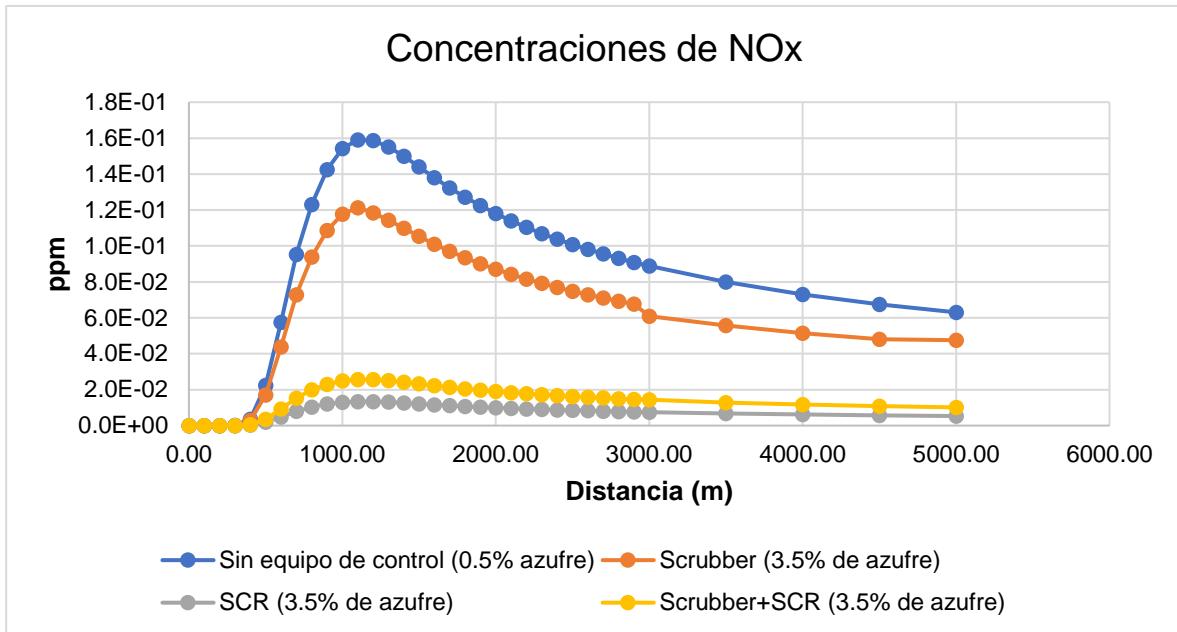


Figura 62. Concentraciones totales del 11 de octubre del 2019



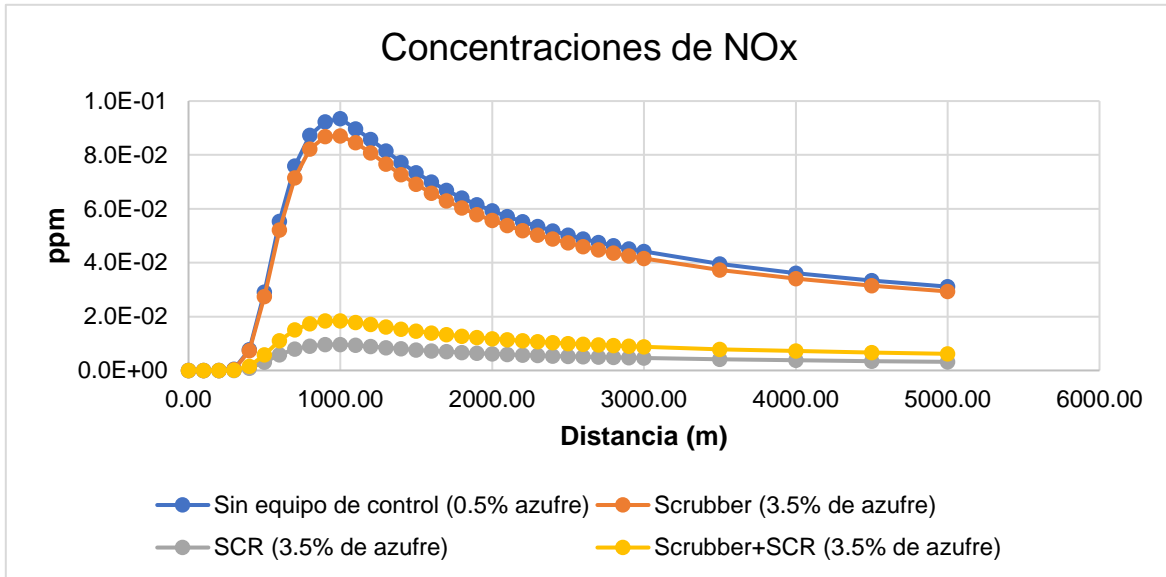


Figura 65. Concentraciones totales del 28 de octubre del 2020

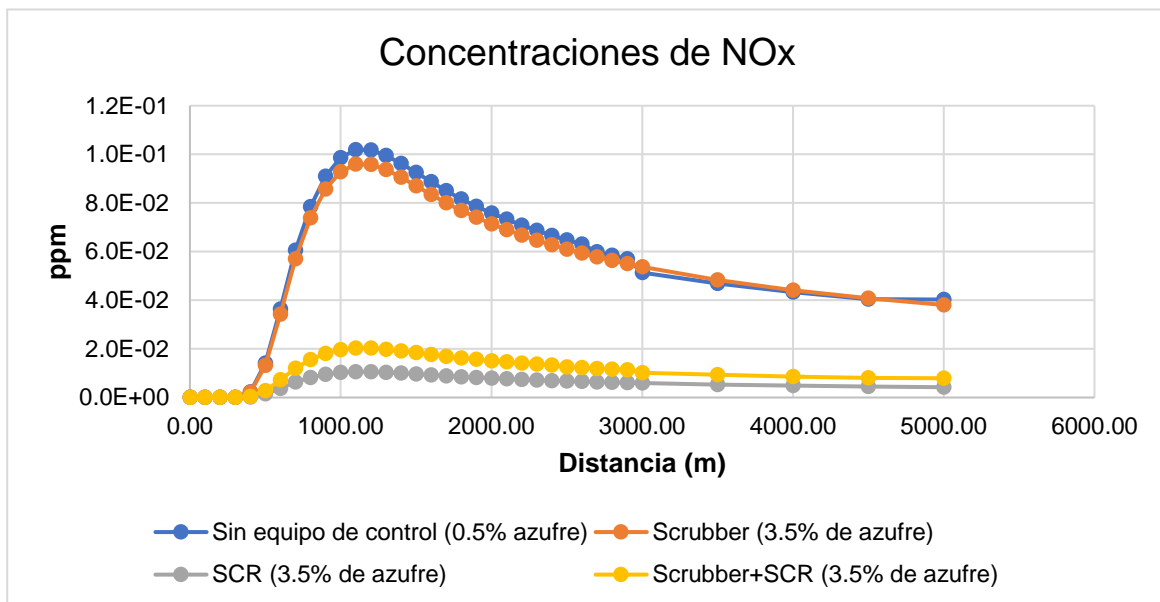


Figura 66. Concentraciones totales del 10 de diciembre del 2020

D. Secuencia de pasos para ejecutar el modelo de Screen View

En la siguiente explicación, se detalla cómo se corrió el modelo de “Screen View” para este trabajo de investigación.

1. Abrir el programa y dar click en la opción OK



Figura 67. Ejecución del Modelo Screen View

