UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO - CHILE

“ESTIMACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICAS PRODUCIDAS POR EMBARCACIONES MARÍTIMAS EN CHILE”

ALBERTO EUSTASIO PINO RIQUELME

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO, MENCIÓN ENERGÍA

Profesor Guía: Dr. Mauricio Osses

Profesor Co-referente: Ing. Juan Carlos Bordones

Octubre – 2017

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis padres por escucharme, apoyarme y aconsejarme en cada etapa que atravieso y por hacerlo desde ese profundo y honesto amor desinteresado que los caracteriza. Este logro es, sin duda, uno de los mayores en los años que llevo de vida y les pertenece tanto a ustedes como a mí.

Agradezco el apoyo del profesor Mauricio Osses y Juan Carlos Bordones a lo largo de este proceso que ha significado realizar mi trabajo de título. Su cordialidad, buen trato y voluntad de ayudar son aspectos que me gustaría destacar. También me gustaría expresar mi agradecimiento al Departamento de Tecnologías de la Información de DIRECTEMAR por la cooperación. Extiendo este agradecimiento a Proyecto FONDAP 15110009.

La trascendencia que tiene la etapa universitaria en mi vida es inconmensurable y de no ser por la gente excepcional que conocí en el camino, la experiencia hubiese sido totalmente distinta. Gracias a todos mis amigos y cercanos con los que compartí momentos tan alegres como adversos.

Resumen

El presente trabajo investigativo desarrolla una metodología robusta para estimar emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo en Chile para el año 2015. La metodología es del tipo Bottom Up y se elabora a partir de una base de datos de movimientos portuarios en Chile durante el 2015 provista por la Armada de Chile con 24.000 movimientos aproximadamente. Las emisiones son calculadas a partir de factores de emisión para cada contaminante, los cuales toman en consideración las variables tipo de combustible, modo de operación y velocidad de operación de los motores. A su vez, el modelo considera distintos supuestos asociados al tipo de nave. Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros más trascendentes para poder visualizar el impacto que estos tienen en los resultados y poder asociarles cierta incertidumbre, como también se comparan los resultados con estudios anteriores.

A nivel nacional, el sector transporte marítimo tiene asociado la suma de 12.017 toneladas de NOx, 614.726 toneladas de CO_2 y 189 toneladas de $PM_{2,5}$. A nivel regional, las regiones que dominan las emisiones atmosféricas son la V Región de Valparaíso, seguida de la VIII Región de Bío-Bío y la X Región de los Lagos, con un 22%, 18% y 16% de participación, respectivamente. A su vez, se tiene que las naves que poseen mayor cantidad de emisiones contaminantes asociadas a nivel nacional son las de tipo portacontenedores y graneleros, ambos con un 16% de participación, seguidos de las naves tipo pesquero, carga general y petrolero con un 13%, 12% y 11%, respectivamente. A nivel de puertos, el puerto que mayor participación posee en el nivel de emisiones es Puerto Montt con un 11%, seguido de Arica con un 9%, Mejillones y Quintero con un 8% y Valparaíso con 7%.

Se concluye que, los niveles de emisión asociados a cada región responden, principalmente, al nivel de actividad y al tipo de nave que predominan en la zona. El impacto que un tipo de nave u otro tenga sobre las emisiones responde a la envergadura y la exigencia operativa a la que se somete ciertos tipos de naves, lo cual explica que una nave tipo portacontenedor tienda a tener mayor nivel de emisiones que una nave tipo carga general. Esto es concordante con el hecho de que la Región de Valparaíso y la Región de Bío-Bío concentran un alto tráfico de las naves que mayor participación poseen en las emisiones. A partir del análisis de sensibilidad, se concluye que el material particulado es el contaminante más sensible con una incertidumbre de +70% y -20% en los resultados, siendo el parámetro con mayor impacto el de tipo de combustible. Para el caso del NOx y el CO_2, la incertidumbre asciende a ± 10% y el parámetro cuyo impacto es más significativo es el tiempo en puerto. Además, la escasa presencia de entes fiscalizadores del Anexo VI del tratado de Marpol hace más interesante aún el desarrollo de inventario de emisiones del sector transporte marítimo en Chile.

Abstract

The present research work develops a robust methodology to estimate atmospheric emissions associated to the maritime transport in Chile by 2015. The methodology is of the Bottom Up type and is elaborated from a database of port movements in Chile during the 2015 provided by the Navy of Chile with approximately 24.000 movements. Emissions are calculated from emission factors for each pollutant, which take into consideration the variables fuel type, mode of operation and speed of operation of the engines. In turn, the model considers different assumptions associated with the type of ship. In addition, a sensitivity analysis of the most transcendent parameters is performed in order to visualize the impact they have on the results and to be able to associate some uncertainty, as well as comparing the results with previous studies.

At the national level, the maritime transport sector has associated the sum of 12.017 tonnes of NOx, 614.726 tonnes of CO_2 and 189 tonnes of $PM_{2,5}$. At the regional level, the regions that dominate the atmospheric emissions are Region V of Valparaíso, followed by Region VIII of Bío-Bío and Region X of Los Lagos, with 22%, 18% and 16% of participation respectively. At the same time, the ships with the highest amount of pollutant emissions associated at the national level are those of the container type and bulk carriers, both with a 16% participation, followed by the fishing vessels type, general cargo and oil tankers with a 13 %, 12% and 11%, respectively. At the port level, the port with the highest participation in the emissions level is Puerto Montt with 11%, followed by Arica with 9%, Mejillones and Quintero with 8% and Valparaiso with 7%.

It is concluded that, the emission levels associated to each region mainly respond to the activity level and the type of ship that predominate in the zone. The impact that a ship type has on the emissions responds to the size and operational requirement to which certain types of ships are subjected, which explains that a container ship tends to have a higher level of emissions than a general cargo ship. This is consistent with the fact that the Region of Valparaiso and the Region of Bío-Bío concentrate a high traffic of the ships that have greater participation in the emissions. From the sensitivity analysis, we conclude that the particulate matter is the most sensitive pollutant with an uncertainty of + 70% and -20% in the results, being the parameter with the greatest impact the type of fuel. In the case of NOx and CO_2, the uncertainty is ± 10% and the parameter whose impact is most significant is the time in port. In addition, the scarce presence of inspection bodies in Annex VI of the Marpol treaty makes the development of an inventory of emissions from the maritime transport sector in Chile even more interesting.

Siglas y nomenclaturas

CH_4	: Metano
CONAMA	: Comisión Nacional del Medioambiente
CO	: Monóxido de carbono
CO_2	: Dióxido de carbono
Diox/fur	: Dioxinas y furanos
DIRECTEMAR	: Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante
EEA	: European Enviroment Agency
FC	: Factor de carga motor
FE	: Factor de emisión
HC	: Hidrocarburos
IEA	: International Energy Agency
IMO	: Organización Marítima Internacional
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt-hora
MA	: Motor Auxiliar
MAPS	: Planes y Escenarios de Acción para Mitigación
MD	: Marine Destillates
MP	: Motor Principal
N_2O	: Óxido nitroso
NMVOC	: Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos
NOx	: Óxidos de nitrógeno
OCDE	: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

PCB	: Bifenil policlorado
PM	: Material particulado
POPs	: Contaminantes Orgánicos Persistentes
RO	: Residual Oil
Ro-Ro	: Roll on Roll Off
Rpm	: Revoluciones por minuto
SMED	: Metodología Sueca para Data Medioambiental
SO_2	: Dióxido de azufre
Ton	: tonelada
TPM	: Tonelaje de Peso Muerto
TRG	: Tonelaje Registrado Bruto

Índice de contenidos

Agradecimientos II

Resumen III

Abstract IV

Siglas y nomenclaturas V

Índice de contenidos VII

Índice de figuras X

Índice de tablas X

Índice de gráficos XIII

Introducción y descripción del problema 1

Objetivos 2

Objetivo general 2

Objetivos específicos 2

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE 3

1.1 Introducción 3

1.2 Tipos de contaminantes asociados al transporte marítimo 8

1.2.1 Contaminantes Criterio 8

1.2.2 Gases de Efecto Invernadero 10

1.2.3 Metales 10

1.2.4 Contaminante Orgánico Persistente (COPs) 11

1.3 Factores que influyen en las emisiones marítimas 11

1.3.1 Motores 11

1.3.2 Tipo de combustibles 12

1.3.3 Modo de operación 13

1.3.4 Consumo diario 14

1.3.5 Tipos de embarcaciones marítimas 14

1.4 Metodologías para determinar inventarios de emisiones en zonas portuarias 19

1.4.1 Reino Unido 19
1.4.2 Italia 21
1.4.3 Suecia 23
1.5 Estudios a nivel nacional de estimación de emisiones contaminantes marítimas 24
1.5.1 Ministerio de Energía 24
1.5.2 Agencia Internacional de Energía 26
1.5.3 CONAMA 27
1.6 Normativa 29
1.6.1 Nacional 29
1.6.2 Internacional 30
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA 32
2.1 Tipos de contaminantes y factores de emisión 32
2.2 Tipos de combustibles 34
2.3 Tipos de naves 34
2.4 Base de datos de movimientos portuarios 35
2.4.1 Pre-procesamiento de la base de datos 35
2.4.2 Valores atípicos y posibles causales 36
2.4.3 Puertos 37
2.4.4 Tiempo en Puerto 38
2.5 Principales Supuestos 39
2.5.1 Ecuaciones 39
2.5.2 Velocidad de servicio por tipo de nave 40
2.5.3 Velocidad de la embarcación al aproximarse al puerto 42
2.5.4 Potencia del motor principal y auxiliar 43
2.5.5 Velocidad del motor principal y auxiliar 45
2.5.6 Porcentaje de carga a la que operan los motores 48
2.5.7 Distancia recorrida en modo “En Maniobra” 48

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS 51
3.1 Introducción 51
3.2 Resultados globales 55
3.2.1 Emisiones anuales por región y tipo de nave 59
3.2.2 Emisiones mensuales por puerto 66
3.3 Análisis de sensibilidad 69
3.3.1 Influencia del tipo de combustible 69
3.3.2 Influencia del tiempo empleado en modo “En Maniobra” 71
3.3.3 Influencia del tiempo en puerto 75
3.3.4 Resumen de análisis de sensibilidad 78
3.4 Comparación con estudios anteriores 80
3.4.1 Agencia Internacional de la Energía 80
3.4.2 “Inventario de emisiones de la actividad portuaria en la zona de Valparaíso, Quintero y San Antonio” 81
3.4.3 Ingeniería DICTUC, UTFSM y Greenlab UC 83
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 87
4.1 Conclusiones Generales 87
4.2 Conclusiones Específicas 87
4.3 Recomendaciones 92
Bibliografía 94
Anexos 96
Anexo 1: Factores de Emisión 96
Contaminantes Criterios 96
Gases de Efecto Invernadero 96
Metales 97
Contaminantes Orgánicos Persistentes 97
Anexo 2: Emisiones mensuales a nivel nacional 98

Contaminantes Criterios 98
Gases de Efecto Invernadero 99
Metales 99
Contaminantes Orgánicos Persistentes 100
Anexo 3: Emisiones anuales por región 101
Contaminantes Criterios 101
Gases de Efecto Invernadero 102
Metales 103
Contaminantes Orgánicos Persistentes 104

Índice de figuras

Figura 1: Clasificación general de las emisiones contaminantes con respectos a las fuentes que las emiten. (Adaptado de Espinoza Torres, 2014) 4
Figura 2: Buque tipo portacontenedor. 15
Figura 3: Buque tipo bulk carrier. 15
Figura 4: Buque tipo crude oil carrier. 16
Figura 5: Buque tipo carga rodante. 16
Figura 6: Buque tipo Chemical tanker. 17
Figura 7: Buque tipo gasero. 18
Figura 8: Buque tipo frigorífico. 18
Figura 9: Remolcador de Altamar. 19

Índice de tablas

Tabla 1: Principales contaminantes criterio asociados al transporte marítimo (European Comission, 2011). 9
Tabla 2: Resumen de los parámetros considerados para los factores de emisión propuestos por el estudio (Cooper & Gustafsson, 2004). 24
Tabla 3: Distribución de emisiones nacional e internacional para los sectores aéreo y marítimo (Sistemas Sustentables, 2009). 28

Tabla 4: Emisiones de GEI Nacionales e Internacionales para los subsectores aéreo y marítimo (Sistemas Sustentables, 2009). 29
Tabla 5: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación “En Océano”. 33
Tabla 6: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación "En Maniobra". 33
Tabla 7: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación "En Puerto". 33
Tabla 8: Puertos que considera el estudio ordenados por Región de Chile a la que pertenecen. 38
Tabla 9: Análisis estadístico de las velocidades de servicio realizado por el estudio citado para cada categoría de embarcación de la base de datos de Lloyd’s MIU (Entec UK Limited, 2010). 41
Tabla 10: Velocidades de servicio para cada categoría de nave consideradas para el presente trabajo investigativo (Entec UK Limited, 2010). 42
Tabla 11: Potencia total de motores principales y auxiliares de la base de datos de Lloyd MIU por categoría de naves (Entec UK Limited, 2010). 44
Tabla 12: Valores asumidos de potencias de motor principal y auxiliar para cada tipo de nave en el presente estudio (Entec UK Limited, 2010). 45
Tabla 13: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Océano" (Entec UK Limited, 2010). 46
Tabla 14: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Maniobra" 47
Tabla 15: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Puerto" 48
Tabla 16: Valores asumidos para los factores de carga bajo los cuales operan los motores en los distintos modos de operación en el presente estudio (Entec UK Limited, 2010) 48
Tabla 17: Cantidad total de emisiones de contaminantes principales asociadas a cada mes. 56
Tabla 18: Valores de emisiones anuales de contaminantes para los tres escenarios propuestos con respecto al uso del tipo de combustible. 70
Tabla 19: Comparación de los distintos escenarios propuestos, con su diferencia expresada en porcentaje. 70
Tabla 20: Emisiones anuales de contaminantes principales asociadas a cada valor de distancia recorrida en maniobra 72

Tabla 21: Análisis de sensibilidad del parámetro tiempo en puerto. Se muestran las variaciones de emisiones anuales para los tres contaminantes principales al variar el tiempo en puerto anual de todas las naves que contemplan la base de datos. 75
Tabla 22: Comparación de la estimación anual de CO2 del presente estudio con el propuesto por la IEA. 81
Tabla 23: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de Valparaíso. 82
Tabla 24: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de Quintero..... 82
Tabla 25: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de San Antonio..... 82
Tabla 26: Resultados del estudio de Ingeniería DICTUC de emisiones anuales de contaminantes de vida corta asociadas al sector transporte marítimo en Chile el 2013. 85
Tabla 27: Resultados del presente estudio de emisiones anuales de contaminantes de vida corta para el año 2015 en Chile..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 28: Emisiones anuales de principales contaminantes distribuidas por región..... 89
Tabla 29: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh]..... 96
Tabla 30: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh]. 96
Tabla 31: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh]. 96
Tabla 32: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh]..... 96
Tabla 33: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh]. 97
Tabla 34: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh]. 97
Tabla 35: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh]..... 97
Tabla 36: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh]. 97
Tabla 37: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh]. 97
Tabla 38: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh]..... 97
Tabla 39: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh]. 98
Tabla 40: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh]. 98
Tabla 41: Emisiones mensuales de contaminantes criterio a nivel país medidos en toneladas..... 98
Tabla 42: Emisiones mensuales de contaminantes criterio a nivel país medido en toneladas. 99
Tabla 43: Emisiones mensuales de gases de efecto invernadero a nivel país medido en toneladas.. 99
Tabla 44: Emisiones mensuales de metales a nivel país medido en toneladas..... 99
Tabla 45: Emisiones mensuales de metales a nivel país medido en toneladas..... 100

Tabla 46: Emisiones mensuales de contaminantes orgánicos persistentes a nivel país medido en toneladas. 100
Tabla 47: Emisiones mensuales de contaminantes orgánicos persistentes a nivel país medido en toneladas. 101
Tabla 48: Emisiones anuales de contaminantes criterio por región medido en toneladas. 101
Tabla 49: Emisiones anuales de contaminantes criterio por región medido en toneladas. 102
Tabla 50: Emisiones anuales de gases de efecto invernadero por región medido en toneladas. 102
Tabla 51: Emisiones anuales de metales por región medida en toneladas. 103
Tabla 52: Emisiones anuales de metales por región medida en toneladas. 103
Tabla 53: Emisiones anuales de contaminantes orgánicos persistentes por región medido en toneladas. 104
Tabla 54: Emisiones anuales de contaminantes orgánicos persistentes por región medido en toneladas. 104

Índice de gráficos

Gráfico 1: Emisiones de CO2 por sector al año 2015 en Chile (International Energy Agency, 2016). 5
Gráfico 2: Gráfico de barra comparativo de emisiones de CO2 del sector transporte entre año 1990 y 2013 a nivel mundial (International Energy Agency, 2016). 6
Gráfico 3: Gráfico de tonelaje movilizado en exportación desde el año 2006 hasta el año 2015 (Armada de Chile, 2016). 7
Gráfico 4: Tonelaje movilizado en importación desde el año 2006 hasta el año 2015 (Armada de Chile, 2016). 7
Gráfico 5: Emisiones de CO2 generadas por el sector marítimo en Chile desde 1971 hasta 2014, expresadas en millones de toneladas (International Energy Agency, 2016). 27
Gráfico 6: Se muestra la cantidad de movimientos portuarios durante el año 2015 para cada tipo de nave considerada por el estudio. 52
Gráfico 7: Distribución de la cantidad de movimientos portuarios por región durante el año 2015. Cada barra del gráfico muestra la composición de dicha cantidad en términos de tipos de naves. 53
Gráfico 8: Representación gráfica de la cantidad de movimientos de cada puerto considerado por el estudio posee a lo largo del año 2015. 54

Gráfico 9: Suma de tiempo en puerto para cada mes durante el año 2015, mostrado en un gráfico de barras. 57
Gráfico 10: Representación gráfica de la suma de cantidad de recaladas contabilizadas en cada mes del año 2015, para los puertos de Chile considerados por el estudio. 58
Gráfico 11: Emisiones anuales de NOx medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015. 59
Gráfico 12: Emisiones anuales de CO_2 medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015. 61
Gráfico 13: Emisiones anuales de $PM_{2,5}$ medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015. 62
Gráfico 14: Cantidad de emisiones anuales de NOx asociadas a cada región del país, ordenadas de mayor a menor para el año 2015. 64
Gráfico 15: Cantidad de emisiones anuales de CO_2 asociadas a cada región del país, ordenadas de mayor a menor para el año 2015. 64
Gráfico 16: Cantidad de emisiones anuales de $PM_{2,5}$ asociadas a cada región del país y ordenadas de mayor a menor para el año 2015. 65
Gráfico 17: Cantidad de emisiones de NOx asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015. 67
Gráfico 18: Cantidad de emisiones de CO_2 asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015. 67
Gráfico 19: Cantidad de emisiones de $PM_{2,5}$ asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015. 68
Gráfico 20: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de NOx al variar distancia recorrida en maniobra. 73
Gráfico 21: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de CO_2 al variar distancia recorrida en maniobra. 73
Gráfico 22: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de $PM_{2,5}$ al variar el tiempo en maniobra. 74
Gráfico 23: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de NOx al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios. 76
Gráfico 24: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de CO_2 al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios. 77
Gráfico 25: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de $PM_{2,5}$ al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios. 77

Gráfico 26: Representación gráfica de la diferencia de los valores máximos y mínimos de cada parámetro sensibilizado con respecto a los resultados base, en términos de porcentaje para cada contaminante. 79
Gráfico 27: Emisión anual de NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ con sus respectivas barras de error..... 91

Introducción y descripción del problema

Es indiscutible que el uso indiscriminado de los recursos que nuestro planeta nos ofrece trae consecuencias indeseadas que, actualmente, son preocupantes para los diversos sectores que componen la sociedad en general. Una de ellas es la emanación de contaminantes atmosféricos, los cuales afectan directamente al equilibrio del medioambiente. La generación de dichos contaminantes proviene, principalmente, de la quema de combustibles fósiles que se da lugar en diversos sectores tales como: industria, transporte, agricultura, entre otros. Dado este escenario, es que surge la necesidad de elaborar inventarios de emisiones asociados a los distintos sectores que las emiten para así poder tener un debido control de éstas, como también ser el cimiento para propuestas y acciones de mitigación a corto, mediano y largo plazo.

En particular, el sector transporte se atribuye una gran proporción de emisiones atmosféricas a nivel mundial y es por esto que este sector se encuentra constantemente bajo estudios de cuantificación de emisiones atmosféricas. Sin embargo, existen sub sectores del sector transporte tales como el marítimo, aéreo y ferroviario cuyos análisis son en menor profundidad, transformándolos en sectores infravalorados en términos de emisiones atmosféricas.

En el plano local, la tendencia no es distinta. En particular, la potente presencia de puertos a lo largo de todo el territorio nacional hace que la problemática de tener una cuantificación actualizada de emisiones atmosféricas de este sector se torne especialmente interesante de resolver.

Por lo tanto, en orden de desarrollar y aplicar tecnologías para reducir este tipo de emisiones, surge una necesidad primaria que es la de establecer métodos de estimación de dichas emisiones contaminantes. Si bien, actualmente en Chile existen leyes y decretos que regulan la actividad marítima, existen escasos entes fiscalizadores en materia de emisiones atmosféricas. Además, existen variables que influyen en la emisión de contaminantes que no se están controlando ni midiendo de forma óptima. Es por esto que resultaría interesante resolver esta problemática mediante el estudio de un método para estimar las emisiones contaminantes en las zonas portuarias del país.

Objetivos

Objetivo general

Estimar emisión de contaminantes producidos por embarcaciones marítimas en los puertos del territorio nacional.

Objetivos específicos

- Revisar normativa vigente sobre emisiones atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en zonas costeras del territorio nacional.
- Recopilar información de actividad portuaria y rutas marítimas en relación a tipo de embarcaciones y movimientos.
- Proponer una metodología robusta para el cálculo de emisiones contaminantes asociadas al transporte marítimo en Chile.
- Estimar las emisiones anuales de contaminantes 2015 para el área de estudio.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

Para comenzar el presente estudio, es pertinente entregar una clara definición de uno de los conceptos más importantes a lo largo del presente documento: emisión contaminante. Se conoce como una emisión contaminante a todo fluido gaseoso, ya sea puro o con sustancias en suspensión, emanado al ambiente como consecuencia de actividades realizadas por los seres humanos o emanado naturalmente por organismos biológicos (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

Dichas emisiones, se conocen formalmente por el nombre de emisiones antropogénicas y emisiones biogénicas, respectivamente. Por un lado, las emisiones antropogénicas son un resultado de variadas actividades humanas, por ejemplo, la producción de dióxido de carbono por la quema de combustibles fósiles. Esto incluye a variadas actividades fundamentales para nuestro propio bienestar que pertenecen a sectores tales como: transporte, generación de calor, industria, agricultura, entre otros. Por otro lado, las emisiones biogénicas son emisiones que son consecuencia de actividades netamente naturales, y no relacionada con el ser humano. Un claro ejemplo de éste tipo de emisiones son las emisiones liberadas producto de la actividad volcánica alrededor de todo el mundo, incendios forestales, descomposición de materia orgánica en el suelo y océanos, etc (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

En particular, las emisiones antropogénicas se pueden subdividir de la siguiente forma: fuentes estacionarias y fuentes móviles. Las fuentes estacionarias hacen referencia a fuentes contaminantes cuya característica es que permanecen fijas en un lugar físico a lo largo del tiempo, mientras que las fuentes móviles hacen referencia a todo lo contrario, son fuentes emisoras de gases contaminantes que se presentan en movimiento desde un punto físico a otro durante un tiempo determinado. La siguiente figura representa esta clasificación de manera más clara:

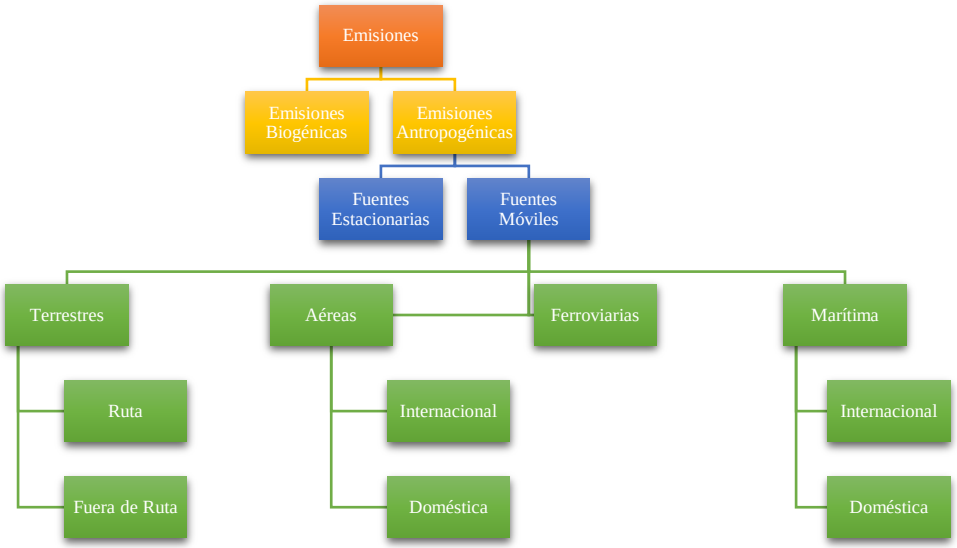

Figura 1: Clasificación general de las emisiones contaminantes con respectos a las fuentes que las emiten. (Adaptado de Espinoza Torres, 2014)

El presente estudio se enfoca en las emisiones del tipo antropogénicas, en particular las emisiones contaminantes del tipo fuente móvil marítima.

Más del 90% de comercio mundial es transportado a bordo de buques (Opazo, 2016) y, en particular, el 94,9% del comercio exterior de Chile se moviliza por vía marítima (Armada de Chile, 2016), utilizando para ello gran cantidad de energía, que es obtenida hoy de forma casi exclusiva a través de los combustibles fósiles derivados del petróleo, obteniendo como consecuencias emisiones de contaminantes que, en cierta cantidad en la atmósfera, puede tener efectos nocivos en las personas y el medioambiente.

Chile, como país integrante de la OCDE desde el 2010, se ve en la obligación de poseer un sistema formal de medición y estimación de emisiones contaminantes para satisfacer con ciertos estándares de políticas públicas que debe cumplir un país miembro de esta agrupación. Para elevar el nivel de vida del país y lograr un crecimiento económico sostenible es importante tener en cuenta un manejo responsable de las emisiones contaminantes que como país se producen.

La IEA es una organización internacional creada por la OCDE que busca coordinar las políticas energéticas de sus países miembros, con la finalidad de asegurar energía confiable,

adquirible y limpia a sus respectivos habitantes. Con el propósito de empezar a dimensionar la creciente incidencia que han ido tomando las emisiones contaminantes marítimas, a continuación se presenta un gráfico que muestra la producción de CO_2 por sector al año 2015 en Chile:

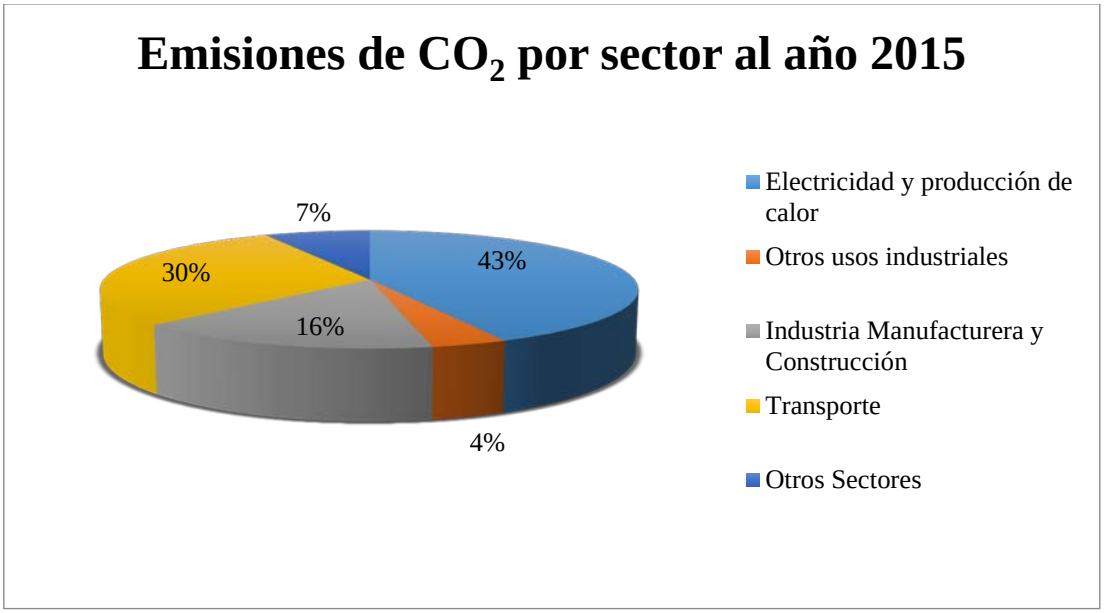

Gráfico 1: Emisiones de CO2 por sector al año 2015 en Chile (International Energy Agency, 2016).

Se aprecia que el sector al cual se le atribuye la mayor producción de CO_2 es el sector electricidad y producción de calor. Sin embargo, en segundo lugar lo sigue el sector transporte, que es al sector el cual está enfocado el presente trabajo investigativo. Dentro del sector transporte, el documento mencionado realiza un desglose indicando cómo se reparten las emisiones producidas entre los distintos participantes que componen el sector transporte a nivel global.

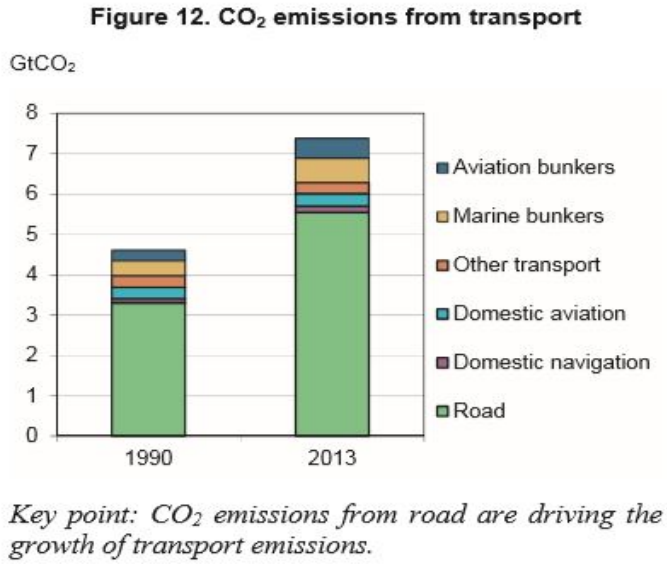

Gráfico 2: Gráfico de barra comparativo de emisiones de CO2 del sector transporte entre año 1990 y 2013 a nivel mundial (International Energy Agency, 2016).

En el eje horizontal se tienen los años que se comparan y en el eje vertical se tiene la cantidad de CO_2 producida por el sector transporte medida en $GtCO_2$ (Giga tonelada de CO_2). Al observar el gráfico es innegable coincidir en que la generación de CO_2 ha aumentado notablemente entre el año 1990 y el 2013. Notar que a lo largo del crecimiento de emisiones, la proporción de emisiones de los sub-sectores se ha mantenido constante, siendo el mayor contribuyente de emisiones el sector de emisiones en ruta. Luego, se encuentran una serie se sub-sectores que aportan emisiones en menor cantidad. Sin embargo, no son despreciables, en especial las emisiones provenientes del sector marítimo búnker. Estas emisiones, al igual que las emisiones de aviación búnker, han sido subvaloradas a lo largo del tiempo, pues su presencia es considerable y va al alza.

Ahora bien, en el ámbito local se tiene que la actividad marino mercante ha sostenido un crecimiento en los últimos años, tanto en las exportaciones como importaciones. Para evidenciar esta tendencia, se presenta el siguiente gráfico que muestra el tonelaje movilizado solo en exportación desde el año 2006 a 2015, extraído del análisis estadístico que año a año la Armada de Chile publica:

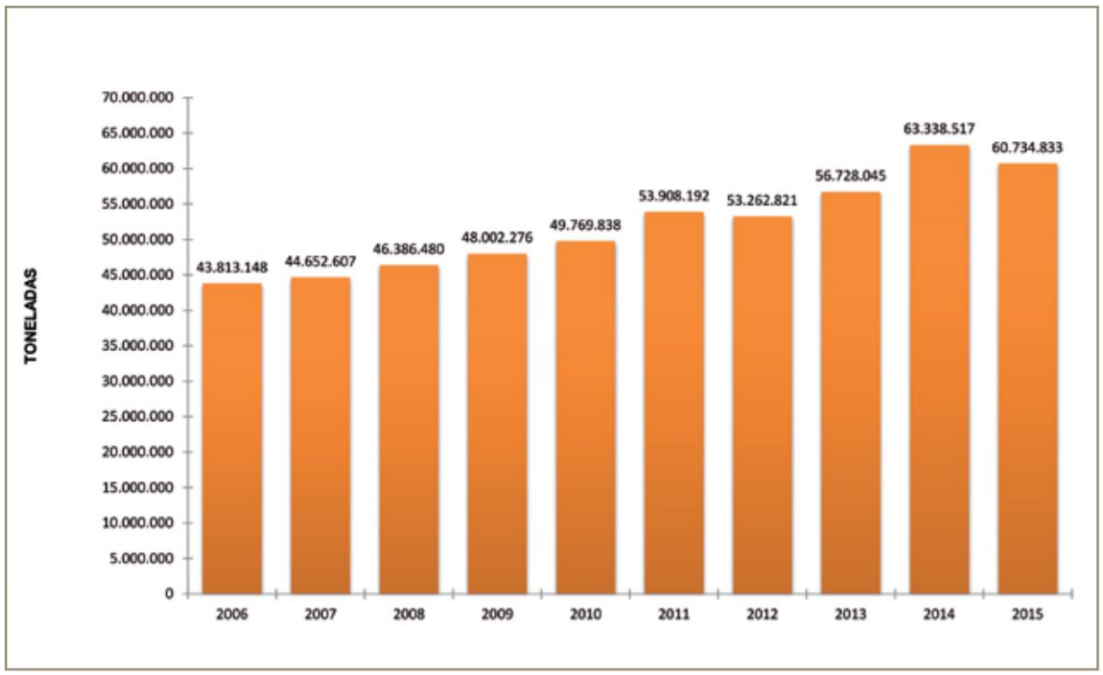

Gráfico 3: Gráfico de tonelaje movilizado en exportación desde el año 2006 hasta el año 2015 (Armada de Chile, 2016).

Análogamente, se presenta el gráfico que muestra el tonelaje movilizado en importación desde el año 2006 hasta el año 2015.

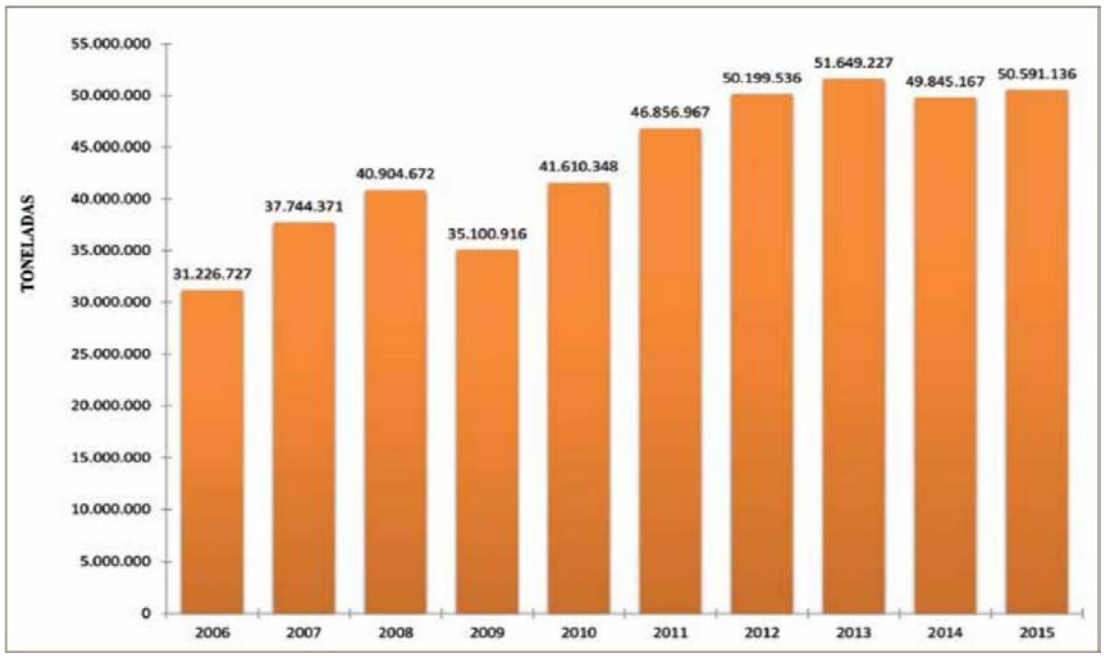

Gráfico 4: Tonelaje movilizado en importación desde el año 2006 hasta el año 2015 (Armada de Chile, 2016).

En ambos casos, se visualiza una tendencia al aumento de tonelaje movilizado a lo largo de los años, lo que implica un aumento en la actividad portuaria de nuestro territorio nacional.

Por ende, se entiende la emisión de contaminantes por medios marítimos como un problema sub-valorado en crecimiento a nivel tanto internacional como nacional. Nuestro país posee una ubicación geográfica privilegiada. Con 4.200 kilómetros de litoral, Chile abre a través de sus puertos los mercados del pacífico, reforzando de este modo el rol de plataforma de negocios y centro de intercambio para la región de Sudamérica.

1.2 Tipos de contaminantes asociados al transporte marítimo

A continuación se entrega un breve acercamiento a los tipos de gases que componen las emisiones contaminantes que serán estimadas en el presente estudio. Los contaminantes se clasifican en las siguientes categorías: contaminantes criterios, gases de efecto invernadero, metales y contaminante orgánico persistente (POPs).

1.2.1 Contaminantes Criterio

El concepto de contaminantes criterio hace referencia a que el estudio de la concentración de dichos gases permite definir un criterio de la calidad de aire. Actualmente, muchos países han adoptado este concepto y se han desarrollado una serie de guías y normas para cada contaminante criterio, las cuales establecen valores máximos de concentración de estos gases contaminantes durante un período definido, con el fin de reducir riesgos y proteger a la población y al medioambiente de posibles efectos nocivos. A continuación, se presenta una lista de contaminantes criterios más comunes (European Comission, 2011).

Contaminante Criterio	Descripción	Consecuencias de la exposición a este contaminante
Dióxido de Azufre (SO_2)	Gas incoloro cuya fuente primaria es la quema de combustibles fósiles que poseen cierto contenido de azufre.	La exposición a SO_2, en ciertas cantidades, trae como consecuencia la irritación e inflamación aguda o crónica de las vías respiratorias.
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	Grupo de gases altamente reactivos que son formados a partir de la quema a altas temperaturas de combustible que contiene compuestos nitrogenados. Las fuentes antropogénicas de este grupo más comunes son los vehículos motorizados y plantas de generación eléctrica.	La exposición a NOx puede traer como consecuencia molestias respiratorias, disminución de la capacidad olfativa y edemas pulmonares.
Material Particulado (PM)	Mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente de tamaño, forma y composición. El tamaño varía desde $0{,}005$ hasta 100 $[\mu m]$. La atención se centra en partículas de tamaño menor 10 $[\mu m]$ (PM10) y, recientemente, partículas de tamaño menor a $2{,}5$ $[\mu m]$ (PM2,5)	Entre más pequeñas sean las partículas, pueden penetrar de forma más invasiva dentro de los pulmones.
Monóxido de Carbono (CO)	Gas incoloro e inodoro producido por la combustión incompleta de combustibles.	En altas concentraciones puede ser letal, pues impide el transporte de oxígeno a la sangre.
Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos (NMVOC)	Al ser orgánicos, tienen presencia de carbono junto a otros elementos tales como: hidrógeno, oxígeno, flúor, azufre o nitrógeno. Se transforman con facilidad en gases y son liberados por la quema de combustibles.	Contribuyen a la formación de smog fotoquímico. Además, son peligrosos dado su alta inflamabilidad, pues suelen arder en contacto con el aire.
Hidrocarburos (HC)	Compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de hidrógeno y carbono. Se generan a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles, como también por evaporación de bencina o petróleo.	El pulmón es el principal órgano afectado dada la toxicidad de los HC, provocando lesiones directas de los capilares y tejido pulmonar si se aspira en ciertas concentraciones.

Tabla 1: Principales contaminantes criterio asociados al transporte marítimo (European Comission, 2011).

1.2.2 Gases de Efecto Invernadero

Como es sabido, el efecto invernadero es un fenómeno el cual consiste en el aumento sostenido de la temperatura del planeta debido a concentraciones en la atmósfera de ciertos gases que contribuyen a la absorción y reflexión de la radiación incidente del sol, la cual se acumula parcialmente dentro de la atmósfera terrestre.

Si bien, muchos de estos gases pueden ser producidos de manera natural, es indudable que la actividad humana tiene incidencia significativa en el nivel de concentración de éstos. Los gases de efecto invernadero son los siguientes (Ministerio del Medio Ambiente, 2011):

Dióxido de Carbono (CO_2): es un gas incoloro e inodoro cuyas principales fuentes naturales son la actividad volcánica, aguas termales, geiseres y respiración de las plantas y animales. De forma antropogénica, se obtiene principalmente de la quema de combustibles fósiles.

Óxido de Nitrógeno (N_2O): potente gas de efecto invernadero emitido con los usos de cultivos en tierras, la combustión de combustibles fósiles, la producción de ácido nítrico, y la combustión de biomasa. De manera natural, se genera a partir de los océanos y de las selvas tropicales gracias a las bacterias del suelo.

Metano (CH_4): corresponde a un hidrocarburo cuyo origen radica principalmente en la combustión incompleta de combustibles fósiles. También, proviene de la descomposición anaerobia de residuos en vertederos, digestión animal, descomposición de residuos animales, producción y distribución de gas natural y petróleo y producción de carbón, entre otros. Es el gas que más contribuye al efecto invernadero, después del dióxido de carbono.

Vapor de agua (H_2O): este componente se encuentra en la atmósfera de manera natural a partir del ciclo del agua de nuestro planeta. Es un ciclo cerrado de circulación de agua presente en distintas formas a través de procesos físicos tales como evaporación y sublimación del hielo. Las moléculas de agua en la atmósfera atrapan la radiación proveniente del sol y, a su vez, la reflejan en todas direcciones antes de volver al espacio exterior, lo cual provoca un aumento de temperatura en la superficie de la tierra. En general, las actividades del hombre no contribuyen a la generación significativa de vapor de agua. No obstante, el aire calentado tiene una capacidad mucho mayor que el aire menos caliente de retener humedad y el aumento de la temperatura éste se asocia a actividades humanas.

1.2.3 Metales

Dentro de este tipo de gases, se pueden encontrar el arsénico, plomo y mercurio (European Comission, 2011).

Arsénico (As): corresponde a uno de los elementos más tóxicos y se puede encontrar de forma natural como mineral de cobalto o en la superficie de rocas combinado con azufre. También puede ser generado a partir de actividades humanas tales como: minería, fundiciones y en la agricultura.

Plomo (Pb): Es un contaminante presente en las emisiones de los vehículos que utilizan combustibles que contienen plomo y de las emisiones de material particulado resultantes de la extracción, manipulación, transporte y almacenamiento del mineral de plomo.

Mercurio (Hg): es un metal pesado que se puede producir por la combustión y puede generar alteraciones en los seres vivos.

1.2.4 Contaminante Orgánico Persistente (COPs)

Corresponden a contaminantes pertenecientes a un grupo de familias de sustancias químicas nocivas para el ser humano y el medioambiente. Algunos de dichos químicos son: pesticidas, insecticidas, herbicidas, entre otros. Estos compuestos químicos tóxicos son sustancias que, generalmente, no ocurren en la naturaleza, sino que han sido sintetizadas por químicos a partir de sustancias más simples (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

1.3 Factores que influyen en las emisiones marítimas

Las emisiones marítimas de gases contaminantes, más conocidas como emisiones marítimas búnker, provienen de la quema de combustible asociada a la actividad marítima de las embarcaciones. Dicho combustible utilizado en el área marítima es conocido como "búnker". Esta denominación se debe a que en el pasado, los barcos a vapor utilizaban carbón como combustible, y los contenedores de almacenaje del carbón eran conocidos como búnker, concepto que perdura hasta hoy en día (Manaadiar, 2015). El término combustible búnker se utiliza para hacer referencia a combustibles tanto del área marítima como aeronáutica.

Al igual que la mayoría de las fuentes móviles terrestres, las naves marinas también realizan la quema de combustibles fósiles para satisfacer su demanda energética a lo largo de un viaje, emanando a la atmósfera una serie de gases contaminantes. No obstante, existen diversos factores a considerar que pueden influir, algunos en mayor o menor medida que otros, en las emisiones de gases contaminantes producidas por embarcaciones marítimas.

1.3.1 Motores

La generación de energía de un barco proviene de un conjunto de elementos que entregan la característica de autosuficiencia energética a la embarcación. Estos elementos son: motor principal, motor auxiliar, motor de emergencia, calderas e incinerador.

En particular, los motores en se clasifican en 3 tipos según su velocidad de operación: velocidad alta, que comprende velocidades entre 1000 y 3000 [rpm], velocidad media, cuya velocidad varía entre 300 y 1000 [rpm] y velocidad baja, entre 60 y 300 [rpm]. Los motores principales generalmente pertenecen a la clasificación de motores de velocidad media y baja, mientras que los motores auxiliares caen en el rango de velocidad media y alta (Cooper & Gustafsson, 2004).

- **Motor principal**: este elemento es el encargado de entregar la propulsión de avance necesario a la embarcación y, por lo general, son motores diésel. Además, es posible encontrar motores principales asociados a generadores para proporcionar energía eléctrica a la embarcación. Los motores principales de velocidades medias suelen ser de 4 tiempos, mientras que los de baja velocidad son de 2 tiempos. Destacar que, junto a los motores auxiliares, se atribuyen la mayor magnitud de emisiones en comparación a la maquinaria de turbinas, calderas, motores de emergencia, entre otros.
- **Motor auxiliar**: cumple la función de satisfacer la demanda energética con respecto a electricidad, iluminación, ventilación, sistemas de bombas, etc. Por lo general, en este tipo de motores solo se encuentran motores de velocidad media y/o alta y de 4 tiempos.
- **Motor de emergencia**: este tipo de motor es utilizado solo en caso de que el motor auxiliar presente alguna falla. Al igual que los motores auxiliares, en general los motores de emergencia corresponden a motores diésel de 4 tiempos de velocidades medias y altas.
- **Calderas**: elemento cuya finalidad es la producción de calor a bordo de la embarcación.
- **Incineradores**: se utilizan para la quema de residuos a bordo de embarcaciones marítimas de carácter transoceánico (grandes distancias a recorrer).

Lo importante de reconocer las distintas categorías de motores que existen, es que cada motor tiene asociada una potencia mecánica capaz de entregar a la embarcación, variable la cual tiene impacto directo en la cuantificación de emisiones atmosféricas.

1.3.2 Tipo de combustibles

El combustible, en general, se conoce como una mezcla homogénea de hidrocarburos provenientes del refinamiento del petróleo. Por lo tanto, es posible encontrar en el mercado distintas clasificaciones del combustible proveniente del petróleo a partir del grado de

refinación de éste. Las principales categorías de combustibles utilizados para el transporte marítimo se presentan a continuación (Sin, 2012).

- **Combustible Residual:** Proviene del excedente resultante del proceso de refinación del petróleo, el cual es utilizado como combustible principal de las embarcaciones marítimas. Para su uso, es necesario ser combinado con otros componentes para cumplir los requerimientos aceptables (Draffin, 2008). El combustible residual que se utiliza para el transporte marítimo es denominado Marine Fuel Oil (MFO) e Intermediate Fuel Oil (IFO). Principalmente es para motores de gran tamaño, es por esto que es su uso es para los motores principales de los buques (Cooper & Gustafsson, 2004).
- **Combustible Destilado:** Es un combustible más ligero que el residual y que necesita menos tratamientos para su utilización. Su uso abarca una gran variedad de motores y su condición de ligereza le otorga ventajas sobre los combustibles residuales tales como: ser más limpios, fácil empleo y más fácil de manipular. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como su elevado costo con respecto al combustible residual (Cooper & Gustafsson, 2004).

1.3.3 Modo de operación

Las distintas maneras en que un motor de una embarcación marítima puede ser operado pueden tener una influencia significativa en las estimaciones de las emisiones contaminantes que éstos generan. En general, se pueden identificar 3 tipos de operaciones de barcos: en el mar, en maniobra y en el puerto (Cooper & Gustafsson, 2004).

- **En Océano**: este tipo de operación caracteriza a la nave cuando se encuentra mar adentro y lejos del puerto. En este modo es cuando alcanza su velocidad crucero para el viaje. Además, el motor principal trabaja a una capacidad de 80% de la carga máxima y las emisiones generadas por el motor auxiliar son relativamente insignificantes.
- **En Maniobra**: hace referencia a cuando la embarcación se encuentra cercana al puerto y sigue usando el motor principal, pero a menor carga. En este tipo de operación, las emisiones generadas por el motor principal siguen siendo predominantes.

- **En Puerto**: corresponde cuando el barco se encuentra en reposo atracado[1] al puerto. El motor principal se encuentra apagado, y el motor auxiliar funciona con aproximadamente 50% de su máxima capacidad. Este modo de operación es de particular interés, pues las naves permanecen atracadas generalmente durante períodos de un día o más, durante el cual las distintas actividades relacionadas a la nave conllevan emisiones contaminantes atmosféricas.

1.3.4 Consumo diario

El consumo de una embarcación marítima, lógicamente, depende de la distancia recorrida, velocidad, envergadura de la embarcación, entre otros. Sin embargo, el consumo de combustible residual puede variar entre 5 y 350 toneladas por día. En cambio, el consumo de combustible destilado, usado por motores auxiliares, ronda en las 5 toneladas diarias (Espinoza Torres, 2014).

1.3.5 Tipos de embarcaciones marítimas

En cuanto a los tipos de buques, es posible afirmar que existe una gran variedad. En general, la clasificación más usada es por tipo de carga a transportar, es decir, existen distintos tipos de buques en función de lo que se requiere movilizar. A continuación, se describen los tipos más relevantes de buques existentes (Broker Service and Logistic, 2013):

- **Buque portacontenedores**: corresponde a, como su nombre indica, buques cuya carga corresponde principalmente a contenedores. Se trata de una de las familias de buques de mayores dimensiones, puesto que los más grandes pueden medir 350 metros de eslora[2]. Como es de esperar, los buques portacontenedores poseen motores de gran envergadura, los que les permiten alcanzar velocidades de hasta 23 nudos[3], potencias de 90.000 HP y consumo diario de combustible de 250 toneladas. Su TPM[4] asciende a 200.000 [ton].

---

[1] Atracar es un término que, en el léxico náutico, hace referencia a la operación que efectúa una nave al amarrarse de costado a un muelle o malecón, estableciendo contacto directo entre tierra y buque. También, un atraque puede hacer referencia al amarre de una nave a otro buque.

[2] Eslora es un término marítimo empleado para hacer referencia a la longitud del largo de una embarcación marítima, es decir, la distancia desde la proa hasta la popa.

[3] Los nudos son una unidad característica tanto de la navegación marítima como aérea, la cual mide velocidad. Equivale aproximadamente a 1,852 [km/h].

[4] TPM hace referencias a las siglas Tonelaje de Peso Muerto. Es una variable que hace referencia a la capacidad que poseen las embarcaciones marítimas de transportar cargas sin que signifiquen un riesgo para ellas. Se mide en unidad de masa, generalmente en toneladas.

Figura 2: Buque tipo portacontenedor.