2. Seleccionar la opción de “New” para abrir un nuevo proyecto, el cual se guarda con el nombre deseado y el código *scr

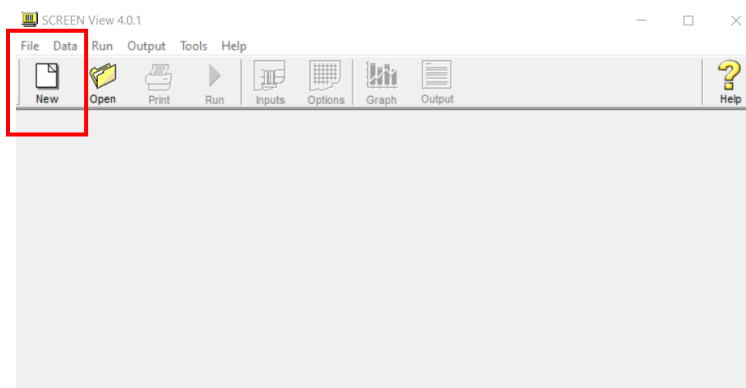


Figura 68. Abrir un nuevo proyecto en Screen View

3. Una vez que ya abrió el nuevo proyecto, aparece una ventana como la que se muestra en la siguiente figura, en donde se selecciona el tipo de fuente, coeficiente de dispersión (zona urbana o rural), la altura del receptor y se ingresan los valores de las diferentes variables de entrada que son: tasa de emisión, altura y diámetro

de la chimenea, velocidad salida y temperatura de los gases de escape y la temperatura ambiente.