- **Buques graneleros o bulk carriers:** se caracterizan por transportar principalmente cereales, minerales o cargas mixtas (cargas secas y crudo). Su capacidad es hasta los 400.000 TPM y son fácilmente identificables debido a que poseen una única cubierta corrida con varias escotillas (normalmente impares) y unas correderas a uno o ambos lados por donde corren la tapa o tapas de las escotillas. Normalmente viajan a bajas velocidades y suelen ser de gran tamaño, algunos, superando los 300 metros de eslora (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 3: Buque tipo bulk carrier.

- **Buques petroleros (Crude oil carriers):** corresponde a un buque diseñado específicamente para el transporte de crudo o de productos derivados del petróleo. Su capacidad es hasta 500.000 TPM, mientras que su capacidad de transporte barriles oscila desde los 400.000 barriles hasta los 2.000.000 barriles aproximadamente (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 4: Buque tipo crude oil carrier.

- **Buque de carga rodante (Roll on/Roll off cargo)**: este tipo de buque son utilizados únicamente para el transporte de vehículos. Se caracterizan por tener una gran rampa y también por una estructura de gran altura y longitud con un aspecto como de caja flotante. Su velocidad promedio asciende a 15 nudos aproximadamente (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 5: Buque tipo carga rodante.

- **Buques químicos (Chemical tankers)**: como dice su nombre, estos buques son diseñados para el transporte de productos químicos. Su tamaño es relativamente

pequeño y poseen una capacidad entre 5.000 y 10.000 TPM, aunque en ocasiones pueden llegar a 50.000 TPM. Pueden cargar diferentes tipos de producto y se clasifican, según el tipo de agresividad o riesgo de su carga, en tres clases (Tipo 1, 2 ó 3). La tendencia es que se construyan para las tres. Debido a la peligrosidad del contenido que transportan, suelen ser buques costosos ya que deben cumplir con una serie de exigencias tales como: doble casco constructivo, tanques de acero inoxidable, sofisticados sistemas de pintura, etc (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 6: Buque tipo Chemical tanker.

- **Buque gasero (L.N.G carrier)**: son buques diseñados para el transporte de gas natural o gas licuado. Al igual que los buques químicos, los buques gaseros también poseen un alto costo de construcción ya que deben cumplir una serie de exigencias de seguridad y altas tecnologías para el transporte de gases. Son fácilmente reconocibles, pues en la cubierta poseen varios tanques de forma esférica. Solo existen dos tipos de buques gaseros. Los buques LNG (liquified natural gas) y los LPG. La principal diferencia entre estos tipos de buques gaseros, es que los LNG transportan el gas en estado líquido a temperaturas de hasta -170 °C mientras que los LPG lo transportan a -50 °C. Por lo tanto la principal diferencia está en las temperaturas con las que se transporta el gas (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 7: Buque tipo gasero.

- **Buque frigorífico:** corresponden a buques diseñados para el transporte de carga que necesita permanecer a bajas temperaturas, como por ejemplo, alimentos tales como: frutas, pescado congelado, entre otros. La temperatura a la que se mantiene la carga es entre -15°C y -30 °C. A diferencia de otros tipos de buques, este en particular posee motores con altas potencias, lo que los hace alcanzar altas velocidades. Se caracterizan por ser, en general, de color blanco, pues este color refleja la radiación del sol y no la absorbe y también tienen varias grúas que se encargan de mover la mercancía (Broker Service and Logistic, 2013).

Figura 8: Buque tipo frigorífico.

- **Remolcadores:** este tipo de embarcaciones se caracterizan por ser embarcaciones de menor envergadura y cuya función es la de asistir en la maniobra de otras naves. Esta asistencia se puede dar tanto en muelles, como mar abierto, ríos y canales. También se usan para remolcar barcazas, barcos incapacitados u otros equipos que necesiten auxilio. En general, son embarcaciones pequeñas. No obstante, dada las funciones

que cumplen, necesitan de un gran torque para lograr un alto empuje. Para ello, disponen hélices de gran diámetro y bajas rpm (Benavides Flores, 2011).

Figura 9: Remolcador de Altamar.

1.4 Metodologías para determinar inventarios de emisiones en zonas portuarias

A nivel global, existen distintos métodos para estimar las emisiones contaminantes producidas por embarcaciones marítimas, los cuales presentan ciertas ventajas y desventajas dependiendo del contexto y situación en la cual se requiera. A continuación, se presentan las metodologías para determinar inventarios de emisiones en zonas portuarias que se encontraron a partir de una búsqueda bibliográfica y que resultan más significativas para el presente estudio.

1.4.1 Reino Unido

Entec UK limited es una empresa consultora del reino unido la cual ofrece servicios de soluciones ingenieriles centrados en agua, residuos, energía, tierra contaminada, salud y seguridad, riesgos y gestión ambiental, entre otros (The Carbon Directory, 2011).

En el año 2002, Entec UK limited entregó un informe solicitado por la unión europea titulado "Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community". El documento reúne un profundo trabajo en donde participan diversos sectores para lograr desarrollar y aplicar una metodología para calcular las emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Europa y toma en cuenta factores tales como (Entec UK Limited, 2002):

- Tipo de buque
- Tipo de motor
- Tamaño del buque
- Detalles de Puerto/lugar
- Identificador de tipo de movimiento e identificador de referencia único para cada movimiento.

Dentro de las suposiciones claves tomadas para el desarrollo del estudio se pueden destacar (Entec UK Limited, 2002):

- Los buques toman la ruta más corta en línea recta entre dos puertos. Cuando la tierra prohíbe esta suposición, los buques toman la ruta más corta alrededor de la tierra hacia el puerto de destino.
- La base de datos de movimientos no detalla todos los movimientos de los transbordadores. Es decir, cuando un transbordador realiza llamadas múltiples en el mismo puerto en un día, sólo es probable que se registre el primer movimiento de dicho buque. Por lo tanto, todos los transbordadores fueron retirados del análisis inicial e investigados por separado.

Con respecto a la metodología adoptada para proponer factores de emisión, el estudio se basa en fuentes publicadas por Lloyd's Register Engineering Services[5] y se elabora una nueva base de datos mediante la clasificación, validación y filtrado de la data original, como también se realizaron encuestas a distintos puertos para estimar la cantidad de horas de los distintos tipos de operación asociado a los buques. Se obtienen factores de emisión para 5 tipos diferentes de motores y 3 tipos de combustibles. A su vez, el procedimiento se repite para los 3 modos de operación del buque: en el mar, en el puerto y en maniobra.

El año 2010, Entec publica un nuevo estudio, el cual sigue la línea investigativa del estudio abarcado anteriormente e incluye revisiones y modificaciones del estudio original. El objetivo principal del estudio es el de desarrollar una base de datos detallada de emisiones atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas que pueda ser utilizada como base para futuras políticas de emisiones marítimas. Se elabora un inventario de emisiones

[5] Lloyd's Register Engineering Services es una organización que ayuda a proteger la vida y la propiedad y apoya la educación y la investigación relacionada con la ingeniería. Ofrece una gran variedad de servicios y soluciones ingenieriles, dentro de las cuales ofrecen bases de datos de tráfico marítimo, especificaciones técnicas de embarcaciones, entre otros.

desagregado espacialmente en grillas de 50 km por 50 km, para las costas del Reino Unido, específicamente las costas del Mar del Norte (Entec UK Limited, 2010).

La metodología desarrollada considera los siguientes parámetros para le estimación de emisiones:

- Tipo de Naves
- Tipo de Motor
- Tipo de Combustible
- Modo de Operación
- Velocidad crucero y tiempo empleado en el mar
- Tiempo empleado en puerto
- Tecnologías de abatimiento instaladas
- Potencia Efectiva Motor
- % Carga a la cual opera el Motor

Los movimientos de naves corresponden a una línea base del año 2007 y la base de datos asociada fue otorgada por Lloyds Marine Intelligence Unit (Lloyd's MIU)[6]. Esta es la única base de datos comercial de todos los movimientos de embarcaciones a nivel mundial con más de 3,6 millones de movimientos registrados anualmente.

El estudio en cuestión, realiza un análisis estadístico de la base de datos para poder determinar parámetros que sean representativos para la causa.

Se concluye que la metodología en base a la actividad marítima utilizada por este estudio es aplicable al estudio que desarrolla el presente documento, por lo que existen estimaciones y suposiciones que se adoptarán y se detallarán en el transcurso de éste.

1.4.2 Italia

Esta metodología fue presentada el 2010 por Carlo Trozzi, bajo el manto de la empresa Techne Consulting[7] y cuyo título es "Emission estimate methodology for maritime navigation". Se presenta en la novena conferencia internacional de inventarios de emisiones dentro del marco de mantención de la guía (The Guidebook) de inventario de contaminantes atmosféricos (European Monitoring and Evaluation Programme/European Economic Area,

[6] Corresponde al departamento encargado de estadísticas perteneciente a Loyd's Register Engineering Services.

[7] Techne Consulting es una empresa italiana con 30 años de trayectoria que ofrece consultoría y desarrollo de software en materia de medio ambiente y energía.

EMEP/EEA)[8]. La metodología abarca tanto la capacidad instalada como el consumo de combustible como alternativas para estimar las emisiones marítimas en altamar, en maniobra y en puerto, tomando en cuenta los motores principales y auxiliares (Trozzi, 2010).

El documento postula que las emisiones pueden ser calculadas como:

- Con factores de emisión relacionados con el combustible para las distintas fases de navegación en las que el consumos de combustible es conocido.
- Con una metodología basada en la capacidad instalada, donde los consumos de combustible no son conocidos.

Cuando la capacidad instalada no es conocida, se proponen funciones específicas (usando data disponible de aproximadamente 100.000 barcos de Lloyd's Register) para evaluar la capacidad instalada a partir del tonelaje bruto.

En cuanto a la caracterización de la flota mundial, ésta fue elaborada a partir de un análisis de la literatura disponible en la materia y a partir de un análisis de la base de datos de la organización Loyd's Register para el período comprendido entre 1999 y 2010.

- **Metodología basada en el combustible**: Éste procedimiento es aplicable solamente cuando se dispone de consumo de combustible detallado para cada barco y cada tipo de motor en los distintos modos de operación de la nave. A partir de esto, se calcula las emisiones para cada categoría de barco y tipo de motor/combustible multiplicando por los factores de emisión. Los factores de emisión se expresan en [kg/ton] para las distintas combinaciones de tipo de motor y tipo de combustible y están asociados a NO_x, NMVOC y MP (Trozzi, 2010).
- **Metodología basada en la capacidad instalada**: En esta metodología se requiere obtener información acerca del movimiento de los barcos: lugar de salida, lugar de llegada, hora de salida y hora de llegada para cada barco individual. También, determinar las rutas de navegación y distancias entre puertos. Para esta metodología, al igual que la basada en consumo de combustible, es necesario tener identificado las categorías de barcos, tipos de motor y tipos de combustibles y registrar la capacidad instalada del motor principal o motor auxiliar. Adicionalmente, se requiere determinar el tiempo total de navegación para cada categoría de barcos y para cada tipo de motor y tipo de combustible. Esto se puede lograr indistintamente utilizando

[8] EMEP es un programa basado en la ciencia y en las políticas de la convención sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia (CLRTAP) para la cooperación internacional y para resolver problemas de contaminación atmosférica transfronteriza.

como base la distancia y velocidad promedio crucero o hora de salida y hora de llegada. De esta forma, el cálculo de emisiones para cada categoría de barcos y cada tipo de motor y tipo de combustible se obtiene multiplicando el tiempo total empleado en cada fase de navegación (modo de operación) por la capacidad instalada del motor principal y auxiliar, por factores de carga, por % de tiempo de operación del motor principal y por factores de emisión (Trozzi, 2010).

1.4.3 Suecia

Metodología Sueca para Data Medioambiental (SMED), en conjunto con Instituto de investigación medioambiental de Suecia, Estadísticas Suecia y el Instituto Sueco Meteorológico e Hidrológico han desarrollado factores de emisiones para barcos a aplicar en labores internacionales marítimas de Suecia (Cooper & Gustafsson, 2004) propuestos en el estudio que lleva por título "Methodology for calculating emissions from ships: Update of emission factors".

El estudio se centra en 28 contaminantes, en donde los factores de emisión se proponen en función de 5 tipos de motor y 2 tipos de combustible, considerando los 3 modos operativos de los barcos y motores principales y auxiliares. Además, el documento considera 13 años de estudio.

La base de datos central de la que se han derivado los factores de emisión a consiste, principalmente, en datos internos de medición de emisiones y otras fuentes (Lloyds, Servicios de Ingeniería, 1995). La base de datos consta de medidas de 62 naves diferentes que abarcan aproximadamente 180 motores. Esta base de datos es similar a la que se utiliza para estimar las emisiones europeas de los buques que se presenta en la sección 1.3.1. Sin embargo, se han incluido más contaminantes en la base de datos. A continuación, se presenta una tabla que resume los parámetros que contempla el estudio:

Variable	Cantidad	Descripción
N° de contaminantes	28	NO_x, CO_2, MP, SO_x, entre otros.
N° de tipos de motor	5	Diesel de alta velocidad, Diesel de velocidad media, Diesel de velocidad baja, Turbina a vapor y Turbina a gas.
N° de tipos de combustibles	2	Petróleo Destilado y Petróleo Residual.
N° de modos de operación	3	En el mar, En maniobra y En puerto.
N° de años que cubre el estudio	13	Desde 1990 hasta 2002
N° de técnicas de reducción de NO_x	5	SCR, low NO_x, HAM, DWI, NO_x Code.
N° de clasificaciones por edad del motor	2	Motores construidos entre 1993-2003 y motores construidos antes de 1993.

Tabla 2: Resumen de los parámetros considerados para los factores de emisión propuestos por el estudio (Cooper & Gustafsson, 2004).

Como es posible apreciar, el estudio en cuestión abarca una gran cantidad de contaminantes y considera gran parte de los factores más influyentes en las emisiones de gases contaminantes asociadas al transporte marítimo. Es por esto que en el presente estudio investigativo se escogen estos resultados en cuánto a factores de emisión a utilizar para la estimación anual de contaminantes producidos por embarcaciones marítimas.

1.5 Estudios a nivel nacional de estimación de emisiones contaminantes marítimas

Análogamente, en Chile también se ha desarrollado conocimiento acerca de esta área. A continuación, se presentan los principales estudios asociados a la materia.

1.5.1 Ministerio de Energía

MAPS Chile es un proyecto gubernamental cuyo objeto es entregar evidencias, proyecciones y opciones para mitigar el cambio climático y avanzar hacia un desarrollo bajo en carbono en Chile. Su origen de deriva del acrónimo en inglés, “Mitigation Action Plans and Scenarios”,

y nace de la iniciativa nacida en Sudáfrica LTMS (Long Term Mitigation Scenarios). Actualmente se desarrollan proyectos MAPS en Brasil, Colombia, Perú y Chile.

Éste estudio es fruto de un proceso de investigación en cual participan diversos sectores. En efecto, se constituyó como ente asesor un Grupo de Construcción de Escenarios, con más de 60 profesionales de diversos ámbitos de la sociedad (público, privado, académicos, consultores y ONGs), y se convocó a más de 200 personas con conocimiento de los diversos sectores productivos relevantes para que contribuyeran con su experiencia en más de 20 reuniones de grupos técnicos.

El estudio en cuestión, se divide en tres fases. La primera, se denomina Fase 1, contempla la proyección del escenario Línea Base 2007-2030, es decir, una proyección de la economía chilena situada en el año 2006 sin considerar esfuerzos para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, pero incluyendo la evolución tecnológica natural de los sectores económicos. La segunda fase, incluye la Línea Base de emisiones de gases de efecto invernadero 2013-2030, las medidas y escenarios de mitigación junto a un análisis de los efectos macroeconómicos asociados a los distintos escenarios. Y, por último, la fase tres contempla una revisión exhaustiva de los resultados de la segunda fase, un estudio del impacto que pueden llegar a tener las medidas de mitigación propuestas y medidas de mitigación enfocadas a largo plazo (2030-2050) (MAPS Chile, 2013).

Los resultados que competen a este trabajo investigativo son los correspondientes al sector transporte y urbanismo, en particular, el subsector marítimo nacional (MAPS Chile, 2014).

- **Metodología**: Se utiliza un modelo econométrico que relaciona el consumo energético del transporte marítimo nacional con el PIB nacional y se consideran las series históricas de consumo para los años 1991-2006. Adicionalmente, el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero se deriva a partir de cálculo de consumo de energía, es decir, el producto entre el consumo energético y un factor de emisión. Las emisiones se calculan de manera indirecta a partir de la proyección de la variable TKM[9] asociada al transporte marítimo. El consumo energético se estima según la siguiente ecuación:

$$CE = TKM\ x\ IE\ \left[\frac{Mcal}{tkm}\right]$$

[9] La variable TKM (toneladas por kilómetro), hace referencia a la cantidad de toneladas de carga transportada anualmente por kilómetros recorridos.

Donde IE representa la intensidad energética. El estudio en cuestión, considera un valor igual a 0,139 [$\frac{Mcal}{tkm}$] el cual fue estimado a partir de los datos históricos de consumo de energía y TKM marítimo. Los TKM históricos fueron obtenidos de los informes estadísticos del INE.

En cuanto a medidas de mitigación enfocadas específicamente al subsector marítimo, el estudio no ha propuesto ninguna medida concreta más allá del desarrollo de tecnologías más amigables con el medioambiente. Sin embargo, se propone una medida para mitigar los efectos del sector transporte de carga la cual consta en impulsar el transporte ferroviario y marítimo en el territorio nacional (reducir los TKM correspondiente a transporte por camión y aumentar los TKM asociado a transporte marítimo).

1.5.2 Agencia Internacional de Energía

La agencia internacional de energía (IEA por sus siglas en inglés) es una organización que nace a partir de la OCDE tras la crisis del petróleo en 1973 cuyo objetivo se basa en tres lineamientos principales: seguridad energética, desarrollo económico y protección del medio ambiente. Es por esto que esta organización está permanentemente involucrada con el área de emisiones de contaminantes y Chile, como miembro de la OCDE, se ve involucrado en los distintos estudios y, a su vez, debe cumplir con satisfacer ciertos estándares y políticas públicas acerca materia energética.

En cuanto a materia de emisiones contaminantes, el departamento de estadísticas de la IEA cada año genera un documento llamado "CO_2 Emissions from fuel combustion, Highlights", el cual entrega información acerca de las principales fuentes antropogénicas generadoras de CO_2 de 150 países, medidas de mitigación y proyecciones. El estudio entrega información acerca del CO_2 generado por cada sector, siendo el sector que ocupa el primer lugar el de generación de calor y electricidad, mientras que en segunda ubicación está el sector transporte. Adicionalmente, se entrega esta información por país y por años (International Energy Agency, 2016).

En cuanto al sector de emisiones marítimas, se dispone de una tabla que presenta la cantidad de emisiones de CO_2 medida en millón de toneladas especificada por año para cada país. En el caso particular de Chile, se presenta la siguiente información:

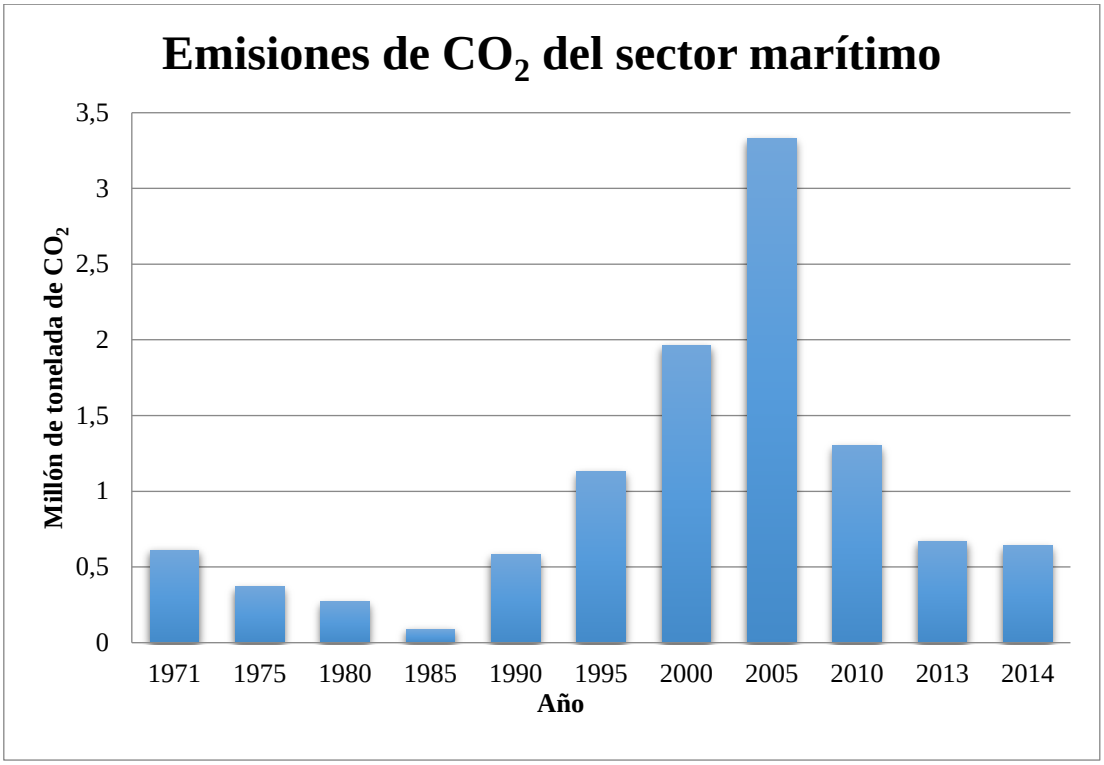

Gráfico 5: Emisiones de CO2 generadas por el sector marítimo en Chile desde 1971 hasta 2014, expresadas en millones de toneladas (International Energy Agency, 2016).

1.5.3 CONAMA

En el año 2009 la empresa consultora Sistemas Sustentables publicó el informe final solicitado la CONAMA titulado "Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Búnker para Gases de Efecto Invernadero". El estudio tiene por objeto el desarrollo y aplicación de una metodología de cálculo que permita desagregar localmente las emisiones búnker y emisiones nacionales de gases de efecto invernadero para los subsectores del transporte aéreo y marítimo (Sistemas Sustentables, 2009).

La recopilación de antecedentes del estudio se basa en análisis de metodologías IPCC utilizadas en sector aéreo y marítimo, recopilación de fuentes públicas de información y recopilación de información a partir de fuentes alternativas.

Dentro de los objetivos cumplidos por el estudio, se pueden rescatar:

- Se desarrolló una metodología para desagregar las emisiones de los sectores aéreos y marítimos en nacionales e internacionales.
- Desarrolla una regresión de los consumos para estimar las emisiones en el período 1984-1990, considerando diferentes variables de actividad.
- Se obtuvo las emisiones nacionales e internacionales para gases de efecto invernadero para el sector marítimo utilizando la aproximación Tier 1.

Adicionalmente, el informe presenta una serie de recomendaciones tales como: firmar un acuerdo entre aduana y la CNE para incluir la información de aduana en el Balance Nacional de Energía (BNE).

Dentro de los resultados más destacables, podemos incluir la distribución de emisiones Nacional e Internacional para los sectores aéreo y marítimo, presentada en la siguiente tabla:

Año	Aéreo		Marítimo	
	Nacional	Internacional	Nacional	Internacional
1984	51%	49%	45%	55%
1985	57%	43%	51%	49%
1986	56%	44%	48%	52%
1987	56%	44%	47%	53%
1988	56%	44%	41%	59%
1989	54%	46%	47%	53%
1990	56%	44%	43%	57%
1991	65%	35%	34%	66%
1992	57%	43%	35%	65%
1993	52%	48%	34%	66%
1994	60%	40%	25%	75%
1995	51%	49%	28%	72%
1996	48%	52%	25%	75%
1997	43%	57%	20%	80%
1998	53%	47%	24%	76%
1999	58%	42%	17%	83%
2000	62%	38%	15%	85%
2001	55%	45%	8%	92%
2002	62%	38%	9%	91%
2003	65%	35%	8%	92%
2004	64%	36%	7%	93%
2005	54%	46%	13%	87%
2006	59%	41%	10%	90%
2007	59%	41%	12%	88%
Promedio	**56%**	**44%**	**27%**	**73%**

Tabla 3: Distribución de emisiones nacional e internacional para los sectores aéreo y marítimo (Sistemas Sustentables, 2009).

También, se presenta una tabla que contiene información acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero nacionales e internacionales para los subsectores aéreo y marítimo, desde el año 1984 hasta 2007. En particular, se presenta en mega toneladas de CO_2 equivalente.

Año	Aéreo [Gg CO_2e]		Marítimo [Gg CO_2e]	
	Nacional	Internacional	Nacional	Internacional
1984	340	332	419	506
1985	370	275	514	498
1986	357	280	490	532
1987	370	286	478	549
1988	386	298	391	571
1989	432	368	495	548
1990	433	334	447	585
1991	572	311	327	626
1992	585	443	341	637
1993	608	559	402	771
1994	672	446	262	796
1995	658	634	330	854
1996	661	730	300	922
1997	762	992	310	1216
1998	1088	959	411	1301
1999	1113	792	293	1433
2000	1060	661	292	1626
2001	1061	882	160	1750
2002	1201	745	191	2012
2003	1085	579	173	2014
2004	1166	660	183	2375
2005	1065	892	491	3214
2006	1223	860	381	3580
2007	1384	943	539	3829
Promedio	**777**	**594**	**359**	**1364**

Tabla 4: Emisiones de GEI Nacionales e Internacionales para los subsectores aéreo y marítimo (Sistemas Sustentables, 2009).

1.6 Normativa

En el presente capítulo se busca presentar un resumen de búsqueda bibliográfica acerca de normativas vigentes en Chile acerca de las emisiones atmosféricas generadas por embarcaciones marítimas y se aborda desde un punto de vista nacional e internacional.

1.6.1 Nacional

En primer lugar, se recurre al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), en donde se puede hallar un documento elaborado por la CONAMA el cual lleva por título "Guía para el control y prevención de la contaminación industrial: Actividad Portuaria", publicado en diciembre del año 2000. El documento abarca gran cantidad de temas relacionados con la contaminación asociada a la actividad portuaria, tales como: generación de contaminación (calidad del agua y aire, residuos líquidos y sólidos, impacto sobre la ecología costera y

marina, entre otros), prevención de la contaminación, optimización de procesos (prevención derrames, prevención de impacto vial, reducción de ruidos, entre otros), método para el control de la contaminación, plan de manejo de residuos peligrosos, seguridad y la salud ocupacional. (CONAMA, 2000).