The screenshot shows the SCREEN View 4.0.1 software interface. The title bar indicates the file path: C:\Users\Andrea\Documents\UNAM\Tesis final\Octubre\octubre2019\tesis ejemplo.scr. The interface includes a menu bar (File, Data, Run, Output, Tools, Help) and a toolbar with icons for New, Open, Print, Run, Inputs, Options, Graph, and Output. The main window is divided into several sections:

- Source Type:** Radio buttons for Point (selected), Area, Flare, and Volume.
- Dispersion Coefficient:** Radio buttons for Urban and Rural (selected).
- Flagpole Receptor:** A text input field for Receptor Height Above Ground, currently set to 0 [m].
- Point Source Parameters:** A section highlighted with a red box, containing the following parameters:

Emission Rate:	65.86	[g/s]
Stack Height:	26.7	[m]
Stack Inside Diameter:	1	[m]
Stack Gas Exit:	Velocity	35 [m/s]
Stack Gas Exit Temperature:	518.15	[K]
Ambient Air Temperature (default 293 K):	300.15	[K]

At the bottom of the window, there are buttons for Help, Previous, and Next.

Figura 69. Datos de entrada del modelo

- Posteriormente, se debe de llenar la información que solicita el programa en cada uno de sus apartados, los cuales aparecen como pestañas. Primero se colocan los datos meteorológicos. En este caso se seleccionó la opción de “Single Stability Class and Wind Speed”, ya que se contó con esa información de la base meteorológica mencionada anteriormente.

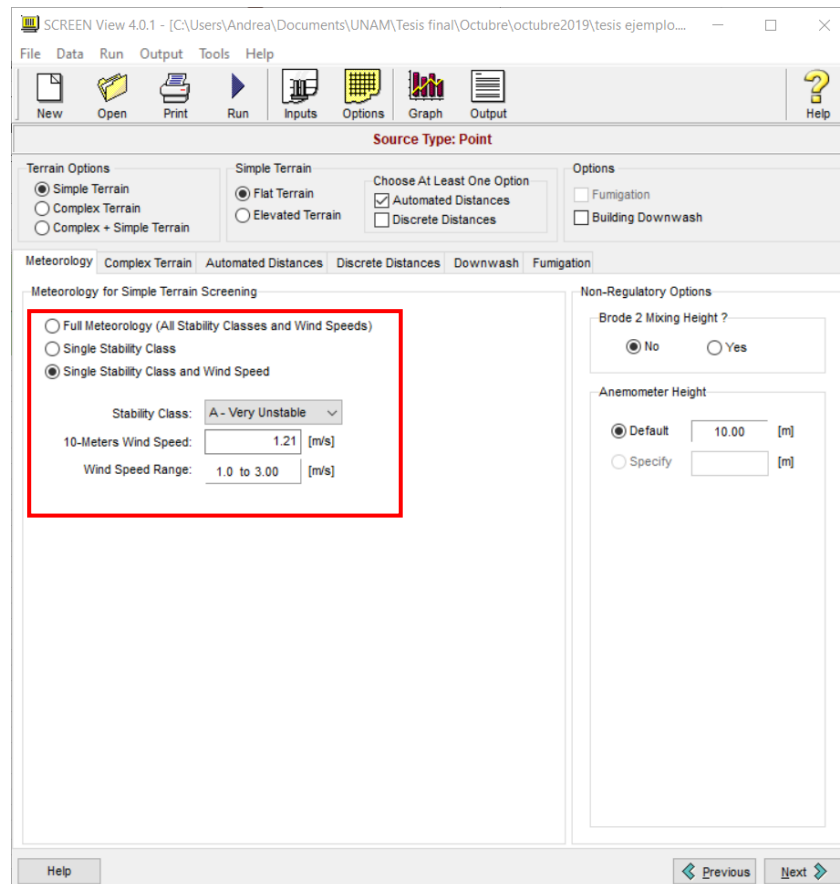


Figura 70. Entrada de datos meteorológicos

5. El paso siguiente, sería llenar la información de “*Complex Terrain*”, pero en este estudio se trabajó en la zona de muelles del recinto portuario y su ubicación se determinó como un terreno simple, por lo que proseguimos al paso de “*Automated Distances*”. Como se muestra en la figura siguiente, se seleccionó la opción de terreno simple y plano, además de distancias automáticas que fueron de 1 metro a 5,000 metros.

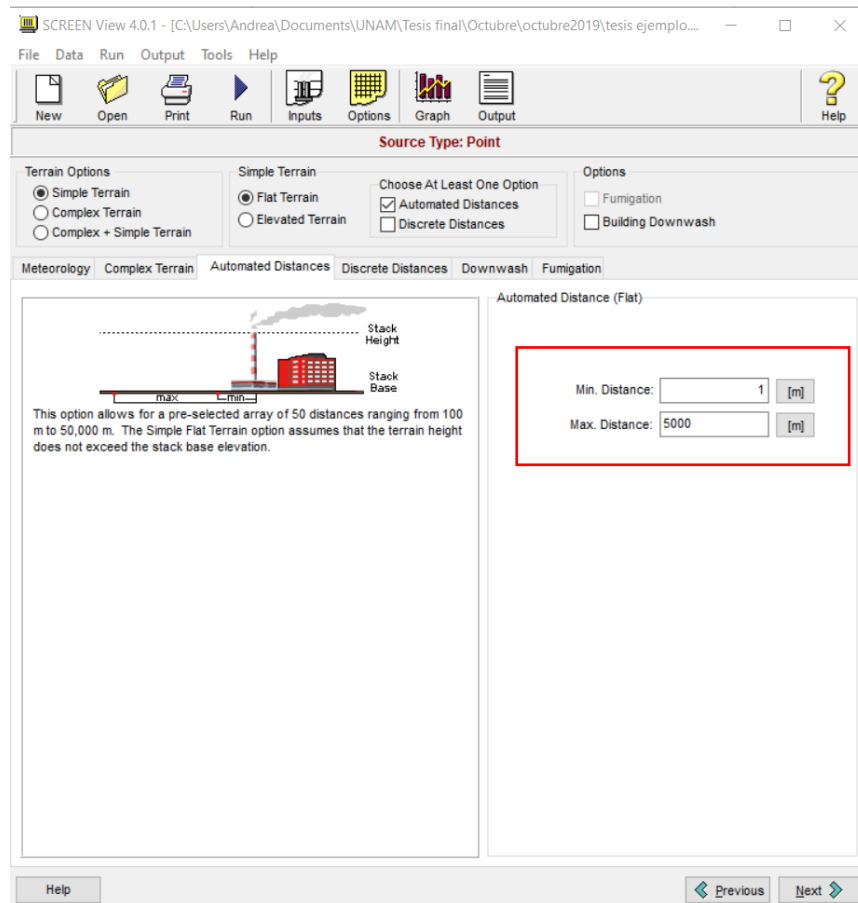


Figura 71. Distancias automáticas

6. Por las características de la zona portuaria y de este estudio, se omitieron los pasos siguientes, trabajando directamente con la opción de fumigación, seleccionando la alternativa de “Building Downwash”, porque las fuentes fijas se encuentran a mínimo 3,000 metros de un cuerpo de agua. El paso siguiente, es dar click en “Next” y aparece una ventana como la que se muestra en la Figura 46 y se elige el botón de “run”, para comenzar a correr el modelo.
7. Una vez ejecutado el modelo, aparece una ventana con las opciones de gráfica, documento o ninguno, como la que se ve en la figura 47. Por último, se selecciona la opción que más le convenga al usuario y los resultados se visualizan como en las figuras 48 y 49.