En particular, en el capítulo que abarca la legislación y regulaciones ambientales aplicables a la industria, se encuentra un apartado de normativas que regulan las emisiones atmosféricas. No obstante, no se halla ninguna aplicable a fuentes móviles a nivel nacional, en particular embarcaciones marítimas.

Se concluye que las normativas que reinan en el ámbito nacional a esta actividad son escasas, pues no existe una autoridad competente que regule. Sin embargo a nivel internacional se cuenta con mayor información.

1.6.2 Internacional

El Convenio Internacional MARPOL 73/78 es un conjunto de normativas internacionales con el objetivo de prevenir la contaminación por los buques. Fue desarrollado por la Organización Marítima Internacional (OMI), organismo especializado de la ONU y su objetivo es preservar el ambiente marino mediante la completa eliminación de la polución por hidrocarburos y otras sustancias dañinas, así como la minimización de las posibles descargas accidentales. El convenio consta de seis anexos que contienen reglas que abarcan las diversas fuentes de contaminación por los buques (Wunderlich Contreras, 2005):

- Anexo I: reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos.
- Anexo II: reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.
- Anexo III: reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos. Se trata de un anexo opcional ya que el transporte de mercancías peligrosas está reglado por el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas.
- Anexo IV: reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques.
- Anexo V: reglas para prevenir la contaminación por las basuras de los buques.
- Anexo VI: reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques. Este anexo entró en vigor el 19 de mayo de 2005.

En particular, es el Anexo VI el que es de interés para este trabajo investigativo, en el cual se establecen 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 el

ozono; para las zonas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de SOx, NOx y de material particulado. No obstante, llama la atención que en Chile no exista una autoridad competente que regule esta situación.

Además, la normativa que establece límites de emisión de NOx es a nivel mundial y se aplica directamente sobre los fabricantes de embarcaciones marítimas, en particular a las fabricadas desde el año 2000 en adelante.

En un capítulo adoptado en 2011 se establecen medidas técnicas y operacionales obligatorias de eficiencia energética encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques y actualmente Chile está adscrito a este convenio, acompañado por un total de 70 países (ratificación 31 de agosto de 2012).

El capítulo 3 del Anexo VI del Convenio MARPOL, como se menciona anteriormente, contiene una serie de reglas formuladas detalladamente destinadas al control de emisiones contaminantes por parte de buques, dentro de las cuales las más relevantes son (Pérez Pro, 2014):

- Regla N° 12: Sustancias que agotan la capa de ozono.
- Regla N°13: Óxidos de nitrógeno.
- Regla N°14: Óxidos de azufre y material particulado.
- Regla N°15: Compuestos orgánicos volátiles.
- Regla N°16: Incineración a bordo.
- Regla N°17: Instalaciones de recepción.
- Regla N°18: Disponibilidad y calidad del Fuel Oil.

Sin embargo, en Chile actualmente no existe una autoridad competente que fiscalice el cumplimiento de este convenio, lo cual hace más aún interesante el desarrollar un estudio que además de entregar un inventario de emisiones, logre plasmar la influencia del uso y cambio de combustibles marinos, dependiendo del modo de operación en que se encuentre la embarcación.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

Éste capítulo busca explicar los principales supuestos en torno al cálculo de emisiones y describir la manera en que se desarrolla dicho cálculo, como también mostrar y argumentar las decisiones tomadas con respecto a las distintas variables que entran en juego a la hora de elaborar un inventario de emisión, siendo el cimiento de éste una base de datos anual de movimientos portuarios a lo largo de todo Chile.

La metodología para el cálculo de emisiones se basa en la actividad portuaria y obedece, en general, a la siguiente relación:

$$Emisión\ Contaminante = Actividad\ x\ Factor\ de\ Emisión$$

En donde el término actividad abarca parámetros técnicos ligados a las naves estudiadas y el término factor de emisión es un término que se asocia a cada contaminante considerado por el estudio y, como se menciona en el capítulo 1, éstos fueron extraídos del estudio "Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors". En los próximos párrafos se describe con mayor profundidad esta última relación.

2.1 Tipos de contaminantes y factores de emisión

Como se menciona en el capítulo de estado del arte, los factores de emisión a utilizar se extraen del documento "SMED, Methodology for calculating emissions from ships". Los contaminantes considerados por el estudio son los 28 propuestos en el estudio en cuestión, los cuales son:

- Contaminantes Criterio: Óxido de Nitrógeno (NO_x), Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos (NMVOC), Óxido de Azufre (SO_x) y NH_3.
- Material Particulado: Total de partículas en suspensión (TSP), PM10 y PM2,5.
- Metales: Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Arsénico (As), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Selenio (Se) y Zinc (Zn).
- Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs): Bifenil Policlorado (PCB), Dioxinas y Furanos (Diox/Fur), Benzopireno (Ben(a)pyr), Benzofluoranteno (Ben(b)flu), Indenopyr, Hidrocarburo Aromático Policíclico (PAH-4) y Hexaclorobenzeno (HCB).
- Gases de Efecto Invernadero: Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O).

De ésta forma, a partir del estudio en cuestión se utiliza un factor de emisión para cada contaminante, el cual puede cambiar dependiendo de la combinación de las siguientes variables:

- Tipo de Motor: Motor Principal o Motor Auxiliar.
- Tipo de Combustible: Petróleo Destilado o Petróleo Residual.
- Velocidad del Motor: Velocidad Baja, Velocidad Media o Velocidad Alta. Para efectos de este estudio solo se consideran velocidades bajas y medias.
- Modo de Operación: En el mar, En maniobra o En puerto.

Al tener un factor de emisión específico para cada contaminante y para cada condición a la que opera la máquina, es posible obtener la cantidad de emisiones contaminantes que se producen multiplicando dicho factor por la actividad de la máquina.

A continuación se muestra una tabla con una cantidad parcial de los factores de emisión considerados. La tabla completa, debido a su extensión, se encuentra adjunta en la sección de anexos.

Tipo de Motor	Combustible	NOx	$PM_{2,5}$	CO_2
Velocidad Baja	**Petróleo Residual**	16,99	1,3	620
Velocidad Baja	**Petróleo Destilado**	16,9	0,2	588
Velocidad Media	**Petróleo Residual**	13,3	0,5	683
Velocidad Media	**Petróleo Destilado**	13	0,2	652

Tabla 5: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación "En Océano".

Tipo de Motor	Combustible	NOx	$PM_{2,5}$	CO_2
Velocidad Baja	**Petróleo Residual**	13,59	2,6	682
Velocidad Baja	**Petróleo Destilado**	13,6	0,4	647
Velocidad Media	**Petróleo Residual**	10,6	1	752
Velocidad Media	**Petróleo Destilado**	10,4	0,4	717

Tabla 6: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación "En Maniobra".

Tipo de Motor	Combustible	NOx	$PM_{2,5}$	CO_2
Velocidad Media	**Petróleo Residual**	14	0,5	722
Velocidad Media	**Petróleo Destilado**	13,5	0,2	690

Tabla 7: Resumen de factores de emisión de principales contaminantes medidos en [g/kWh] y para modo de operación "En Puerto".

2.2 Tipos de combustibles

Se consideran los dos principales tipos de combustibles presentados en el capítulo 1: petróleo destilado y petróleo residual. El escenario bajo el cual se calculan las emisiones contaminantes es que para la operación en altamar todos los motores principales de los distintos tipos de naves operen con combustible residual, para luego cambiar a un combustible destilado al momento de entrar en operación de maniobra. En cuanto a los motores auxiliares, se asume que utilizan combustible destilado en todos los modos de operación. Este escenario busca representar la operación de las naves de la forma más cercana a la realidad posible.

El impacto que genera esta variable se intenta dilucidar en el próximo capítulo de análisis y resultados mediante un análisis de sensibilidad, es decir, variando el uso de los tipos de combustibles en los distintos modos de operación y observar cómo varían los resultados.

2.3 Tipos de naves

Como se ha mencionado en pasajes previos del presente documento, existe una gran variedad de buques que recalan a diario en puertos de nuestro territorio nacional. Ésta variedad se categoriza, principalmente, por el tipo de carga que transporta el buque. Sin embargo, para efectos de éste estudio, el tipo de embarcación determina ciertos parámetros técnicos que intervienen directamente en el cálculo de emisiones atmosféricas. Por lo tanto, al conocer el tipo de embarcación se definen variables tales como: la potencia instalada del motor principal, la potencia instalada del motor auxiliar y velocidad característica.

A partir de un análisis de la base de datos con la cual se desarrolla la estimación de emisiones, se logra visualizar los tipos de embarcaciones que mayor actividad poseen, en cuanto a movimientos portuarios. En función de esto, se decide que el estudio abarcará 16 tipos de naves de las 36 que contiene la base de datos. Los principales tipos de naves que abarca el estudio son: portacontenedor, granelero, carga rodada, pasajeros, petrolero, carga general, carga refrigerada, remolcador de altamar, pesqueros, quimiquero y gasero.

Los tipos de naves que se excluyen del estudio son: barcazas, lanchas, yates, entre otros. No se toman en cuenta para este estudio debido a su escaza presencia en los movimientos portuarios y, en otros casos, porque se tratan de embarcaciones de menor envergadura y cuyas emisiones atmosféricas no son significativas en comparación a las emisiones atmosféricas de grandes embarcaciones.

2.4 Base de datos de movimientos portuarios

La base de datos utilizada para el estudio consta de un registro histórico de las naves que entran y salen de un determinado puerto nacional. Dicho registro es facilitado por la Armada de Chile y, básicamente, consta de una tabla con la siguiente información en forma de columnas:

- Puerto al que ingresa la nave
- Nombre de la nave
- Bandera de la nave
- Tipo de nave
- Próximo puerto de destino de la nave
- Fecha y hora de arribo
- Fecha y hora de zarpe

Ésta información es el cimiento a partir del cual se desarrolla el cálculo de emisiones, análisis de los resultados y posteriores conclusiones. El registro histórico permite dilucidar la cantidad de naves que llegan a un determinado puerto, pudiendo categorizarlas por los tipos de nave. También, al conocer la fecha y hora tanto de arribo como de zarpe permite calcular las emisiones contaminantes cuando las naves se encuentran en el modo de operación "En puerto".

En particular, la base de datos utilizada en el estudio comprende un total de 44 puertos, 36 tipos de naves y posee un registro de aproximadamente 24.000 movimientos portuarios. La muestra hace referencia al período que abarca desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2015.

2.4.1 Pre-procesamiento de la base de datos

La información entregada en bruto consta de un archivo Excel con dos hojas de cálculo distintas: una para la recepción de naves y otra para el despacho de naves. Dicha situación obliga a cruzar ambas bases de datos con el fin de poder establecer la diferencia entre hora de arribo y hora de zarpe, es decir, el tiempo que cada nave estuvo en un puerto determinado. Para ello, fue necesario realizar un código computacional en Macros, herramienta de programación que ofrece Microsoft Excel, obteniendo como resultado una base de datos con la información debidamente pareada.

Sin embargo, dentro de la base de datos resultante existen valores atípicos que obligan a tomar una decisión fundamentada respecto si incluirlos o no dentro del estudio.

2.4.2 Valores atípicos y posibles causales

Con valor atípico se hace referencia a movimientos portuarios cuyo valor de tiempo en puerto ascienden a valores extremos que escapan del promedio y de la lógica común. También, se hace referencia a movimientos portuarios que simplemente tiene algún campo de información vacío, como por ejemplo fecha y hora de zarpe.

Estos valores pueden estar asociados a varias causales, las cuales se intentan explicar a continuación. Por una parte, se pueden tratar de errores cuya razón radique en el ingreso incorrecto de la información por parte del personal encargado. Para ejemplificar este tipo de situación, se identifican movimientos cuyo hora de arribo es la misma que su hora de zarpe, es decir, que la nave estuvo cero horas en el puerto, lo cual es ilógico. También, existen casos en los que la hora de zarpe simplemente está vacía. Por otra parte, según el Departamento de Tecnologías de la Información de DIRECTEMAR, los valores altos de tiempo de permanencia en puerto de algunas naves se pueden atribuir a diversos factores. Entre ellos encontramos:

- Naves que deben recalar en un puerto determinado por averías y/o fallas en su funcionamiento que deben ser atendidas. En algunos casos estas reparaciones toman tiempos considerables debido a la complejidad de las averías, espera de repuestos, mano de obra, etc.
- Naves que son dadas de baja. Estas sufren el proceso de baja durante su estadía en un puerto determinado mientras se regulariza su debida documentación para luego poder ser vendidas como chatarra, por partes, etc.
- Naves de tipo graneleras a veces permanecen mucho tiempo en puerto debido a razones sanitarias, cuando se da el caso de no cumplir exigencias impuestas por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).
- En el caso de buques pesqueros, estos cuentan con una cuota anual comercial a cumplir en relación a la pesca, y cuando satisfacen dicha cuota estas naves recalan en puerto hasta que se le asignen otros trabajos.
- Naves que son detenidas por verse involucradas en narcotráfico y transporte de sustancias ilícitas dentro de su carga. Esto obliga a la nave a permanecer mayor tiempo en puerto.

El ignorar la condición extrema de estos valores traería como consecuencia resultados de toneladas anuales de emisiones atmosféricas poco representativas, por lo que surge la necesidad de definir un criterio para tratar aquellos datos extremos.

Para solucionar este escenario, se decide identificar los datos atípicos descritos anteriormente y eliminarlos. Estos datos hablan de un suceso que efectivamente ocurrió (movimiento portuario), pero del cual no se tiene información válida, por lo que se decide excluir el valor atípico en cuestión y centrar el estudio en la fracción de la base de datos cuya información sí es representativa. El criterio utilizado para identificar datos atípicos fue consultado y avalado por el Encargado de Estadísticas del Departamento de Tecnologías de la Información de DIRECTEMAR, el Sr. Pedro Rojas Figueroa. Dicho criterio asegura que para toda nave con tiempo en puerto superior a los 30 días existe una alta probabilidad de que sea una nave que encaje en alguna de las causales descritas anteriormente, por lo cual se elimina del estudio. Un tiempo de 30 días en puerto equivale a un total de 720 horas, por lo que se decide excluir los movimientos que presenten más de 720 horas en puerto.

Posterior a la limpieza de la base de datos, las conclusiones son las siguientes: de un total original de 23.634 registros de movimientos portuarios, el estudio considera un 92% de éstos como datos válidos para el desarrollo del estudio. Esto equivale a 21.638 movimientos portuarios dentro del año 2015. Dentro de esos movimientos portuarios, 21.045 corresponden a movimientos asociados a los tipos de naves que el estudio considera, por lo que el resto de movimientos asociados a embarcaciones menores no se consideran.

2.4.3 Puertos

Un puerto se define como, según la Armada de Chile, un sitio ubicado sobre la costa o en la orilla de algún río donde los barcos llevan a cabo operaciones de embarque y desembarco de carga (Armada de Chile, 2016).

Los puertos presentes en la base de datos y que serán incluidos en el estudio son 44 e incluyen regiones de todo el país. A continuación, se muestra una tabla con los puertos que considera el estudio categorizados por región del país a la que pertenecen:

Región - Nombre	Puertos
XV - Arica	Arica
I - Tarapacá	Iquique, Patache
II - Antofagasta	Antofagasta, Mejillones, Tocopilla
III - Atacama	Caldera, Chañaral, Huasco – Guacolda
IV - Coquimbo	Coquimbo, Los Vilos
V - Valparaíso	Hanga – Roa, Juan Fernández, Quintero, San Antonio, Valparaíso
VIII – Bío-Bío	Coronel, Lirquén, Lota, San Vicente, Talcahuano
XIV – Los Ríos	Corral, Panguipulli, Valdivia
X – Los Lagos	Achao, Ancud, Calbuco, Castro, Chaitén, Chonchi, Puerto Montt, Puerto Varas, Quellón, Quemchi
XI - Aysén	Aguirre, Chacabuco, Cisnes, Lago General Carrera, Melinka
XIII - Magallanes	Punta Arenas, Punta Delgada, Puerto Natales, Puerto Williams, Tierra del Fuego

Tabla 8: Puertos que considera el estudio ordenados por Región de Chile a la que pertenecen.

2.4.4 Tiempo en Puerto

Esta variable es de suma importancia a la hora de calcular las emisiones atmosféricas en modo "En Puerto", pues entre más tiempo se encuentre la nave atracada en un determinado puerto, mayor será la cantidad de emisiones atmosféricas asociadas. Esta variable se obtiene a partir de la base de datos proporcionada por la Armada de Chile, en la cual se especifica la fecha y hora tanto de arribo como de zarpe.

Por un lado, la fecha y hora de arribo considera cuando la nave se encuentra detenida en la zona de recalada lista para realizar maniobras de carga/descarga de mercancía, pasajeros, tripulación, etc. Análogamente, la fecha y hora de zarpe indica cuando el barco inicia su rumbo desde el puerto donde recaló hacia su próximo destino. Es importante esclarecer a qué hace referencia esta información, pues a partir de ella es posible desarrollar un cálculo robusto de las emisiones asociadas al modo "En Puerto".

Además, se destaca que en el caso particular de diciembre se tienen registros de naves que ingresaron a un puerto determinado, pero que no poseen salida alguna, pues, probablemente, su salida tomó lugar en algún momento posterior en enero del año siguiente. Este déficit se intenta compensar de alguna forma, pero se torna en una tarea difícil de realizar, pues el compensar esas horas implicaría agregar horas a puertos que no necesariamente tienen

asociado ese nivel de actividad, por lo que se procede a desarrollar el inventario teniendo asumiendo la existencia de este déficit durante el mes de diciembre.

Sin embargo, la suma de horas en puerto es un parámetro a considerar en un posterior análisis de sensibilidad para evidenciar el impacto que tiene sobre las emisiones anuales.

2.5 Principales Supuestos

En orden de obtener la cantidad de emisiones contaminantes para un puerto determinado, es necesario establecer ciertas suposiciones que permitan el desarrollo de un cálculo cuyos resultados sean representativos y cercanos a la realidad. El incluir supuestos al momento de desarrollar inventarios de emisiones responde a la necesidad de tomar acciones frente a escenarios en los cuales no se cuenta con información robusta, consolidada, fiable y con el alcance que al investigador le gustaría. El caso particular de este trabajo no es la excepción, pues existe información acerca de determinados parámetros muy difícil de obtener.

Sin embargo, se propone como solución adoptar supuestos cuyo respaldo sea en base a argumentos sólidos, los cuales son explicados y descritos a continuación.

2.5.1 Ecuaciones

En primer lugar, se procede a definir formalmente las ecuaciones que permiten el cálculo de cantidad de contaminante asociado a embarcaciones marítimas. La presente metodología se define como una que calcula emisiones a partir de la actividad portuaria y de capacidades instaladas por tipos de naves. De esta forma, se proponen dos ecuaciones para la estimación de contaminantes atmosféricos provenientes de embarcaciones marítimas: una para el modo de operación “En Puerto” y otra que contempla los modos de operación “En Océano” y “En Maniobra” (Entec UK Limited, 2010).

Por un lado, se tiene la ecuación que representa la cantidad de emisiones contaminantes para el modo de operación “En Océano” y “En Maniobra”:

$$E_{m_i} = \frac{1}{v}[(MP * FC_{MP} * FE_i) + (MA * FC_{MA} * FE_i)] \quad (1)$$

Dónde:

E_{m_i}: Emisiones en modo de operación “En Maniobra” o “En Océano” para el contaminante i. Se miden en [g/km]. Donde i representa cada contaminante en particular.

v: Velocidad de servicio de la nave, expresada en [km/hr].

MP: Potencia instalada del Motor Principal, medida en [kW].

FC_{MP}: Factor de Carga bajo el cual trabaja el Motor Principal, expresado en porcentaje [%].

FE_i: Factor de Emisión del contaminante i. Expresado en [g/kWh].

MA: Potencia instalada del Motor Auxiliar, medida en [kW].

FC_{MA}: Factor de Carga bajo el cual trabaja el Motor Auxiliar, expresado en porcentaje [%].

Por otro lado, se tiene la ecuación que representa la cantidad de emisiones contaminantes para el modo de operación "En Puerto":

$$E_{p_i} = T[(MP * FC_{MP} * FE_i) + (MA * FC_{MA} * FE_i)] \ (2)$$

Dónde:

E_{p_i}: Emisiones contaminantes en modo de operación "En Puerto" para el contaminante i, expresadas en [g]. Donde i representa cada contaminante en particular.

T: Tiempo que la nave permanece en el puerto, expresado en [h].

MP: Potencia instalada del Motor Principal, medida en [kW].

FC_{MP}: Factor de Carga bajo el cual trabaja el Motor Principal, expresado en porcentaje [%].

FE_i: Factor de Emisión del contaminante i. Expresado en [g/kWh].

MA: Potencia instalada del Motor Auxiliar, medida en [kW].

FC_{MA}: Factor de Carga bajo el cual trabaja el Motor Auxiliar, expresado en porcentaje [%].

En el caso del modo "En Océano" y "En Maniobra", es necesario multiplicar el valor calculado por la distancia recorrida en kilómetros asociada al respectivo modo de operación para obtener las emisiones en término de masa.

Destacar que el presente estudio se centra en el cálculo de las emisiones atmosféricas que más influyen en las zonas pobladas cercanas a los puertos de Chile, es decir, las emisiones asociadas a los modos de operación "En Maniobra" y "En Puerto", siendo el total de emisiones la suma de las emisiones calculadas en ambos modos.

2.5.2 Velocidad de servicio por tipo de nave

La velocidad de servicio también es conocida como velocidad crucero y hace referencia a la velocidad que alcanza la embarcación en altamar, es decir, cuando se encuentra operando en modo "En Océano", lejos de zonas costeras. Por lo general, ésta es una velocidad que se mantiene constante a lo largo de la operación en este modo.

Dada la dificultad que implica el recopilar información sobre las velocidades de operación de cada una de las naves que haya embarcado y desembarcado en Chile, es necesario trabajar en torno a una aproximación. Como se menciona anteriormente, el presente trabajo investigativo adopta como referencia la metodología de trabajo aplicada en el estudio titulado "Ship Emissions Inventory" y desarrollado por la organización Entec el año 2010. En dicho documento, se cuenta con una extensa base de datos de movimientos portuarios en la zona europea y variadas características de las naves que la componen. Dicha base de datos es de propiedad de la empresa Lloyd's Maritime Intelligence Unit (Lloyd's MIU). A partir de la base de datos, el estudio extrae información estadística de la velocidad crucero por categoría de naves, tales como: promedio, mediana y desviación estándar. A continuación se presenta una tabla extraída del estudio, la cual resume la información recientemente planteada.

Vessel category	Number of vessels	Coverage	Median service speed (knots)	Mean service speed (knots)	Standard deviation of service speed (knots)
Bulk Carrier	2,306	93.7%	14	14.1	1.0
Container Ship	1,282	99.5%	21	21.2	3.5
Fishing	368	46.1%	12.5	13.0	2.6
General Cargo	3,486	95.0%	12	13.2	3.1
Others	1,245	60.6%	12	12.8	3.4
Passenger	307	81.6%	21	20.6	7.3
Ro-Ro cargo	702	91.4%	18	18.0	2.9
Tanker	2,434	85.7%	14	14.3	1.7
TOTAL	**12,130**	**85.1%**			

Tabla 9: Análisis estadístico de las velocidades de servicio realizado por el estudio citado para cada categoría de embarcación de la base de datos de Lloyd's MIU (Entec UK Limited, 2010).

Se tiene que el análisis estadístico cubre aproximadamente un 85% del total de la muestra y entrega la mediana, el promedio, y la desviación estándar de la velocidad crucero expresada en nudos para cada categoría de embarcaciones (Entec UK Limited, 2010). Es pertinente entender que dentro de cada categoría, existe un número determinado de naves y cada una de ellas puede presentar variaciones respecto de sus pares en cuanto a la velocidad de servicio. Es por esto que la información se somete a un análisis estadístico que permita obtener variables representativas. Por consiguiente, las velocidades mostradas en la Tabla 9 serán las que el presente estudio considera y aplica en el desarrollo de la metodología de trabajo.

Se toma dicha decisión en base a que se consideran sólidos los argumentos que presenta el documento para avalar dichos valores. Es más, el estudio desarrollado por Entec presenta fuentes de información alternativas para poder asegurar que los valores escogidos son realísticos. Las fuentes alternativas son una compañía naviera destacada mundialmente,

agencia medioambiental y estudio investigativo generado por prestigiosa universidad, respectivamente: China Ocean Shipping Company (COSCO), United States Environmental Protection Agency (US EPA) y National Technical University of Athens (NTUA). También, el estudio mencionado recopila información directamente con operadores de determinadas naves.

Por lo tanto, las velocidades crucero definidas para cada tipo de embarcación se presentan en la siguiente tabla:

Tipo de Nave	Velocidad de Servicio [nudos]
Portacontenedor	21,2
Granelero	14,1
Carga Rodada	18
Transbordador	18
Pasaje de Transbordo Rodado	18
Petrolero	12
Carga General	13,2
Carga Refrigerada	12,8
Remolcador de Altamar	13
Pesquero de Arrastre	13
Pesquero de Cerco	13
Wellboat	13
Tanque Quimiquero	14,3
Gasero	14,3
Pasaje	20,6
Pasaje Cabotaje	20,6

Tabla 10: Velocidades de servicio para cada categoría de nave consideradas para el presente trabajo investigativo (Entec UK Limited, 2010).

2.5.3 Velocidad de la embarcación al aproximarse al puerto

Es lógico plantear que las embarcaciones disminuyen su velocidad paulatinamente al acercarse al puerto de destino. Ésta disminución responde a la necesidad por parte de los operadores de contar con una maniobrabilidad mayor y de tener un mayor control de la situación para evitar riesgos innecesarios. En términos de emisiones contaminantes, una disminución de la velocidad a la cual opera la nave significa un cambio de la cantidad de contaminantes que se emana a la atmósfera. Por un lado, una disminución de velocidad

implica que al barco le toma más tiempo en llegar al puerto, por lo que se tiene un mayor tiempo de emanación de contaminantes. Por otro lado, una disminución de velocidad de la nave se traduce en un menor consumo de combustible, es decir, la condición a la que opera la nave exige utilizar una cantidad de energía menor con respecto a velocidades más altas. Por lo tanto, se tiene una cantidad menor de emisiones contaminantes. Dada la limitada cantidad de información disponible sobre este tópico, este trabajo no considera el valor específico en cuanto a la reducción de velocidades por parte de las naves al momento de acercarse al puerto.