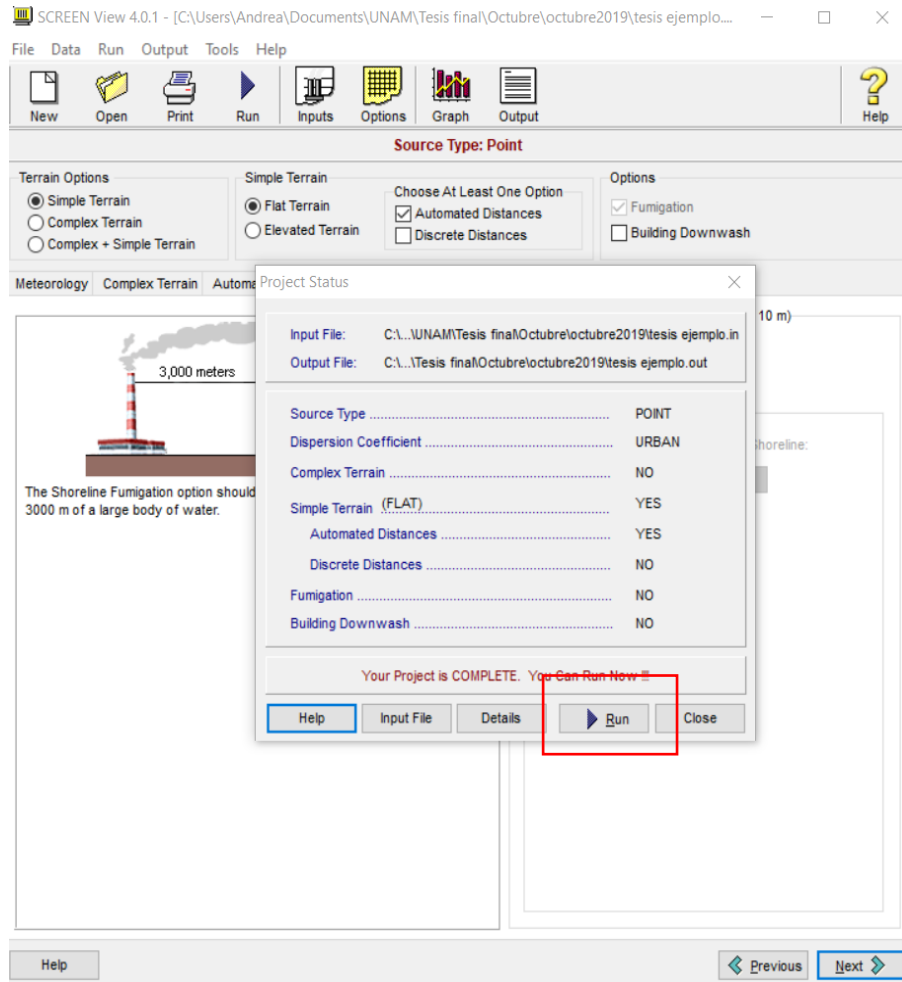


Figura 72. Comenzar a correr el modelo de Screen view

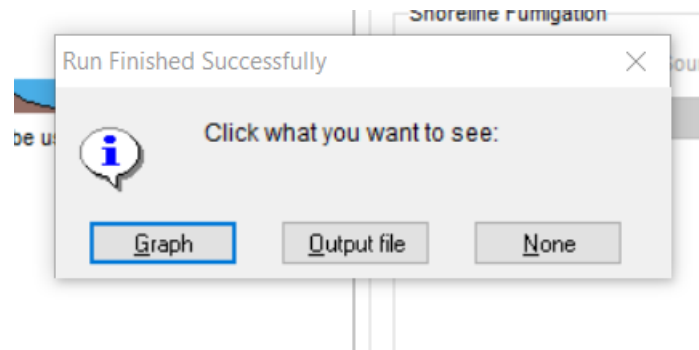


Figura 73. Opciones de visualización de resultados

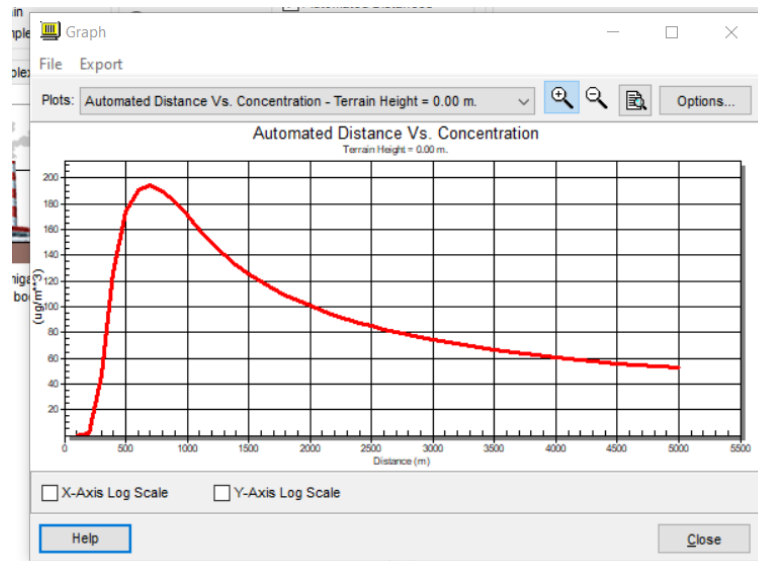


Figura 74. Resultados del modelo con la opción de gráfica

```

05/29/23
19:51:20
*** SCREEN3 MODEL RUN ***
*** VERSION DATED 13043 ***

C:\Users\Andrea\Documents\UNAM\Tesis final\Octubre
\octubre2019\tesis ejemplo.sc

SIMPLE TERRAIN INPUTS:
SOURCE TYPE = POINT
EMISSION RATE (G/S) = 65.8600
STACK HEIGHT (M) = 26.7000
STK INSIDE DIAM (M) = 1.0000
STK EXIT VELOCITY (M/S) = 35.0000
STK GAS EXIT TEMP (K) = 518.1500
AMBIENT AIR TEMP (K) = 300.1500
RECEPTOR HEIGHT (M) = 0.0000
URBAN/RURAL OPTION = URBAN
BUILDING HEIGHT (M) = 0.0000
MIN HORIZ BLDG DIM (M) = 0.0000
MAX HORIZ BLDG DIM (M) = 0.0000

THE REGULATORY (DEFAULT) MIXING HEIGHT OPTION WAS SELECTED.
THE REGULATORY (DEFAULT) ANEMOMETER HEIGHT OF 10.0 METERS WAS
ENTERED.

BUOY. FLUX = 36.100 M**4/S**3; MOM. FLUX = 177.402 M**
4/S**2.