2.5.4 Potencia del motor principal y auxiliar

Para la aproximación en la variable potencia del motor principal y auxiliar de las embarcaciones marítimas se recurre a un análisis estadístico de una base de datos provista por Lloyd MIU en el estudio de la empresa Entec UK Limited. La base de datos cuenta con el registro de 14.225 embarcaciones y se cuenta con información sobre la potencia del motor principal del aproximadamente 96% del total, en donde la mayoría son motores diésel de velocidad media de 4 tiempos y de velocidad baja de 2 tiempos (Entec UK Limited, 2010). Para cubrir la información restante, el estudio citado identifica tendencias para cada categoría de naves entre la variable potencia y tonelaje bruto[10] (del inglés gross tonnage). Se utiliza la ecuación de correlación que arrojan estas dos variables para asumir los valores desconocidos.

En cuanto a información disponible sobre potencias de motores auxiliares, solo se cuenta con un 36% del total. En general, estos motores suelen ser de velocidad alta o media y de 4 tiempos. El estudio citado calcula a partir de la data conocida el cociente entre la potencia de los motores principales y la potencia de los motores auxiliares, para cada categoría de naves. Luego, se asumen las cantidades desconocidas mediante la multiplicación de la potencia del motor principal por el cociente apropiado de cada categoría (Entec UK Limited, 2010). Dicha información se resume en la siguiente figura:

[10] Tonelaje bruto es un término que hace referencia a la capacidad de transportar carga de una embarcación en cuanto a volumen disponible, es decir, el espacio total disponible de una embarcación para acumular carga sin comprometer la seguridad de la embarcación. Se mide en unidad de volumen y no de masa (se suele confundir con el Tonelaje Peso Muerto).

Vessel Category	Number of vessels	AE Total Power (kW)	ME Total Power (kW)	Ratio of Total AE/Total ME	Average of ratio of AE/ME per vessel
Bulk Carrier	846	1,627,555	7,595,982	0.23	0.21
Container Ship	521	2,822,373	12,611,795	0.28	0.22
Fishing	86	105,685	165,481	0.57	0.64
General Cargo	1,811	1,777,232	5,467,977	0.37	0.33
Others	250	152,445	522,972	0.31	0.29
Passenger	37	58,431	166,526	0.45	0.35
Ro – Ro cargo	211	532,972	1,765,660	0.34	0.30
Tanker	1,118	2,736,512	10,115,796	0.35	0.27

Tabla 11: Potencia total de motores principales y auxiliares de la base de datos de Lloyd MIU por categoría de naves (Entec UK Limited, 2010).

A partir de esta información, se desprenden las potencias promedio que el presente estudio investigativo abordará para la estimación de emisiones. Por lo tanto, los valores a considerar son:

Tipo de Nave	Potencia Promedio Motor Principal [kW]	Potencia Promedio Motor Auxiliar [kW]
Portacontenedor	24.200	5.420
Granelero	8.980	1.925
Carga Rodada	8.368	2.485
Transbordador	4.000	1.500
Pasaje de Transbordo Rodado	4.000	1.500
Petrolero	9.040	2.040
Carga General	2.400	700
Carga Refrigerada	2.092	1.580
Remolcador de Altamar	1.924	1.229
Pesquero de Arrastre	1.924	1.229
Pesquero de Cerco	1.924	1.229
Wellboat[11]	962	615
Tanque Quimiquero	9.048	2.448
Gasero	9.048	2.448
Pasaje	4.000	1.500
Pasaje Cabotaje	4.000	1.500

Tabla 12: Valores asumidos de potencias de motor principal y auxiliar para cada tipo de nave en el presente estudio (Entec UK Limited, 2010).

Recalcar que los valores tomados responden a un promedio de valores y que se considera representativo dada la seriedad del estudio citado.

2.5.5 Velocidad del motor principal y auxiliar

La velocidad del motor hace referencia a las revoluciones por minuto asociadas al eje mecánico el cual transmite la potencia. En el ámbito marítimo, se identifican 3 principales velocidades (Cooper & Gustafsson, 2004):

- Velocidades bajas: menores a 300 rpm.
- Velocidades medias: entre 300 y 1.000 rpm.
- Velocidades altas: sobre 1.000 rpm.

.

[11] Los valores obtenidos para esta categoría de nave fueron obtenidos a partir del testimonio de Ingeniero Marino Mercante parte de la tripulación de una nave de este tipo.

Tomando como base, nuevamente, el estudio elaborado por la empresa Entec, se identifican velocidades del motor principal categorizadas por tipo de nave como también por envergadura de éstas (tonelaje bruto). Estas velocidades son propuestas en función de un análisis estadístico de la base de datos a partir de la cual se desarrolla dicho estudio.

Para el caso de la velocidad del motor principal en el modo de operación “En Océano”, se considera la velocidad del dominante para cada categoría de nave propuesta por el estudio citado. Para el modo de operación “En Maniobra”, se tiene en consideración que todas las naves deben disminuir su velocidad hasta el punto que le otorgue mayor maniobrabilidad a la nave a medida que se acerca al puerto. Esto trae como consecuencia una disminución significativa en las rpm del motor principal, por lo tanto para este modo se escogen velocidades bajas. De esta forma, se tiene que los motores principales operan, mayoritariamente, en velocidades medias y bajas.

Para el caso de la velocidad del motor auxiliar, se considera una distribución uniforme de velocidades medias entre los distintos modos de operación (Entec UK Limited, 2010).

Tipo de Nave	RPM Motor Principal	RPM Motor Auxiliar
Portacontenedor	Baja	Media
Granelero	Baja	Media
Carga Rodada	Media	Media
Transbordador	Media	Media
Pasaje de Transbordo Rodado	Media	Media
Petrolero	Baja	Media
Carga General	Media	Media
Carga Refrigerada	Media	Media
Remolcador de Alta Mar	Media	Media
Pesquero de Arrastre	Media	Media
Pesquero de Cerco	Media	Media
Wellboat	Media	Media
Tanque Quimiquero	Baja	Media
Gasero	Media	Media
Pasaje	Media	Media
Pasaje Cabotaje	Media	Media

Tabla 13: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Océano" (Entec UK Limited, 2010).

Tipo de Nave	RPM Motor Principal	RPM Motor Auxiliar
Portacontenedor	Baja	Media
Granelero	Baja	Media
Carga Rodada	Baja	Media
Transbordador	Baja	Media
Pasaje de Transbordo Rodado	Baja	Media
Petrolero	Baja	Media
Carga General	Baja	Media
Carga Refrigerada	Baja	Media
Remolcador de Alta Mar	Baja	Media
Pesquero de Arrastre	Baja	Media
Pesquero de Cerco	Baja	Media
Wellboat	Baja	Media
Tanque Quimiquero	Baja	Media
Gasero	Baja	Media
Pasaje	Baja	Media
Pasaje Cabotaje	Baja	Media

Tabla 14: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Maniobra".

Tipo de Nave	RPM Motor Principal	RPM Motor Auxiliar
Portacontenedor	-	Media
Granelero	-	Media
Carga Rodada	-	Media
Transbordador	-	Media
Pasaje de Transbordo Rodado	-	Media
Petrolero	-	Media
Carga General	-	Media
Carga Refrigerada	-	Media
Remolcador de Alta Mar	-	Media
Pesquero de Arrastre	-	Media
Pesquero de Cerco	-	Media
Wellboat	-	Media
Tanque Quimiquero	-	Media
Gasero	-	Media
Pasaje	-	Media
Pasaje Cabotaje	-	Media

Tabla 15: Valores asumidos de rpm de motor principal y auxiliar para el modo de operación "En Puerto".

2.5.6 Porcentaje de carga a la que operan los motores

Se establecen valores porcentuales aproximados en referencia a la carga bajo la cual operan el motor principal y auxiliar de una embarcación, dependiendo del modo de operación en el que se encuentren (Entec UK Limited, 2010). Los valores sugeridos son los siguientes:

Modo de Operación	% Carga MP	% Carga MA
Océano	80%	30%
Maniobra	20%	50%
Puerto	0%	40%

Tabla 16: Valores asumidos para los factores de carga bajo los cuales operan los motores en los distintos modos de operación en el presente estudio (Entec UK Limited, 2010).

2.5.7 Distancia recorrida en modo “En Maniobra”

En primer lugar, es necesario aclarar la terminología que utiliza el presente estudio y la convergencia de ésta con el léxico propio de las actividades marítimas. Por una parte, reiterar que, para este estudio, el modo de operación “En Maniobra” hace referencia a la etapa del viaje de la nave en la cual ésta se encuentra a una distancia cercana al puerto y comienza a

disminuir su velocidad, por lo tanto, disminuye la carga de operación asociada al motor principal. Además, es en esta fase en la cual, en algunos casos, se da lugar a un cambio de combustible residual a un combustible destilado. Por otra parte, existe el término marítimo "a la gira", el cual está estrechamente relacionado al término "fondear". Se dice que el verbo "fondear" hace referencia a la acción de dejar caer el ancla en el punto de fondeo a fin a aguantar el buque en un sitio dado, mientras que el término "a la gira" se conoce como un método de fondeo de un buque en condiciones de que éste pueda dar vueltas libremente en torno al ancla fondeada (Rosas Gómez, 1995). Un método de fondeo puede ser realizado tanto al momento de atracar como en diversas ocasiones, como por ejemplo, al momento de enfrentar condiciones climáticas adversas que impidan el avance seguro de la nave.

Como se menciona anteriormente, tanto para los modos "En Océano" y "En Maniobra" la ecuación que permite calcular las emisiones contaminantes es la misma y entrega el valor de las emisiones en términos de gramos de contaminante por kilómetro recorrido. Es por esto que, para obtener valores de emisiones atmosféricas en términos de masa, al valor calculado es necesario multiplicarlo por la distancia recorrida. Es entendible que este parámetro no pueda ser medido ni calculado para cada nave que recala en un puerto en el territorio nacional a lo largo de todo el año 2015. Por lo tanto, nuevamente, hay que enfrentar dicho escenario mediante aproximaciones y supuestos que ayuden a calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos de la forma más cercana a la realidad posible.

Se realiza una búsqueda exhaustiva de información para resolver este parámetro, como por ejemplo, acudir directamente a la Armada de Chile en busca de algún marco regulatorio en base al cual las naves hagan ingreso al puerto determinado, pero solo se logra evidenciar lo difícil que es medir este parámetro, pues depende de muchos factores. En efecto, la distancia recorrida "En Maniobra" depende fuertemente de las condiciones geográficas de cada puerto, puesto que cada uno tiene puntos de fondeo estratégicos. También, depende del criterio del capitán a cargo de cada nave, de las disposiciones locales de cada puerto, capacidades evolutivas de cada nave[12], condiciones climatológicas, entre otros.

No obstante, existen diversos estudios que desarrollan inventarios de emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo en regiones específicas del mundo, los cuales utilizan metodologías de trabajo similares a las adoptadas en este trabajo. En efecto, un estudio focalizado en el puerto de Samsun en Turquía dentro de su metodología de trabajo mide la distancia recorrida en el modo "En Maniobra" por las naves pertenecientes a la muestra de

[12] La capacidad evolutiva de un buque es la mínima distancia necesaria para lograr que el buque se detenga por completo.

estudio, sugiriendo considerar un rango de 3,7 a 5,5 [km] para la región considerada (Alver, Saraç, & Alver Sahin). Además, un estudio que mide la influencia de las emisiones en puertos focalizado en la región de las costas italianas en el mar Mediterráneo, sugiere que para las naves consideradas en su muestra, el tiempo promedio de éstas operando en modo "En Maniobra" asciende a 40 ± 15 [min] (Merico, y otros, 2016). En base a esto es que se ha decidido establecer como distancia recorrida en modo maniobra 5 kilómetros.

A partir de lo propuesto en los estudios citados previamente y en función de la información recopilada con respecto a movimientos portuarios, se concluye lo siguiente: las emisiones asociadas al modo "En puerto" son calculadas de forma directa a partir la base de datos de movimientos portuarios y del modelo propuesto en la presente metodología descrita, mientras que las emisiones asociadas al modo "En Maniobra" son calculadas con la información recopilada y las aproximaciones con respecto a la distancia recorrida recientemente expuesta y sometidas a un posterior análisis de sensibilidad con respecto al parámetro distancia recorrida. Esto se detalla con mayor profundidad en el siguiente capítulo de resultados obtenidos.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 Introducción

La presente sección muestra los principales resultados del desarrollo del cálculo de emisiones contaminantes asociadas al transporte marítimo en Chile durante el año 2015. Se han considerado 28 contaminantes en total, pero por motivos de extensión del documento esta sección solo muestra 3 de ellos: NO_x, CO_2 y $PM_{2,5}$. Pues, hoy en día, estos son los contaminantes más importantes y de mayor interés a nivel local y global.

Este capítulo se divide en dos partes. La primera, muestra los resultados generales obtenidos aplicando los supuestos expuestos en el apartado anterior. Se muestra la distribución de emisiones por región, como también la distribución mensual de emisiones contaminantes.

Estos resultados son comparados con estudios previos donde también se han calculado emisiones atmosféricas en el sector de transporte marítimo en Chile. Las comparaciones a realizar son las siguientes:

- Estudio de Ingeniería DICTUC para la comparación a nivel nacional de las emisiones de contaminantes de vida corta en términos de toneladas anuales (Ingeniería DICTUC, 2017).
- Memoria de licenciatura para optar al título de ingeniero civil mecánico de José Espinoza. Se utiliza este estudio para comparar las cantidades de emisiones atmosféricas anuales en la región de Valparaíso. Esta región incluye solo los puertos de Valparaíso, San Antonio y Quintero (Espinoza Torres, 2014).
- Agencia Internacional de la Energía para la comparación a nivel nacional de las emisiones en términos de toneladas anuales de CO_2 (International Energy Agency, 2016).

La segunda parte del capítulo muestra los resultados obtenidos en torno a un análisis de sensibilidad de los siguientes parámetros: distancia recorrida “En Maniobra”, tipo de combustible utilizado y tiempo en puerto. Por análisis de sensibilidad se entiende como un mecanismo en el que se calculan nuevos valores a partir de una variación de un parámetro en particular perteneciente al modelo de cálculo de emisiones. A partir de los nuevos valores, se busca realizar una interpretación de los nuevos escenarios con respecto a la importancia del parámetro sensibilizado.

A continuación, se muestra un breve análisis de los movimientos portuarios que se dieron lugar en los puertos del territorio nacional a lo largo del año 2015.

En primer lugar, se muestra el nivel de participación asociado a cada tipo de nave que considera el estudio durante los movimientos portuarios que se dieron en el país durante el año 2015.

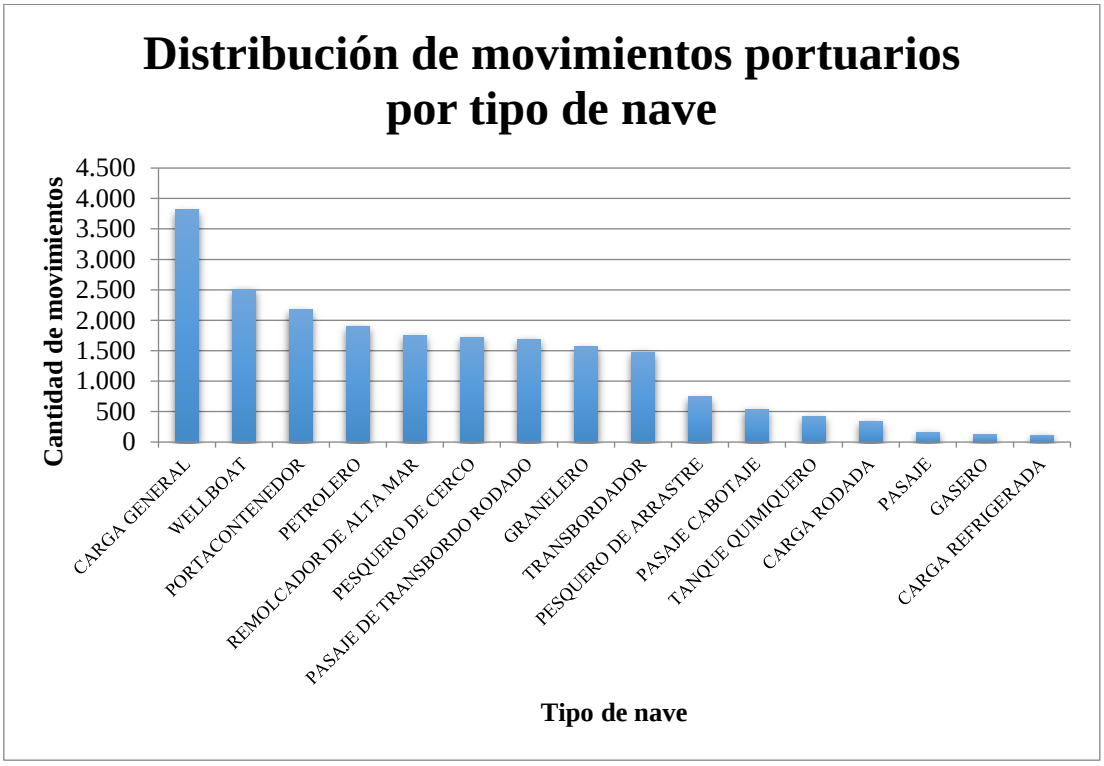

Gráfico 6: Se muestra la cantidad de movimientos portuarios durante el año 2015 para cada tipo de nave considerada por el estudio.

Notar que el tipo de nave que más participación tuvo en el tráfico marítimo fue el de carga general, sobrepasando los 3.500 movimientos, los cuales representan el 18% del total de movimientos. Le siguen los tipos wellboat[13], portacontenedor y petrolero, con 12%, 10% y 9% del total de movimientos, respectivamente. Luego, con un 8% de participación, les siguen las naves del tipo pesquero de cerco, pasaje de transbordo rodado y remolcador de altamar. Con un 7% de participación están las naves del tipo transbordador y granelero. Finalmente, se encuentran naves con menos de 1.000 movimientos, las cuales son de tipo carga refrigerada, carga rodada, gasero, pasaje, pasaje cabotaje, pesquero de arrastre y tanque quimiqueros. Se intuye que la presente distribución responde a las necesidades de los distintos sectores de la economía que sostiene al país y al tipo de productos que se transportan desde y hacia nuestro país por el medio marítimo. Se observa la fuerte predominancia de naves de tipo carga general, las cuales son asociadas a una gran variedad de productos, como también al

[13] Las naves de tipo wellboat son un tipo de naves pesqueras que tienen como particularidad la recepción y transporte de peces vivos dentro de ellas.

transporte de minerales tales como el cobre. También se observa, una fuerte presencia de naves pesqueras, actividad la cual es altamente desarrollada en nuestro país.

En segundo lugar, se elabora la distribución de movimientos por cada región del país, representada en el siguiente gráfico. A su vez, la barra de la cantidad de movimientos de cada región muestra cómo se compone en términos de tipos de naves.

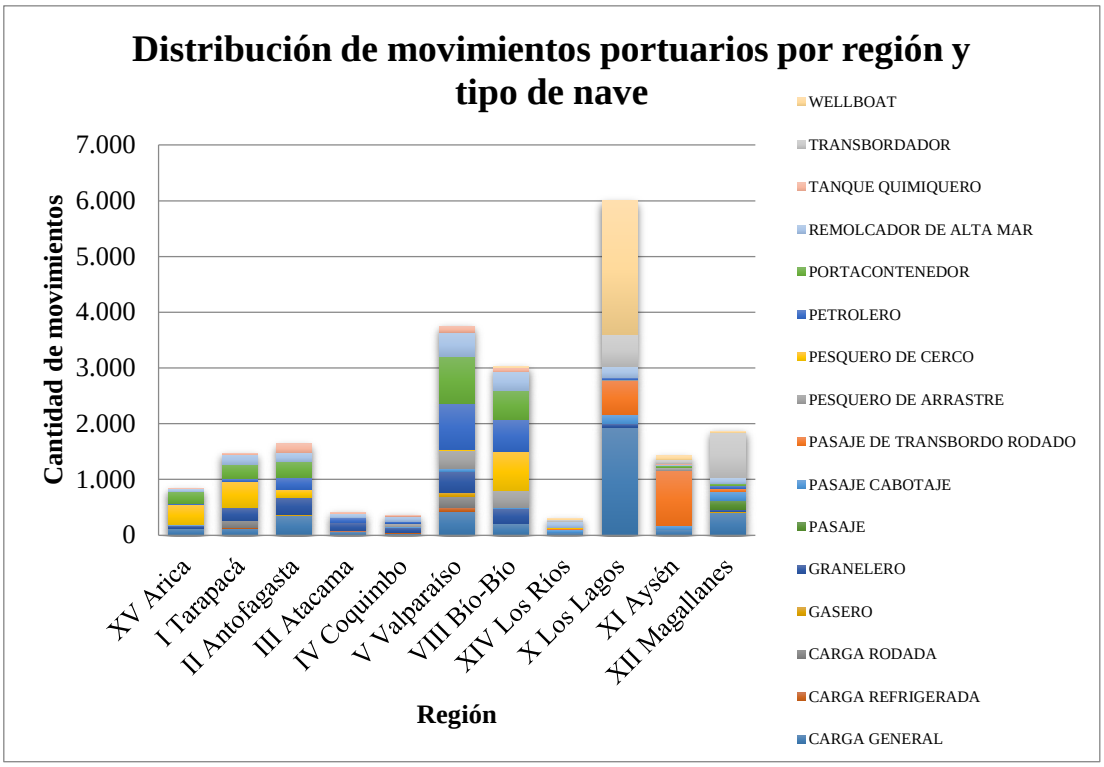

Gráfico 7: Distribución de la cantidad de movimientos portuarios por región durante el año 2015. Cada barra del gráfico muestra la composición de dicha cantidad en términos de tipos de naves.

Se observa una clara predominancia de cantidad de movimientos portuarios en la X región de Los Lagos con 6.000 movimientos aproximadamente. Le siguen las regiones de Valparaíso y Bío-Bío con aproximadamente 3.800 y 3.000 movimientos, respectivamente. Luego, se encuentran las regiones de Magallanes, Antofagasta, Tarapacá y Aysén. Dichas regiones presentan un rango de movimientos portuarios de 1.000 a 2.000 movimientos. Finalmente, se tienen las regiones de Arica, Atacama, Coquimbo y Los Ríos, cuya cantidad de movimientos portuarios de cada región ronda entre los 300 y 1.000. Además, se torna interesante analizar qué tipos de naves poseen una presencia preponderante en cada región. Se tiene que para la X región de Los Lagos predominan las naves de tipo wellboat, carga general y pasaje de transbordo rodado. Para la V región de Valparaíso, se observa una mayor variedad de tipos de naves, siendo las predominantes las naves de tipo petrolero, portacontenedores, carga general, granelero, remolcadores y pesqueros de arrastre. Para la VIII región de Bío-Bío se tiene una

distribución de tipos de naves similar a la de la región de Valparaíso. Sin embargo, irrumpe la presencia de naves de tipo pesquero de cerco y menor cantidad de naves petroleras y portacontenedores. En el caso de las regiones del norte del país (Arica, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo) las naves que predominan, en general, son las de tipo pesquero de cerco, carga general, portacontenedor y granelero. Para el caso de regiones al sur de nuestro país, tales como Aysén, Magallanes y Los Ríos, se observa la predominancia de naves de tipo pasaje de transbordo rodado, transbordador y, en menor medida, carga general.

Finalmente, se busca dilucidar, a través de un gráfico de torta, la relevancia de cada puerto en particular con respecto al tráfico marítimo que se da lugar en ellos.

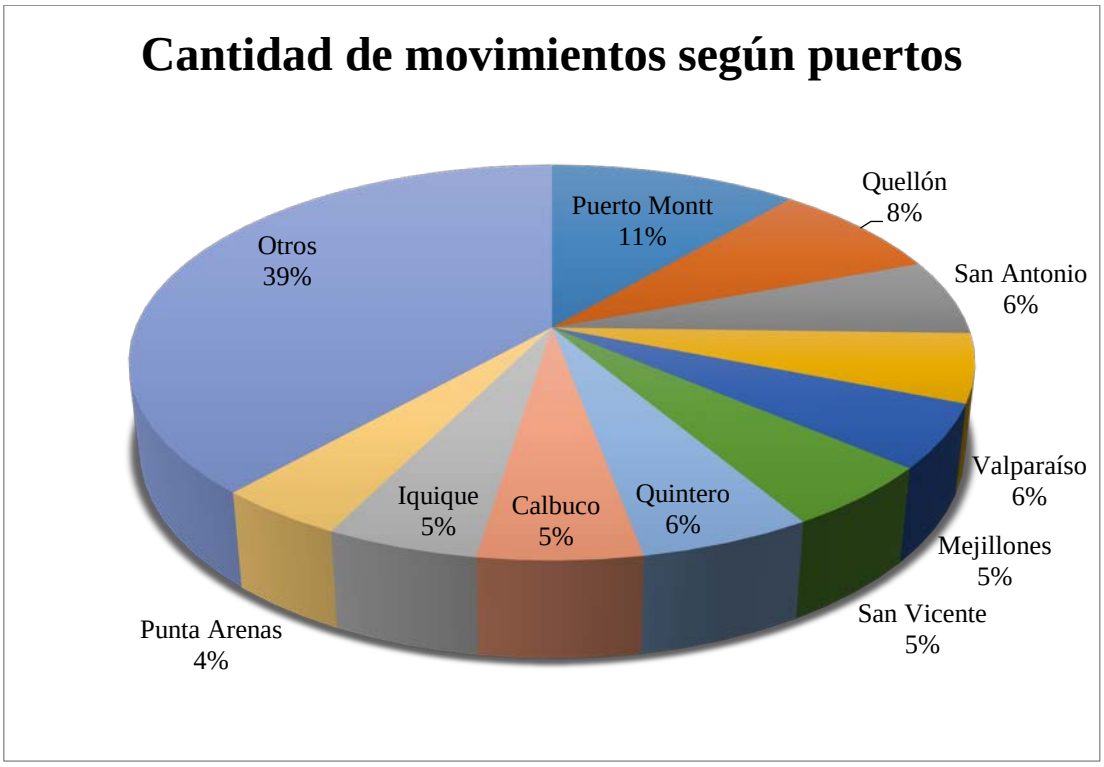

Gráfico 8: Representación gráfica de la cantidad de movimientos de cada puerto considerado por el estudio posee a lo largo del año 2015.

El gráfico anterior muestra el nivel de actividad en cuanto a movimientos portuarios en cada puerto durante el año 2015, considerando solo el tipo de naves que el presente estudio abarca. Se observa que el puerto que mayor cantidad de movimientos acumula es Puerto Montt, con 2.200 movimientos que representan un 11% del total. Le siguen Quellón, con un 8% de participación y San Antonio, Quintero y Valparaíso con 6% de participación cada uno. Con un 5% de participación les siguen los puertos de San Vicente, Iquique, Mejillones y Calbuco. Finalmente, se tiene que el puerto de Punta Arenas representa un 4% de los movimientos portuarios durante el 2015.

El resto de los 34 puertos poseen una cantidad de movimientos anuales que caen dentro del rango de 1.200 y 500 movimientos cada uno aproximadamente y están representados en el gráfico mediante la porción denominada como Otros, la cual representa el 39% de los movimientos.

El reconocer los puertos con mayor actividad portuaria entrega un primer alcance con respecto en qué zona nacional se concentrará la mayor proporción de emisiones contaminantes, puesto que es lógico pensar que un puerto con alta actividad y flujo de naves tenga asociado un mayor nivel de emisiones atmosféricas. Sin embargo, es importante tener en consideración que no solo la cantidad de movimientos es importante a la hora del cálculo de emisiones, sino que también los tipos de naves asociados a cada puerto, pues el nivel de emisiones atmosféricas que estas emanan no es homogéneo con respecto al tipo de nave. Esto está relacionado, de cierta forma, con el tonelaje que moviliza un puerto en particular, pues existen naves de mayor envergadura capaz de transportar un número mayor de toneladas cuyas emisiones son distintas a las de naves de menor envergadura. Además, se debe considerar el parámetro tiempo en puerto en cada caso, el cual también tiene incidencia directa en los resultados.

Al enmarcar el análisis de los Gráficos 7 y 8 bajo una perspectiva global surgen observaciones interesantes, pues se evidencian necesidades propias de cada región que se ven reflejadas en la distribución de los tipos de naves que recalan en sus puertos. Se observa que la actividad pesquera está presente en la mayoría de las regiones, dado que es un recurso valioso que abunda en nuestro país. También, en la zona sur es lógico hallar una alta presencia de naves enfocadas al transporte de pasajeros y vehículos, dado que son regiones en las cuales el transporte marítimo suele ser la única alternativa para la comunicación entre localidades dadas las condiciones geográficas de esa zona del país.

3.2 Resultados globales

En esta sección se presentan los principales resultados del desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo en Chile durante el año 2015, mediante el uso del modelo desarrollado y sus supuestos asociados. Los resultados contemplan la suma de emisiones asociadas a los modos de operación en maniobra y en puerto.

En primer lugar, se muestra el total de emisiones asociadas a cada mes de los contaminantes NO_x, CO_2 y $PM_{2,5}$, expresadas en toneladas:

Mes	NOx	CO_2	$PM_{2,5}$
Enero	886	45.319	14
Febrero	953	48.728	15
Marzo	1.238	63.303	19
Abril	1.016	51.961	16
Mayo	1.109	56.699	17
Junio	966	49.394	15
Julio	1.031	52.756	16
Agosto	1.068	54.621	17
Septiembre	890	45.511	14
Octubre	1.073	54.875	17
Noviembre	1.030	52.708	16
Diciembre	759	38.853	12
Total general	**12.017**	**614.726**	**189**

Tabla 17: Cantidad total de emisiones de contaminantes principales asociadas a cada mes.

Mediante la tabla anterior es posible apreciar las toneladas de contaminantes principales que fueron emanadas cada mes, tomando en cuenta todos los puertos de Chile y tipos de naves consideradas en el estudio para el año 2015. Se tiene como denominador común entre los tres contaminantes que los valores mensuales de toneladas de emisiones se mueven dentro de un rango regular para cada contaminante, es decir, para cada contaminante no existe una variación significativa entre los valores de toneladas de emisiones de cada mes.

Resulta interesante afirmar que, a partir de la información mostrada, el mes en el que más contaminantes se emanan es marzo, para los tres contaminantes mostrados. Esto se explica, básicamente, porque marzo es el mes que presenta mayor tráfico marítimo en los puertos de Chile. En efecto, esto concuerda con el siguiente gráfico, el cual presenta la distribución mensual de la variable suma de tiempo en puerto, la cual considera el tiempo en puerto acumulado por todas las naves y puertos considerados en el estudio.

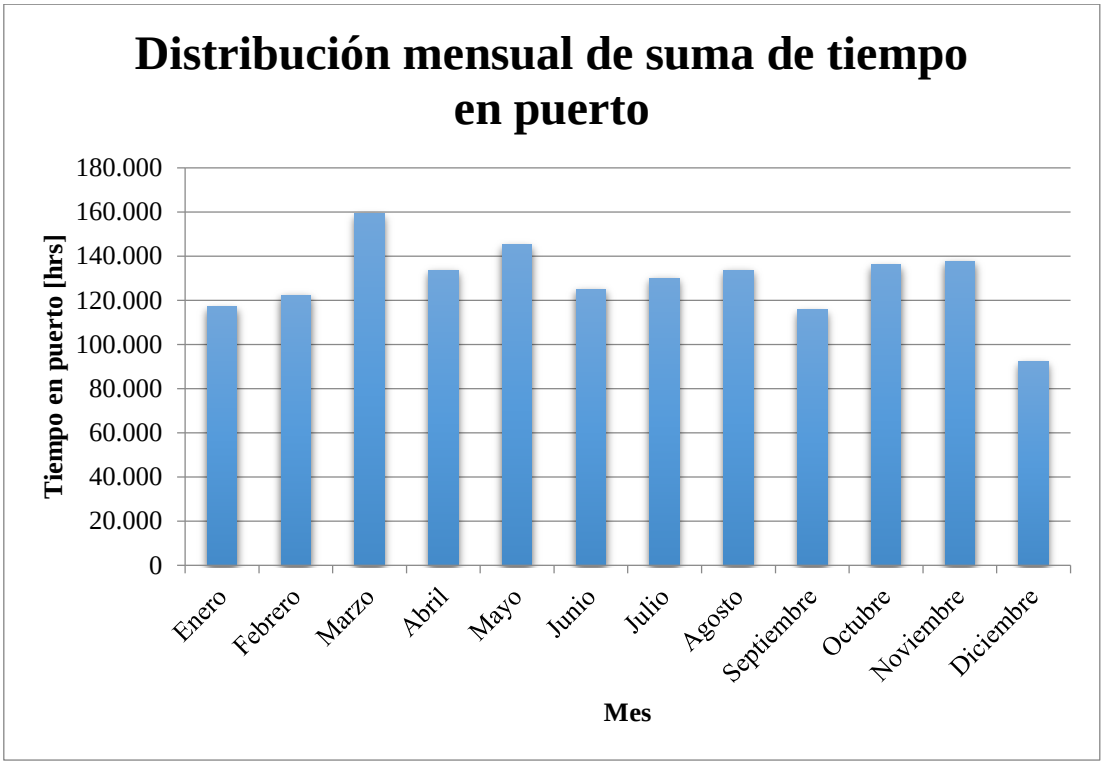

Gráfico 9: Suma de tiempo en puerto para cada mes durante el año 2015, mostrado en un gráfico de barras.

Es posible observar que la distribución de suma de tiempo en puerto por mes se mueve en un rango de 80.000 y 160.000 horas aproximadamente y que el mes que posee mayor valor de suma de tiempo en puerto es marzo. Esto es consistente con lo observado al respecto con la Tabla 17, pues es lógico deducir que, a nivel nacional, el tener mayor tiempo en puerto conlleva valores más altos de emisiones atmosféricas. Esto se reafirma con el siguiente gráfico, el cual muestra la distribución mensual de la variable cantidad de movimientos portuarios que se dieron lugar en los puertos de Chile considerados por el estudio.

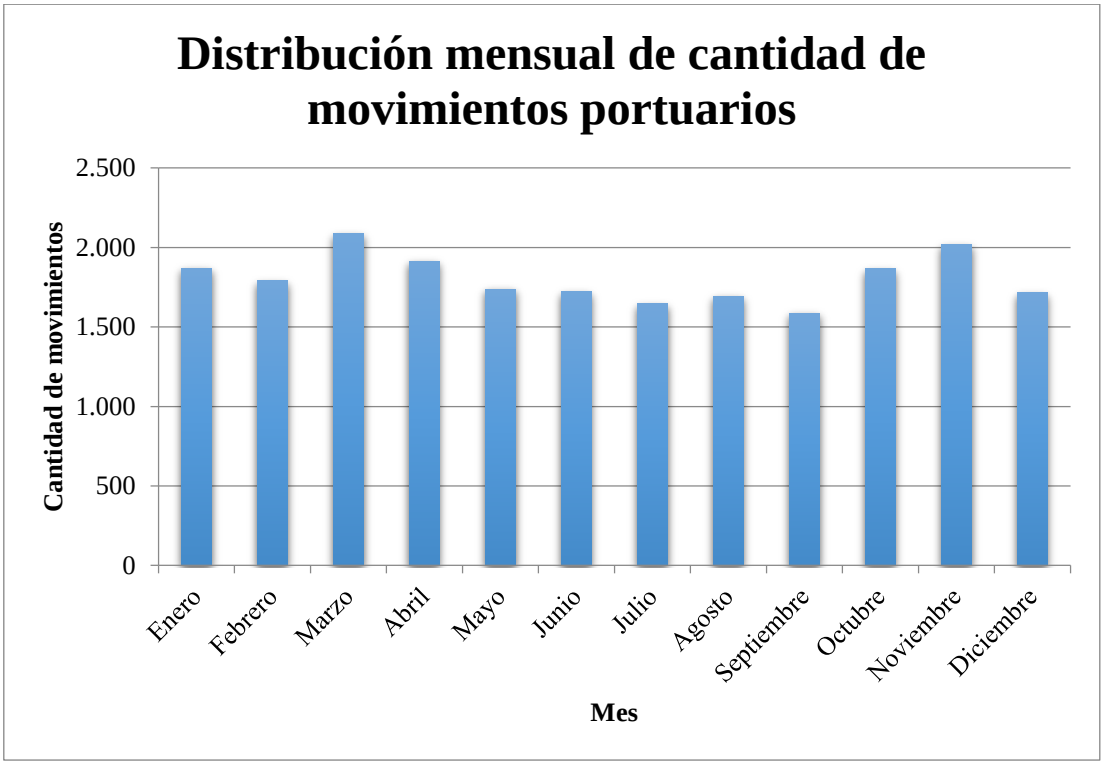

Gráfico 10: Representación gráfica de la suma de cantidad de recaladas contabilizadas en cada mes del año 2015, para los puertos de Chile considerados por el estudio.

El gráfico anterior muestra la cantidad total de movimientos portuarios por mes, en donde se puede apreciar que el mes que cuenta con mayor cantidad de movimientos es marzo con cerca de 2.000 movimientos. Esto permite concluir que marzo es el mes que representa la mayor actividad portuaria del año 2015, ya que no solo en él se contabiliza la mayor cantidad de recaladas, sino que también es el mes donde se registra más tiempo en puerto.

Para dilucidar esta situación, es pertinente prestar atención al mes de noviembre en el Gráfico 10. Se tiene que noviembre sigue muy de cerca de marzo en cuanto a cantidad de recaladas, pues noviembre cuenta con 2.019, es decir, en noviembre se contabiliza un 3% menos de movimientos con respecto a marzo, el cual cuenta con 2.087 movimientos.

Sin embargo, al observar el mes de noviembre en el Gráfico 9 se tiene que noviembre acumula una suma de horas en puerto que asciende a cerca de 137.000 horas, es decir, en noviembre se contabiliza casi un 15% menos de horas en puerto con respecto a marzo, quien cuenta con 160.000 horas aproximadamente .

Esta comparación muestra que, a pesar de que noviembre tiene muy poca diferencia de cantidad de recaladas con respecto a marzo, en marzo hay una diferencia mayor de horas en

puerto con respecto a noviembre. Lo cual, trae como consecuencia que marzo sea el mes en donde predominan las emisiones atmosféricas de contaminantes principales.

3.2.1 Emisiones anuales por región y tipo de nave

En esta sección se muestran y analizan los resultados de emisiones anuales de los tres principales contaminantes mencionados en función de las regiones a las que pertenecen los puertos considerados por el estudio.

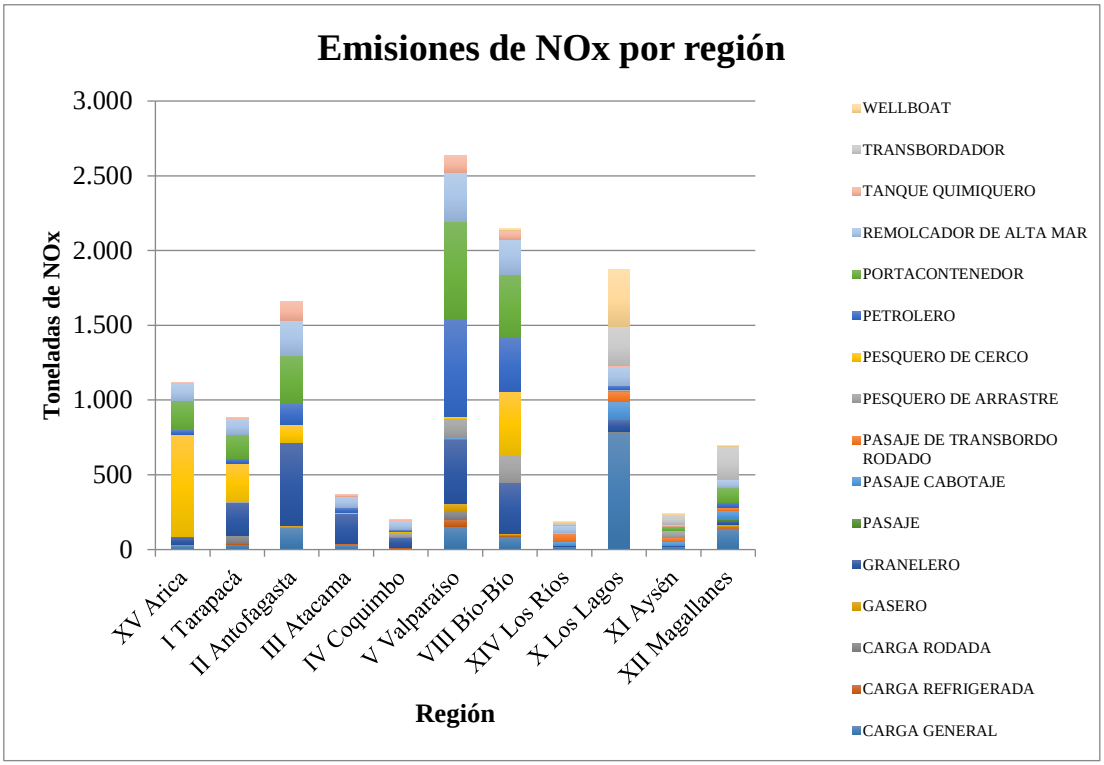

Gráfico 11: Emisiones anuales de NOx medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015.

El eje horizontal del gráfico anterior representa las regiones del país que abarca el estudio, las cuales están ordenadas geográficamente de norte a sur, partiendo desde la izquierda hacia la derecha a lo largo del eje. En tanto, el eje vertical representa las emisiones anuales de NOx, expresadas en términos de toneladas. A partir de estas variables se tiene que cada barra del gráfico representa las emisiones anuales de NOx de la respectiva región. Adicionalmente, se tiene que cada barra está compuesta por segmentos de distintos anchos y colores. Cada color representa un tipo de nave, mientras que el ancho del segmento representa la cantidad de toneladas de NOx asociado al segmento.

Es posible apreciar que la región que presenta el mayor valor de toneladas de NOx es la de Valparaíso. Ésta representa, aproximadamente, un 22% del total de emisiones anuales de

NOx del país y le siguen las regiones de Bío-Bío, Los Lagos y Antofagasta con un 18%, 16% y 14%, respectivamente.

Con respecto a los tipos de naves, se observa que en la región de Valparaíso las naves que más emiten NOx son las de tipo portacontenedor, graneleros y petroleros. En la región de Bío-Bío las naves que más emiten son de tipo pesqueras, portacontenedores y graneleros y en la región de Los Lagos; la clase carga general, wellboat y transbordador. Se identifica que en las regiones del norte del país las naves que más emiten son las pesqueras de tipo de cerco, portacontenedor y granelero, mientras que en las regiones del centro-sur y sur del país predominan las emisiones de naves pesqueras de tipo de arrastre y, sobretodo en la región de Los Lagos, naves pesqueras de tipo wellboat, carga general y transbordador.

A nivel nacional, los tipos de naves que más emiten NOx son: granelero, portacontenedor y pesquero de cerco con 1.900, 1.800 y 1.500 toneladas de NOx aproximadamente. En términos porcentuales, las naves portacontenedores y graneleros se adjudican el 16% de las emisiones de NOx cada uno, posteriormente se tiene con un 13% las naves pesqueras de cerco, 12% las naves de carga general y 11% las naves petroleras. Además, se tiene que la mayoría de las emisiones asociadas a naves graneleras se dan en las regiones de Antofagasta y Valparaíso, mientras que las emisiones de naves portacontenedores se dan principalmente en la región de Valparaíso. En cuanto a las naves pesqueras, sus emisiones se concentran principalmente en la región de Arica y Bío-Bío.

Análogamente, se elabora el mismo tipo de gráfico para el caso del CO_2 y $PM_{2,5}$ y se muestran a continuación.

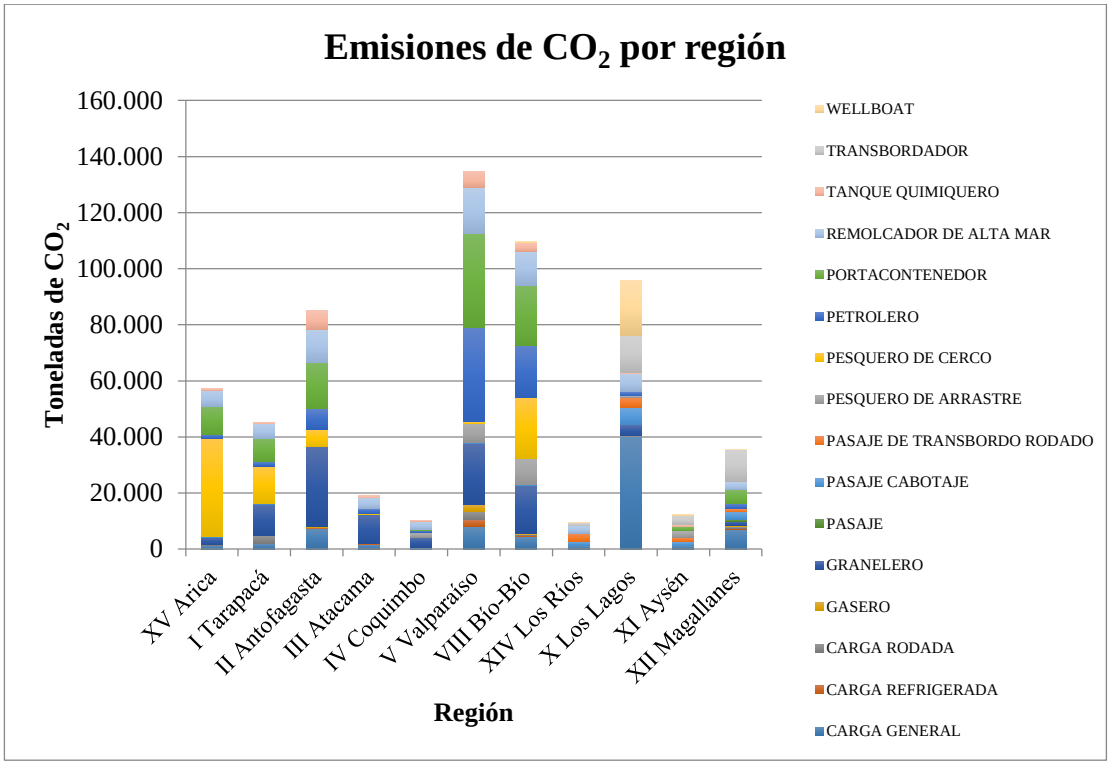

Gráfico 12: Emisiones anuales de CO_2 medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015.

Para el caso del contaminante CO_2 se observa que, cualitativamente, la tendencia en las distribuciones, tanto por región y por tipo de nave, es similar con respecto al contaminante NOx. Basta con comparar ambos gráficos para realizar ese tipo de afirmación, pues ambos son casi idénticos en términos de proporciones. Sin embargo, en términos cuantitativos se tiene mayor diferencia, puesto que las emisiones de CO_2 poseen un orden de magnitud mucho más elevado con respecto a las emisiones de NOx.

Nuevamente, la región que domina este tipo de emisiones es la región de Valparaíso, seguida de la región de Bío-Bío, Los Lagos y Antofagasta. En términos porcentuales con respecto al caso del NOx, éstos se mantienen.

Las naves que más aportan a la emanación de CO_2 a nivel nacional son, nuevamente, las de tipo granelero, portacontenedor y pesquero de cerco, con cerca de 100.000, 96.000 y 76.000 toneladas respectivamente. En términos porcentuales, se tiene que la distribución de emisiones de CO_2 por tipos de naves es igual que la del caso del NOx.

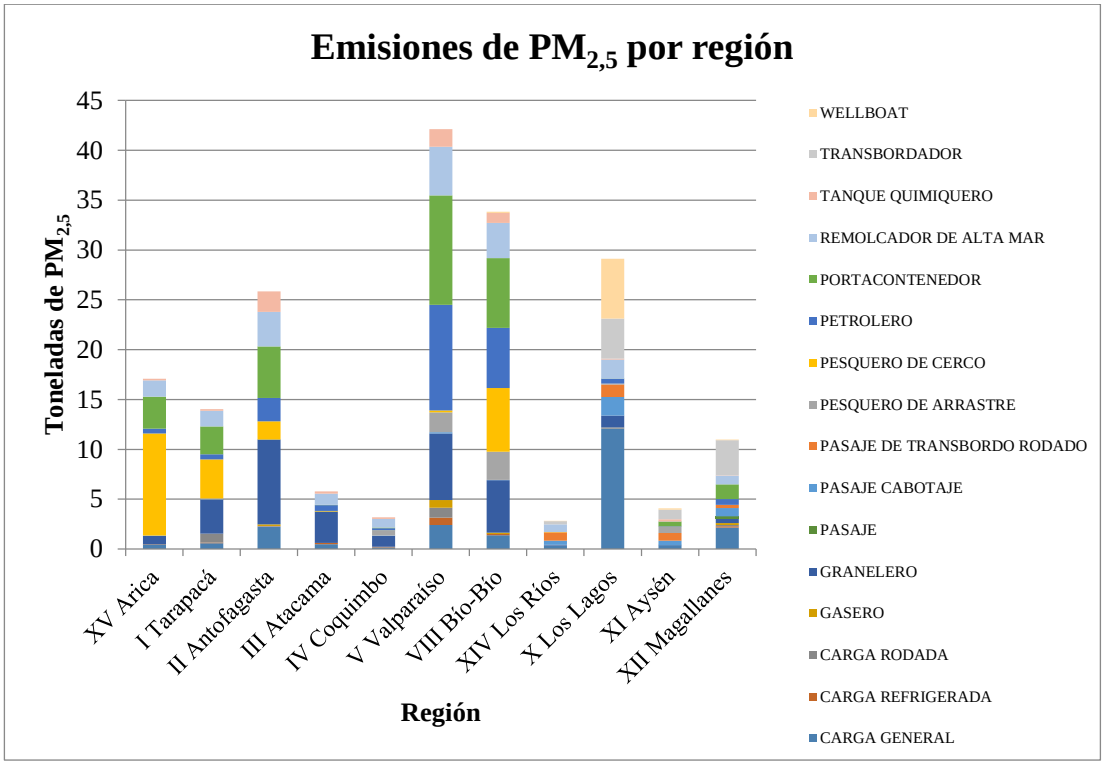

Gráfico 13: Emisiones anuales de $PM_{2,5}$ medidas en toneladas y distribuidas por región y por tipo de nave para el año 2015.

En cuanto al material particulado, su gráfica de emisiones anuales por región responde a las mismas tendencias observadas en los gráficos de CO_2 y NOx, desde un punto de vista cualitativo y de proporciones.

Los tipos de naves que lideran en este tipo de emisiones son las naves de tipo portacontenedor, granelero y carga general, con 31, 30 y 23 toneladas anuales aproximadamente. En términos porcentuales, representan un 17%, 16% y 12% respectivamente. A su vez, las naves tipo pesquero de cerco y petroleros también cuentan con un 12% de las emisiones totales de $PM_{2,5}$.

Por una parte, al observar el gráfico 8, el cual representa la distribución de la cantidad de recaladas nacionales en los puertos considerados por el estudio, se logra identificar una coherencia de los primeros resultados obtenidos, pues los puertos con mayor actividad (Puerto Montt, Quellón, Quintero, Mejillones, San Vicente, entre otros) pertenecen a las regiones que lideran las emisiones anuales de NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ (Valparaíso, Bío-Bío, Los Lagos y Antofagasta).