*** STABILITY CLASS 1 ONLY ***
*** ANEMOMETER HEIGHT WIND SPEED OF 1.21 M/S ONLY ***

*****
*** SCREEN AUTOMATED DISTANCES ***
*****

*** TERRAIN HEIGHT OF 0. M ABOVE STACK BASE USED FOR
FOLLOWING DISTANCES ***

DIST CONC U10M USTK MIX HT PLUME
SIGMA SIGMA

```

Figura 75. Resultados del modelo con la opción de documento

D. Evidencia fotográfica de la visita a campo



Figura 76. Foto tomada en el muelle 4 N

Fuente: Propia, tomada en agosto del 2019



Figura 77. Foto tomada en la cesionaria PETRA

Fuente: Propia, tomada en mayo del 2021

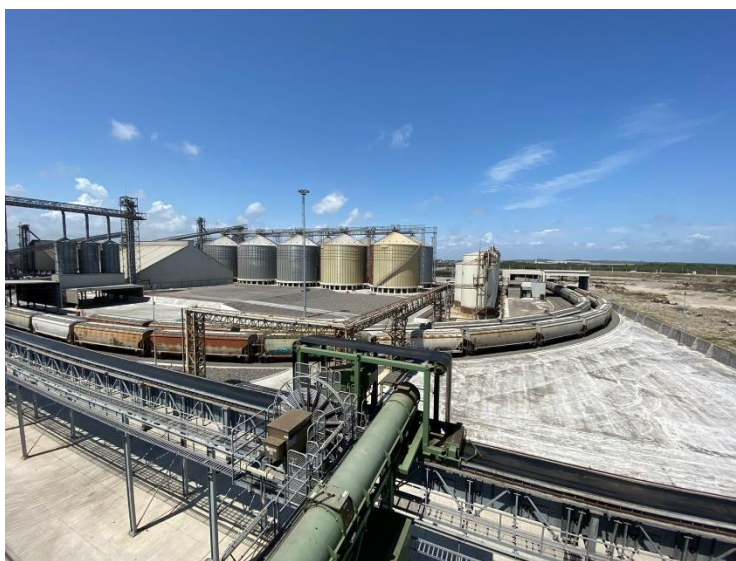


Figura 78. Cesionaria Petra

Fuente: Propia, tomada en mayo del 2021



Figura 79. Patio de distribución de granel

Fuente: Propia, tomada en mayo del 2021



Figura 80. Patio de distribución de granel

Fuente: Propia, tomada en mayo del 2021



Figura 81. Buque granelero mineral, atracado en el muelle 1

Fuente: Propia, tomada en agosto del 2019.



Figura 82. Almacenamiento de fluidos en la cesionaria Petra

Fuente: Propia, tomada en mayo del 2021.