Por otra parte, se observa una clara tendencia a que las naves que más emiten, en general, son las de tipo portacontenedor, granelero, pesqueros y petroleros. Al contrastar esta afirmación

con los resultados mostrados en el gráfico de distribución de movimientos portuarios por tipo de naves surge la inquietud de que existen naves, como las de carga general, que a pesar de poseer una actividad portuaria mayor que las de tipo portacontenedor, granelero y pesqueros, éstas últimas las superan en cuanto a nivel de emisiones contaminantes. También, existen naves cuya participación en los movimientos portuarios es muy similar a la de estas tres, pero que su nivel de emisiones contaminantes tampoco se compara. Esto es explicado, básicamente, porque las naves de tipo portacontenedor y granelero son consideradas como naves que, en general, su envergadura está por sobre el promedio. Esto se ve reflejado en el apartado de principales suposiciones, en donde el rango de potencias del motor principal y auxiliar de estas naves es superior notoriamente superior al del resto. Por lo tanto, el factor recientemente mencionado en conjunción con el nivel de actividad que estas naves poseen, dan como resultado que éstas lideren a los tipos de naves con respecto al nivel de emisión de contaminantes. Es por esto que las naves de tipo carga general, a pesar de liderar en cuanto a cantidad de movimientos portuarios y suma de horas en puerto a lo largo del 2015, no lideran las emisiones contaminantes debido a los valores de potencias promedio del motor principal y auxiliar, pues estos son bajos comparados con, por ejemplo, los valores de potencia asociado a las naves de tipo portacontenedor.

A continuación, se procede a mostrar las emisiones anuales de los principales contaminantes, distribuidas por región y por tipo de nave, pero esta vez el eje horizontal presenta las regiones del país ordenadas de mayor a menor, con respecto al nivel de emisiones contaminantes asociadas a ellas.

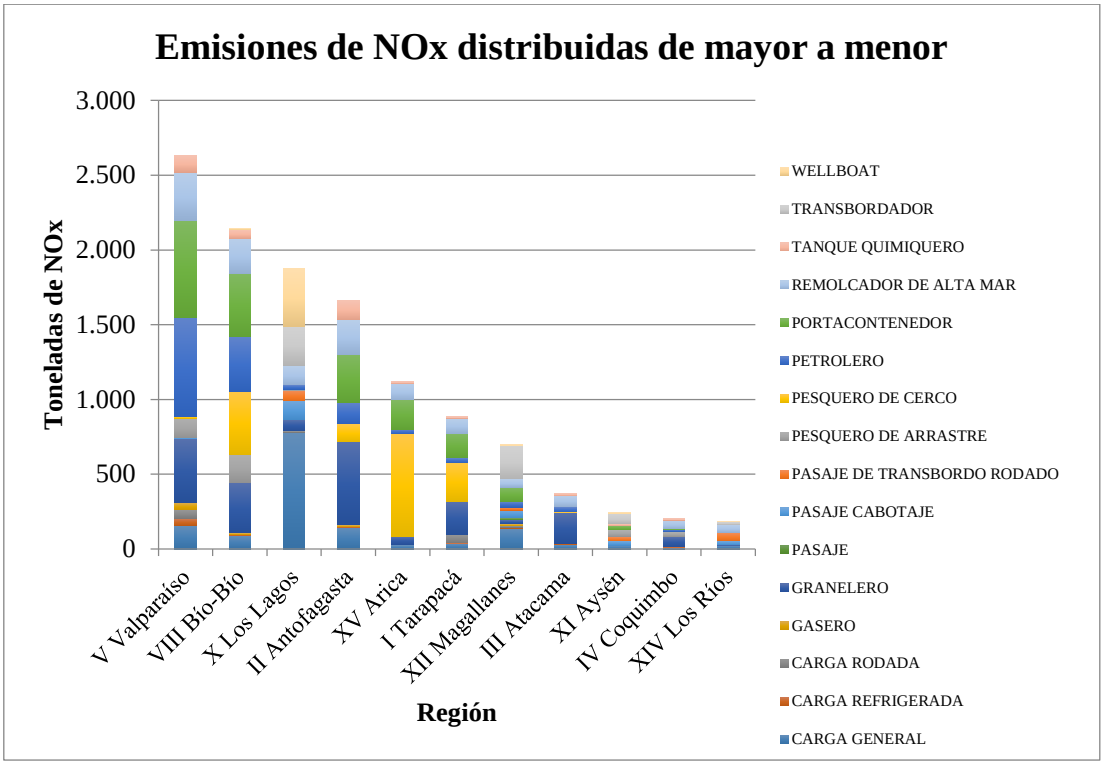

Gráfico 14: Cantidad de emisiones anuales de NOx asociadas a cada región del país, ordenadas de mayor a menor para el año 2015.

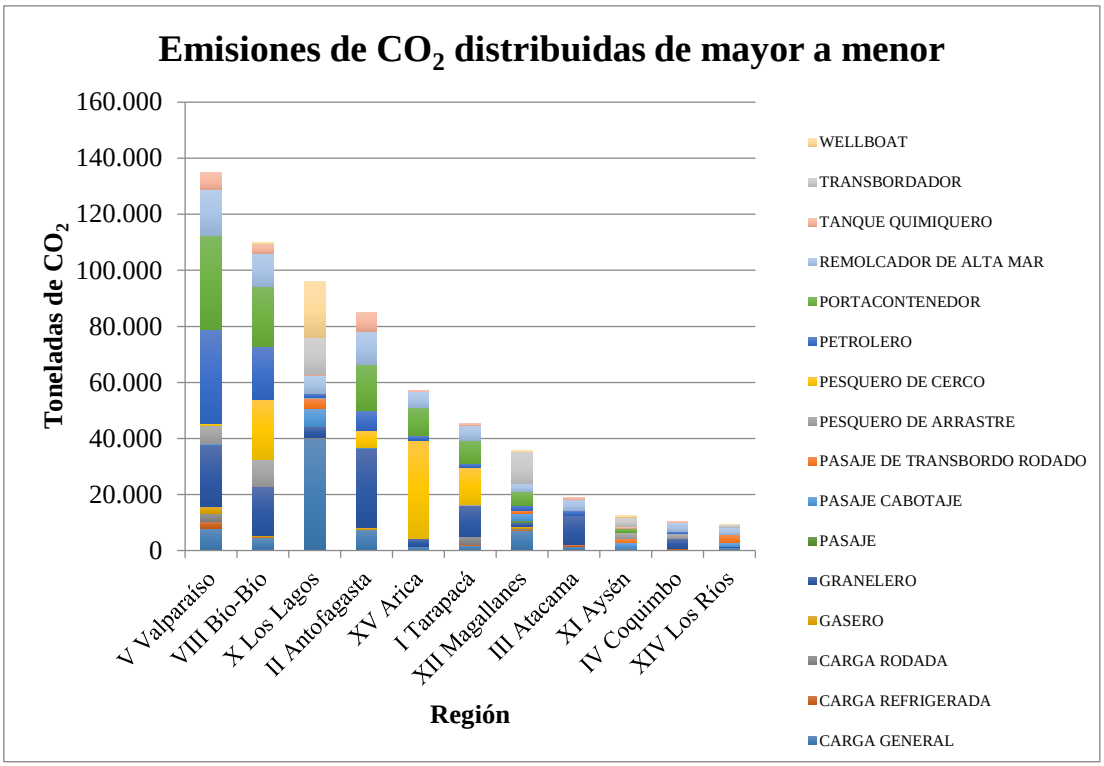

Gráfico 15: Cantidad de emisiones anuales de CO_2 asociadas a cada región del país, ordenadas de mayor a menor para el año 2015.

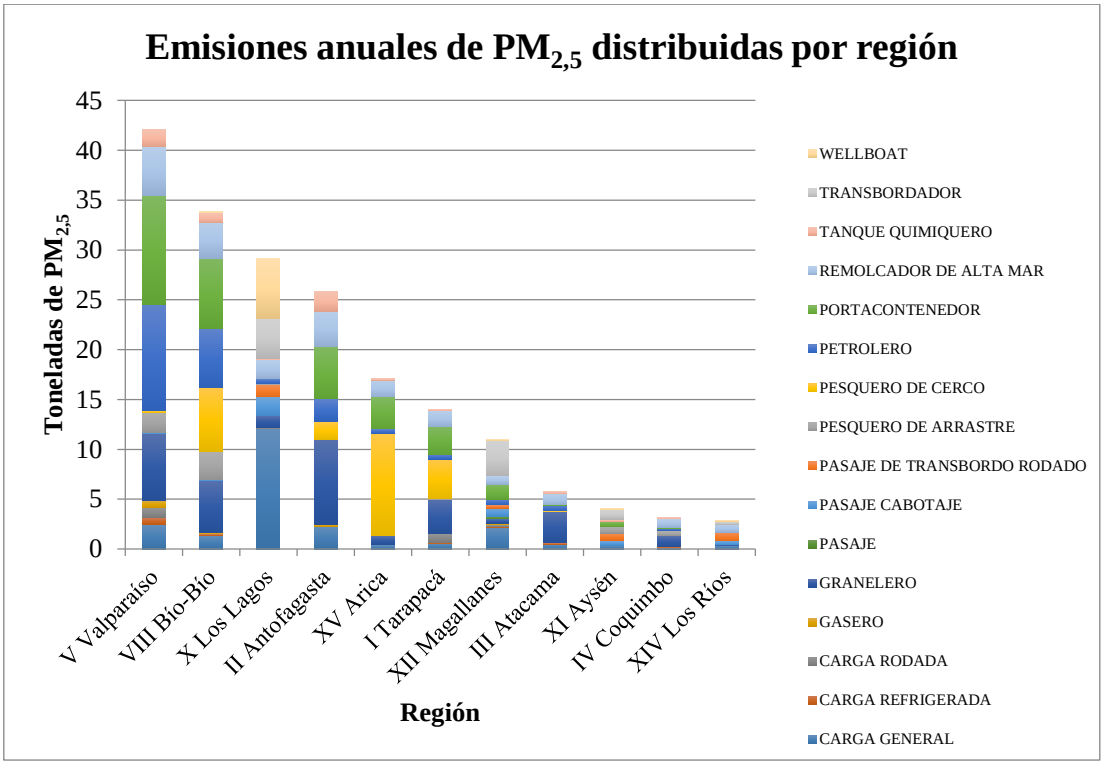

Gráfico 16: Cantidad de emisiones anuales de $PM_{2,5}$ asociadas a cada región del país y ordenadas de mayor a menor para el año 2015.

Se observa que, al ordenar las emisiones anuales de contaminantes de mayor a menor y distribuidas por región, los tres contaminantes responden a una misma tendencia. La región que lidera la cantidad de emisiones al año es la región de Valparaíso, seguida de la región de Bío-Bío y la región de Los Lagos. En el caso de los tres contaminantes, se ve que el ordenamiento es el mismo.

El anterior ordenamiento puede ser explicado por diversas razones. Una de ellas es, lógicamente, porque las regiones que lideran en cuanto a toneladas de contaminantes anuales son también las regiones que lideran el tráfico marítimo en el país. Otra razón, es que dicho ordenamiento responde fuertemente al tipo de nave que recibe la región determinada. El caso de Valparaíso se le asocia gran cantidad de naves portacontenedores, graneleros y petroleros. El caso de la región de Bío-Bío es similar a la de Valparaíso, pero en menores cantidades y agregando más naves pesqueras. Posteriormente se encuentra la región de Los Lagos que, a pesar de ser la región del país que cuenta con la mayor cantidad de movimientos portuarios, no se comporta de la misma forma al hablar de cantidad de emisiones. Nuevamente, esto responde al tipo de nave que predomina en la región, los cuales son: pesqueros (wellboat y de arrastre), carga general y transbordadores. Estas naves poseen una envergadura que no inciden de manera tan significativa en las emisiones como las de tipo portacontenedor,

granelero o petrolero. Al hablar de envergadura, se hace referencia a naves que, por lo general, poseen un alto valor de parámetros característicos mencionados anteriormente, tales como: eslora, TPM y tonelaje bruto. Si bien estos parámetros no son considerados dentro del estudio, se ven reflejados de cierta forma a la potencia promedio asignada a cada categoría para sus motores principales y auxiliares. En efecto, al observar la ecuación que determina la cantidad de emisiones contaminantes (ecuaciones 1 y 2), se identifica que el único parámetro que depende directamente del tipo de nave es la potencia asociada tanto al motor principal como auxiliar. Esto explica por qué la región de Los Lagos posee menor cantidad de emisiones anuales que la región de Valparaíso y Bío-Bío, a pesar de registrar mayor cantidad de movimientos portuarios, pues en estas dos primeras regiones se concentra gran cantidad de movimientos portuarios de naves portacontenedores, graneleros y petroleros, cuyos valores de potencias promedio lideran la lista de potencias.

3.2.2 Emisiones mensuales por puerto

En esta sección, se presentan las emisiones de los tres contaminantes principales distribuidas por mes. Esto permite visualizar el comportamiento de las emisiones a lo largo del año 2015 y analizar la relación existente entre estas y la actividad portuaria que existe mes a mes. Además, las emisiones también se categorizan por el puerto al que pertenecen.

A continuación, se presentan tres gráficos de barra: uno para el NOx, otro para CO_2 y otro para $PM_{2,5}$. Cada gráfico presenta en su eje horizontal los meses que componen el año ordenados en forma cronológica, mientras que el eje vertical presenta la cantidad de emisiones contaminantes medidas en toneladas. Adicionalmente, cada barra se encuentra segmentada por la cantidad de contaminante asociado a cada puerto en particular.

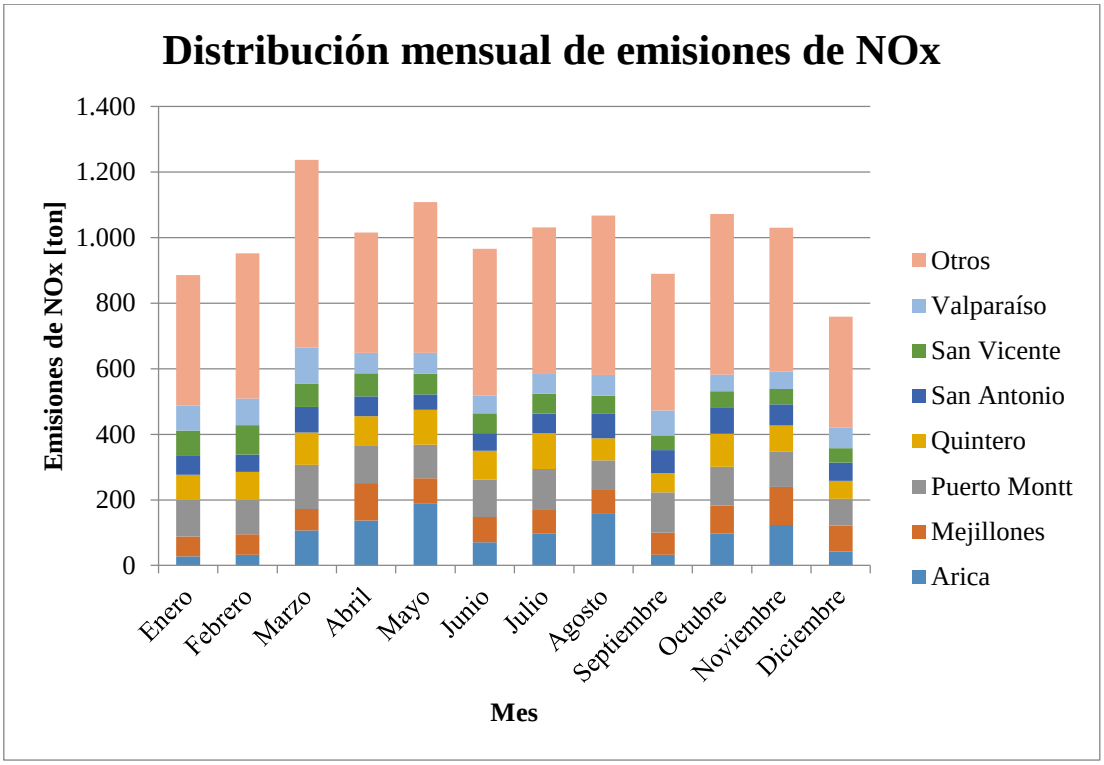

Gráfico 17: Cantidad de emisiones de NOx asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015.

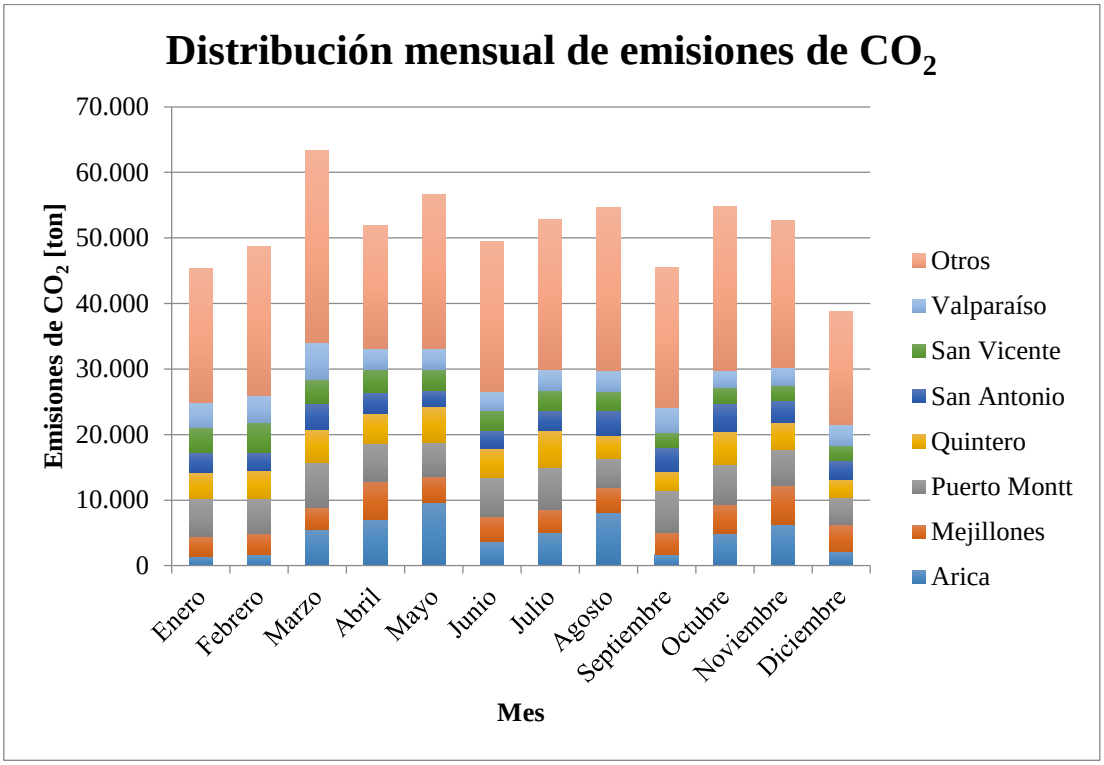

Gráfico 18: Cantidad de emisiones de CO_2 asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015.

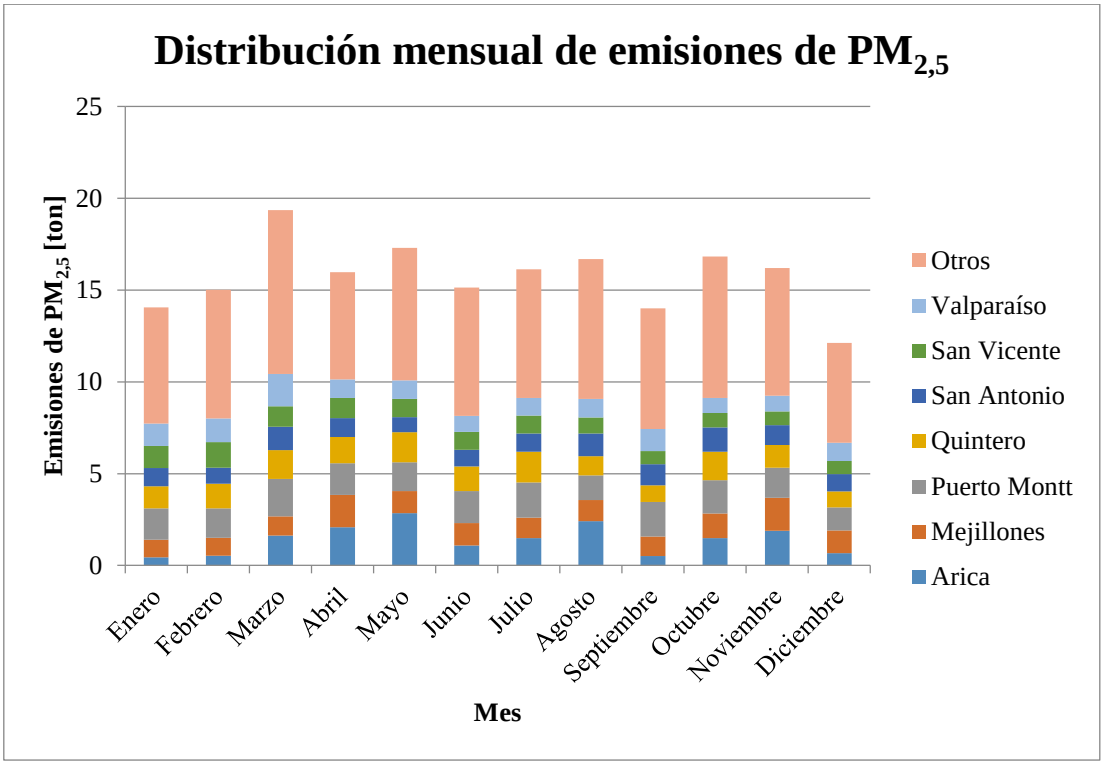

Gráfico 19: Cantidad de emisiones de $PM_{2,5}$ asociadas a cada mes y distribuidas por puerto para el año 2015.

En cada gráfico la distribución por puertos no contempla todos los puertos que el estudio abarca, dado que son 44 y resultaría poco amigable para la lectura el representar la totalidad de puertos. En función de esto, se presentan solo los puertos más relevantes y los demás puertos quedan representados en el segmento denominado como Otros.

Se observa que en los últimos tres gráficos existe una tendencia muy parecida entre ellos. Esto se refleja en aspectos en común, como por ejemplo, el mes que mayor cantidad de emisiones posee es marzo. Esto es consistente con lo analizado previamente con respecto a la tabla 17 y los gráficos 9 y 10, pues en el mes de marzo se tiene la mayor cantidad de recaladas del año y la mayor cantidad de suma de horas en puerto, por lo que no resulta extraño que en este mes se tengan los valores más altos de emisiones. Análogamente, el mes que presenta menor cantidad de emisiones es septiembre, sin considerar diciembre ya que sus valores de emisiones se encuentran sub valoradas por lo explicado previamente. En términos porcentuales, el mes de marzo representa un 10% de las emisiones anuales de NOx, seguido de noviembre, octubre, agosto, julio, mayo y abril, todos con un 9% del total de emisiones. En el caso del CO_2 y $PM_{2,5}$ se repiten los mismos porcentajes.

En cuanto a la participación de los puertos en las emisiones mensuales, se visualiza que, mes a mes, los puertos más importantes son Valparaíso, San Vicente, San Antonio, Quintero,

Puerto Montt, Mejillones y Arica. En términos porcentuales, el puerto que más emisiones de NOx emana al año es Puerto Montt, con un 11% del total de emisiones. Le sigue Arica con un 9%, Mejillones y Quintero con un 8%, Valparaíso con un 7% y San Vicente con San Antonio un 6% cada uno. Para el caso del CO_2 y $PM_{2,5}$ las proporciones son las mismas. Además, la participación en las emisiones de los puertos mes a mes es uniforme, a excepción del puerto de Arica, el cual tiene más fluctuaciones en cuanto a cantidad de emisiones mes a mes. Los meses de mayo y agosto son donde mayor cantidad de emisiones tiene este puerto.

Desde un punto de vista global se tienen análisis que convergen en ideas comunes, pues lo expuesto con respecto a las emisiones anuales distribuidas por región tiene fuerte relación con lo planteado recientemente. Los altos niveles de emisiones a nivel nacional de la región de Valparaíso son explicados por el alto nivel de actividad portuaria y los tipos de naves que recalan en esa zona, lo que se ve reflejado en que los puertos de San Antonio, Quintero y Valparaíso, como se pudo observar, están siempre liderando las emisiones de los distintos contaminantes y en el caso de las emisiones distribuidas mensualmente no se dal la excepción. Análogamente, es posible identificar esta relación para la región de Los Lagos, en donde el puerto de Puerto Montt lidera a nivel nacional las emisiones de contaminantes para el año 2015.

3.3 Análisis de sensibilidad

El presente capítulo busca entregar una perspectiva sobre la importancia de ciertos parámetros que fueron considerados a la hora de estimar las emisiones atmosféricas vinculadas al sector transporte marítimo en Chile. Esto se intenta desarrollar a través de un análisis de sensibilidad de las siguientes variables: tipo de combustible, distancia recorrida en modo en maniobra y tiempo total en puerto.

3.3.1 Influencia del tipo de combustible

Como se menciona en pasajes anteriores del presente documento existen dos principales tipos de combustibles que se utilizan en el transporte marítimo, los cuales son el petróleo residual y el petróleo destilado. Desde un punto de vista metodológico, el uso de un combustible u otro se ve reflejado directamente en el valor del factor de emisión a utilizar para el cálculo de emisiones.

Para esta parte del análisis se consideran tres escenarios. El primero, es el escenario base (I) bajo el cual se estiman las emisiones contaminantes obteniendo los resultados mostrados en el apartado anterior. Se entiende como escenario base al uso de petróleo destilado en el motor auxiliar para todos los modos de operación y al uso de petróleo residual en el motor principal

solo en altamar. El segundo, es un escenario el cual considera la utilización de petróleo residual para todos los modos de operación, tanto para el motor principal como el motor auxiliar (II). Y, finalmente, se muestra un tercer escenario en donde se considera el uso de combustible destilado para todos los modos de operación, tanto para el motor principal como el motor auxiliar (III). El enfoque de presentar estos escenarios es poder comparar las emisiones anuales de los contaminantes NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ para los escenarios propuestos.

Escenario	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
I	12.017	614.726	188
II	12.459	643.108	455
III	12.017	614.579	179

Tabla 18: Valores de emisiones anuales de contaminantes para los tres escenarios propuestos con respecto al uso del tipo de combustible.

Tipo de Variación	NOx [%]	CO_2 [%]	$PM_{2,5}$ [%]
Variación II respecto III	3,6	4,4	60,6
Variación II respecto I	3,6	4,4	58,6
Variación III respecto I	0,0	0,0	-5,1

Tabla 19: Comparación de los distintos escenarios propuestos, con su diferencia expresada en porcentaje.

Al prestar atención a la tabla 18, se observan ciertas diferencias entre las emisiones anuales asociadas a los tres escenarios. Como es de esperarse, desde un punto de vista cualitativo el escenario que contempla solo el uso de combustible residual posee las mayores emisiones anuales, mientras que el escenario que contempla solo combustible destilado posee los valores más bajos de emisiones anuales. El escenario base, al formarse a partir del uso de ambos tipos de combustibles, tiene valores intermedios de emisiones anuales.

Para abordar dicha diferencia desde un punto de vista cuantitativo se procede a expresar la comparación de los escenarios en términos porcentuales. La mayor diferencia, lógicamente, se da lugar cuando se comparan el escenario II con respecto al III. Para el caso del NOx y el

CO_2 se tienen diferencias bajas, 3,6% y 4,4% respectivamente, mientras que para el caso del $PM_{2,5}$ se tiene una variación significativa del 60,6%. Luego, se comparan los escenarios extremos (II y III) con respecto al escenario base (I). En este caso, la tendencia es similar, pues para la comparación del escenario II con respecto al I se tiene un aumento de 3,6% y 4,4% de emisiones anuales de NOx y CO_2 respectivamente. Para el $PM_{2,5}$ se observa un aumento del 59% en el caso de que se utilizara solo combustible residual con respecto al escenario base. Para la comparación del escenario III con respecto al escenario I se tiene que el uso de solo combustibles destilados significaría una reducción casi insignificante de emisiones anuales de NOx y CO_2 respectivamente. Para el $PM_{2,5}$ se cuenta con una disminución del 5% de emisiones anuales, con respecto al escenario base.

En resumen, se contempla que para los contaminantes NOx y CO_2 no se logra evidenciar una diferencia sustancial de emisiones anuales al variar el tipo de combustible que se utilice. No obstante, en el caso del $PM_{2,5}$ si se logra observar diferencias significativas, sobre todo al comparar el escenario de uso solo de combustible residual con respecto al escenario base. Esto puede ser explicado principalmente por los factores de emisión empleados en el estudio. Al observar las tablas 6 y 7 es posible identificar que las diferencias entre los factores de emisión para combustibles destilados con respecto a los factores de emisión para combustibles residuales son mucho más severas para el caso del $PM_{2,5}$ que para el caso del NOx y CO_2. Si bien el presente estudio no elabora los factores de emisión, sino que sugiere la utilización de los factores propuestos en otro estudio, la diferencia explicada anteriormente puede deberse a que el material particulado en zonas urbanas tiene un alto impacto en la salud de las personas y los distintos seres vivos que habiten la zona, pues este contaminante tiene un alto nivel de penetración en las vías respiratorias.

El objeto de esta sección del análisis es entregar un acercamiento a la importancia del combustible a utilizar durante el transporte marítimo. El criterio para escoger el combustible a utilizar responde a variadas necesidades, tanto económicas como técnicas. Sin embargo, resulta interesante tener una visión de este tema desde una perspectiva del impacto medioambiental que pueda generar. Adicionalmente, el análisis de sensibilidad logra definir la incertidumbre asociada a los resultados del escenario base.

3.3.2 Influencia del tiempo empleado en modo “En Maniobra”

Continuando con el análisis de sensibilidad, esta sección analiza el impacto en las emisiones anuales al variar el parámetro tiempo en modo “En Maniobra”. Como se menciona en capítulos anteriores, la velocidad de aproximación al puerto y la distancia recorrida son parámetros muy difíciles de determinar con exactitud por lo que es estrictamente necesario

abordarlos mediante supuestos y aproximaciones. Es por esto que es importante evaluar el impacto que tiene en los resultados dichas aproximaciones, para lo cual se someten a un análisis de sensibilidad.

La premisa es que, según el estudio citado en la sección de metodología (Sin, 2012) la distancia recorrida por las naves en modo maniobra rondan en un rango de 3 a 6 kilómetros. En base a esto se decide establecer como distancia recorrida 5 kilómetros y, a partir de esta, se realiza un análisis de sensibilidad en el cual se varía este parámetro ± 20%. Los resultados se muestran en una tabla en donde se muestran las emisiones anuales de los contaminantes NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ asociados a cada valor de distancia recorrida en maniobra.

Variación [%]	Distancia recorrida "En Maniobra" [km]	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
20	6	12.035	615.742	191
15	5,75	12.030	615.488	191
10	5,5	12.026	615.234	190
5	5,25	12.022	614.980	189
0	5	12.017	614.726	189
-5	4,75	12.013	614.473	188
-10	4,5	12.008	614.219	188
-15	4,25	12.004	613.965	187
-20	4	11.999	613.711	186

Tabla 20: Emisiones anuales de contaminantes principales asociadas a cada valor de distancia recorrida en maniobra.

La primera columna muestra la variación que contempla el análisis de sensibilidad en términos de porcentajes, en donde el nivel 0% corresponde al escenario base que consideran los resultados expuestos en capítulos anteriores. Se puede observar que, efectivamente, este parámetro tiene una incidencia en las emisiones anuales de los tres contaminantes mostrados. Para lograr visualizar este impacto se presenta la ecuación de la recta que resulta al graficar horizontalmente la distancia recorrida en maniobra y, verticalmente, las toneladas anuales de contaminante.

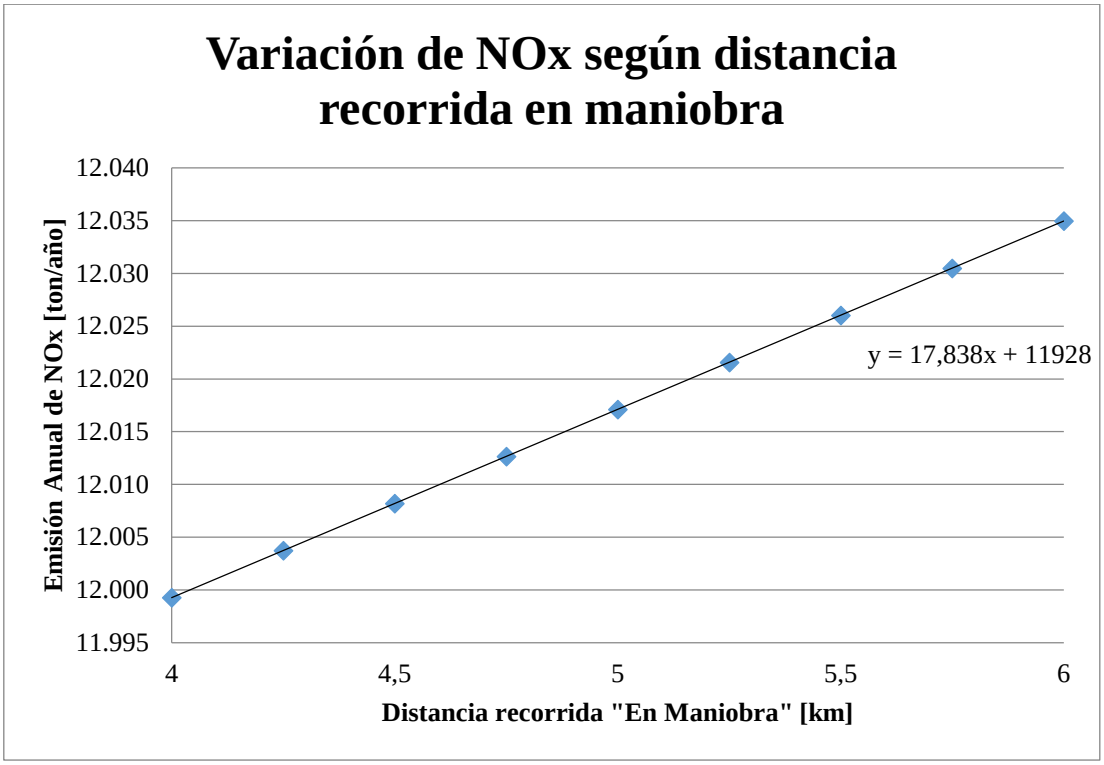

Gráfico 20: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de NOx al variar distancia recorrida en maniobra.

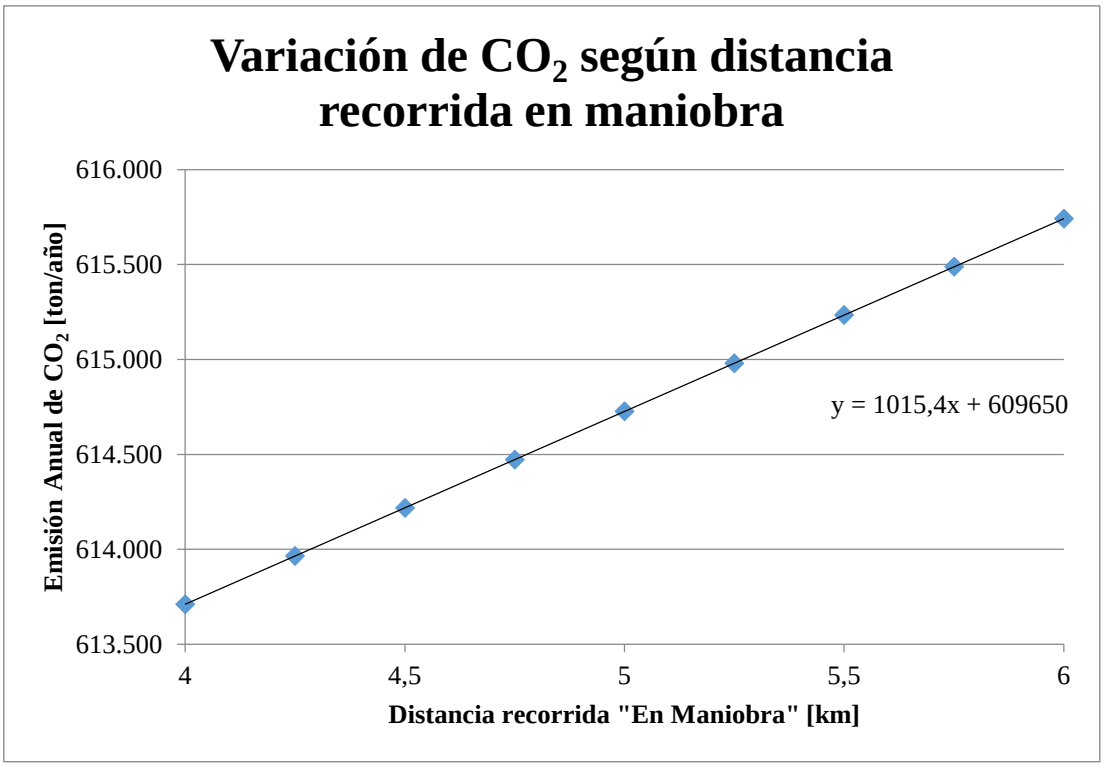

Gráfico 21: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de CO_2 al variar distancia recorrida en maniobra.

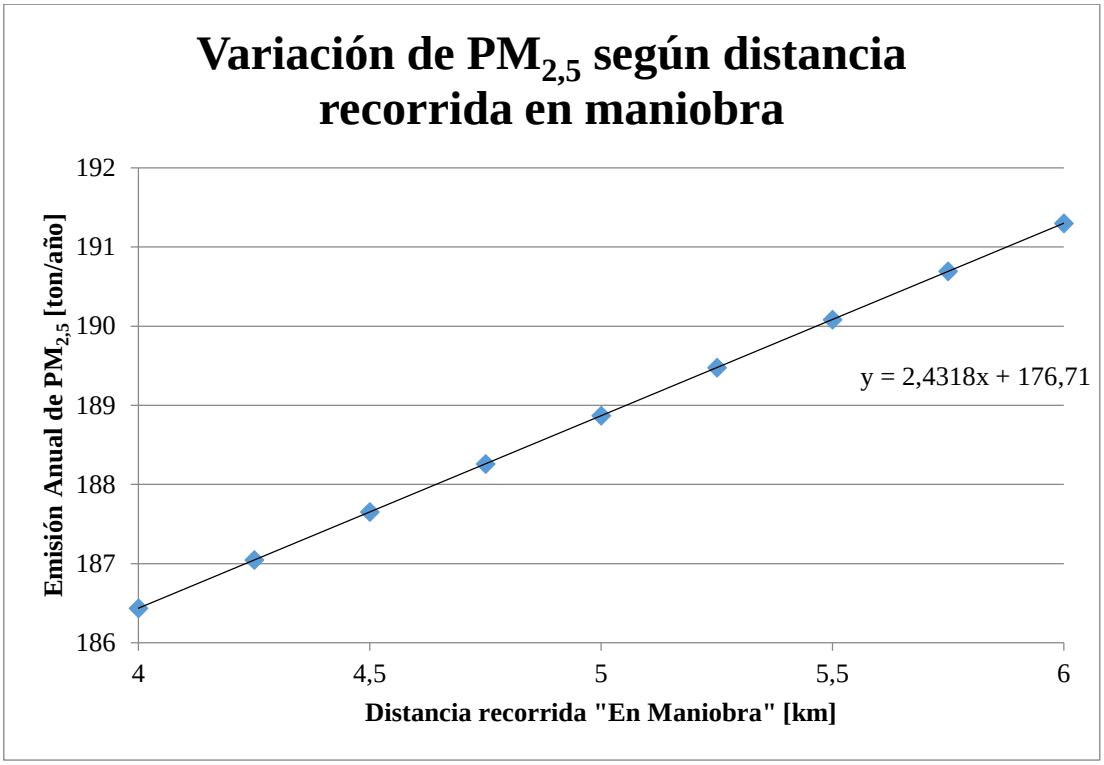

Gráfico 22: Representación lineal del cambio en las emisiones anuales de $PM_{2,5}$ al variar el tiempo en maniobra.

La información útil que entregan los tres últimos gráficos es la pendiente asociada a cada ecuación de la recta, es decir, el factor que acompaña a la variable x en la ecuación de la recta adjunta. La pendiente representa el cambio en la variable emisiones anuales, es decir, por cada kilómetro adicional o restado las emisiones anuales cambian un valor de toneladas igual a la pendiente asociada. En el caso del NOx, se tiene que las emisiones varían 18 toneladas por kilómetro, las emisiones de CO_2 varían 1.015 toneladas por kilómetro y las emisiones de $PM_{2,5}$ varían 2,4 toneladas por kilómetro. Por lo tanto, se desprende que entre más alto ascienda el valor de la pendiente de la ecuación de la recta, mayor impacto tienen las variaciones de tiempo en maniobra en las emisiones anuales de contaminantes.

Bajo este concepto, el contaminante que posee la mayor pendiente es el CO_2. Esto se puede explicar porque los factores de emisión asociados a dicho contaminante son los más altos en orden de magnitud, lo que trae como consecuencia que los valores anuales de CO_2 también lo sean con respecto a otros contaminantes. Sin embargo, el contaminante que es más sensible a este parámetro es el material particulado, pues su pendiente de 2,41 toneladas de contaminante por kilómetro recorrido en maniobra representa alrededor de un 1,3% con respecto al total de emisiones de material particulado en el 2015, mientras que las pendientes

de los otros dos contaminantes no alcanzan a representar un 1% de las emisiones anuales respectivas.

En general, se desprende que las emisiones anuales de contaminantes tienen una sensibilidad pequeña en torno a la distancia en maniobra, pero no despreciable.

3.3.3 Influencia del tiempo en puerto

Uno de los parámetros que influye directamente en las emisiones en modo "En Puerto" es, precisamente, el tiempo que emplean las embarcaciones en estar atracadas en el determinado puerto realizando distintas operaciones. Se entiende que la relación entre el nivel de emisiones y el tiempo en puerto es directamente proporcional, de ahí en más resulta interesante realizar un análisis de sensibilidad para este parámetro. Se procede a variar el tiempo en puerto directamente desde la base de datos para cada movimiento en particular en términos porcentuales, por tanto esta variación abarca todos los tipos de naves de todos los puertos contemplados a nivel nacional. Además, la variación corresponde a un rango de ± 10% y se muestran los valores de emisiones anuales de los contaminantes NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ asociados a cada nivel de variación, respectivamente. Dicha información se presenta en la siguiente tabla:

Variación [%]	Tiempo en puerto anual [hrs/año]	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
10	1.703.483	13.210	675.691	207
8	1.672.511	12.971	663.498	203
6	1.641.538	12.733	651.305	199
4	1.610.566	12.494	639.112	196
2	1.579.593	12.256	626.919	192
0	1.548.621	12.017	614.726	189
-2	1.517.649	11.779	602.533	185
-4	1.486.676	11.540	590.340	182
-6	1.455.704	11.301	578.147	178
-8	1.424.731	11.063	565.954	175
-10	1.393.759	10.824	553.761	171

Tabla 21: Análisis de sensibilidad del parámetro tiempo en puerto. Se muestran las variaciones de emisiones anuales para los tres contaminantes principales al variar el tiempo en puerto anual de todas las naves que contemplan la base de datos.

Al observar la tabla anterior, se logra visualizar cierta influencia en las emisiones anuales al variar el tiempo en puerto. En efecto, al prestar atención en los contaminantes se observa que una variación del 10% del tiempo en puerto supone un aumento aproximado del 10% de las emisiones anuales de NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$. Para visualizar gráficamente la situación, se presenta un gráfico para cada contaminante en donde se representa, en el eje horizontal, el tiempo total que emplearon todas las naves en puerto durante el año 2015, versus, en el eje vertical, la emisión anual del contaminante en particular. Además, se agrega una tendencia lineal de la curva para poder verificar la pendiente de la recta.

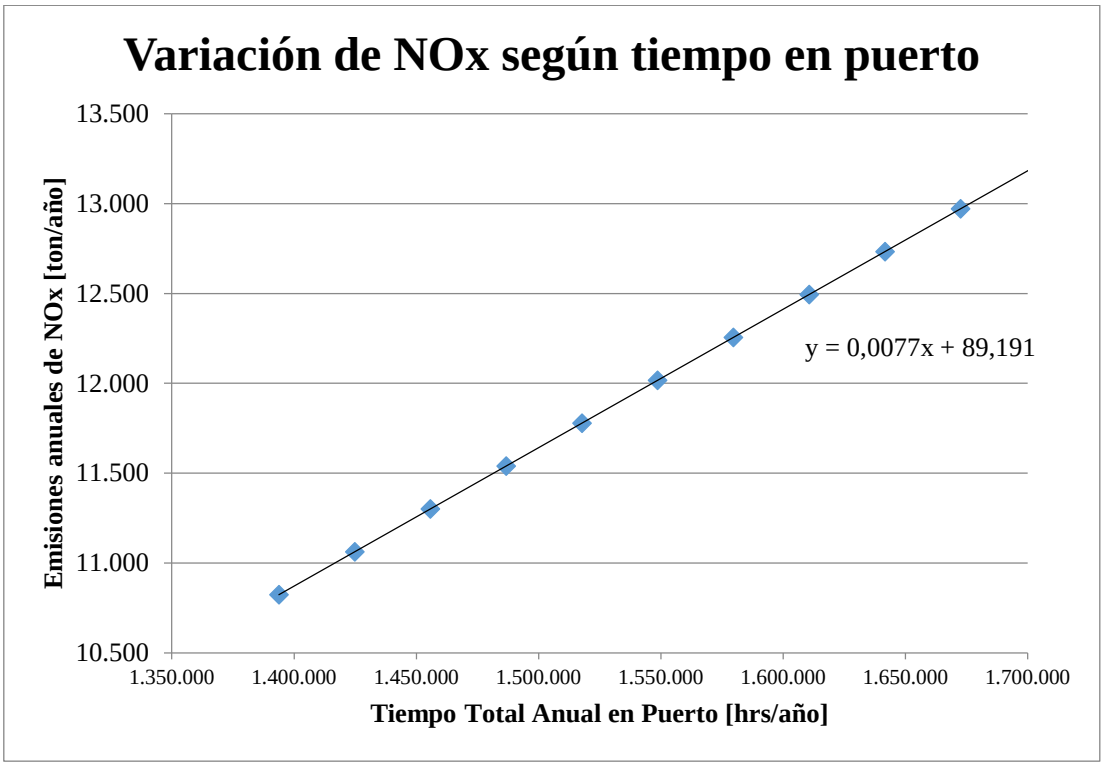

Gráfico 23: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de NOx al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios.

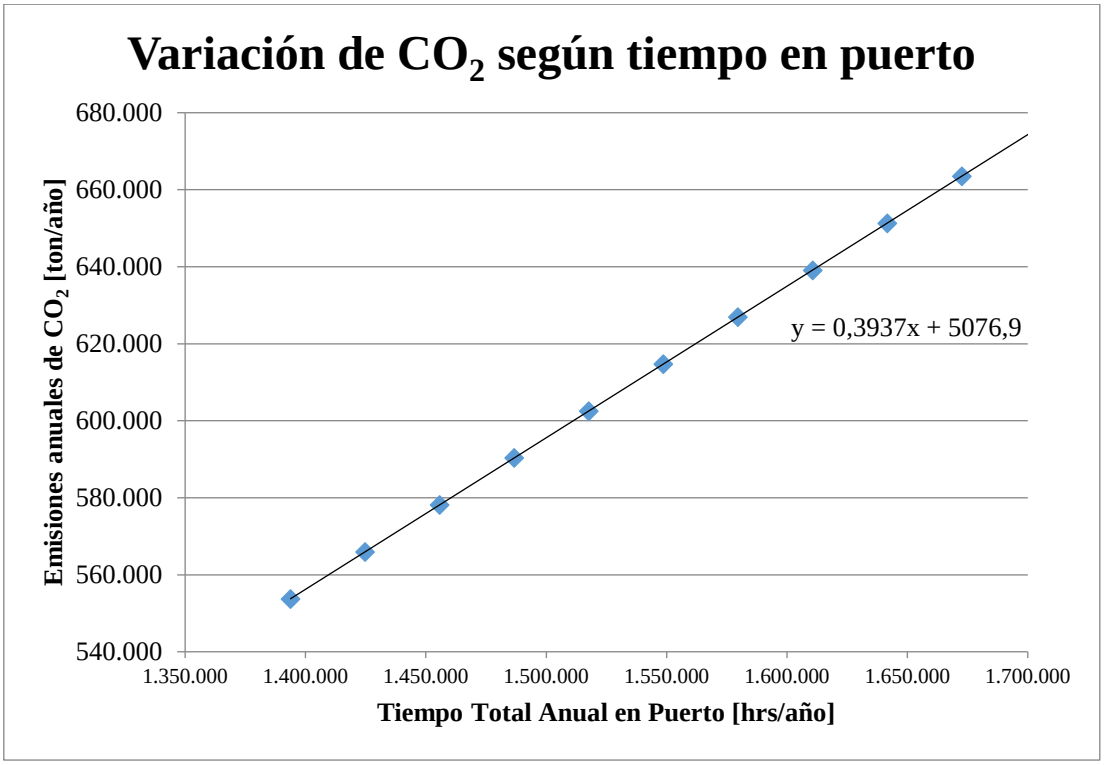

Gráfico 24: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de CO_2 al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios.

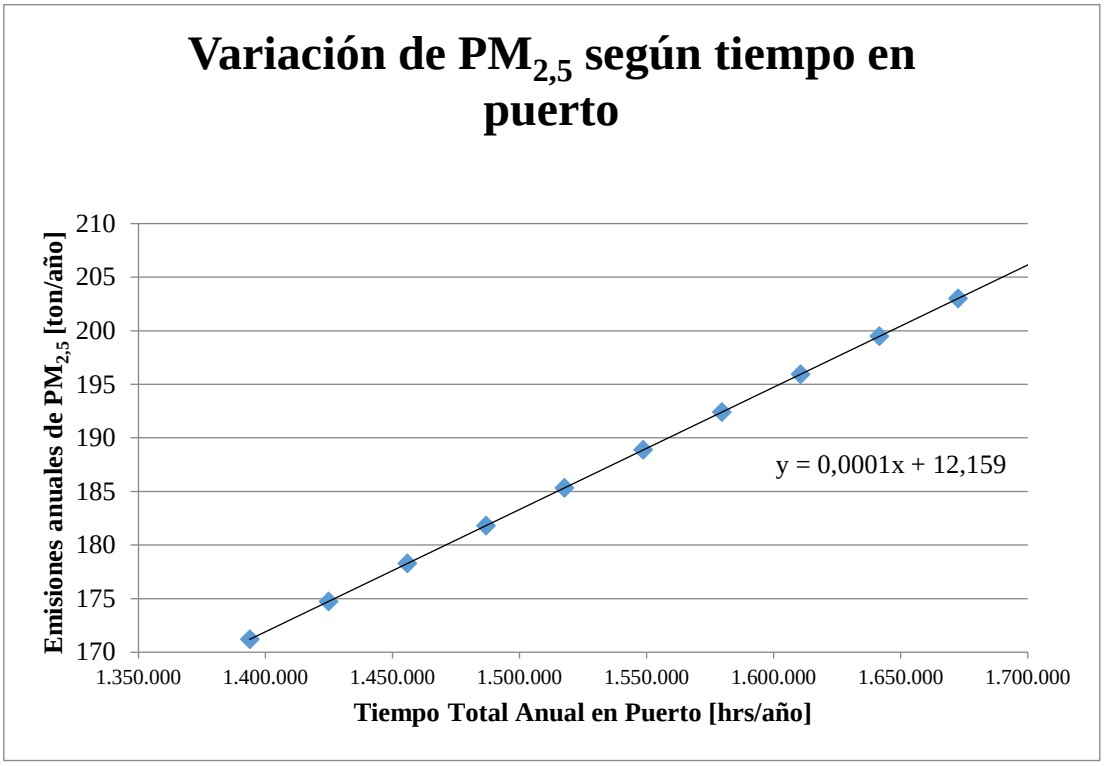

Gráfico 25: Representación lineal de la variación de emisiones anuales de $PM_{2,5}$ al variar el tiempo total en puerto de todos los movimientos portuarios.

Al igual que en los parámetros analizados anteriormente, de los gráficos anteriores se desprende que la pendiente de la recta representa la razón de cambio de las emisiones anuales con respecto a las horas en puerto, es decir, cuánto cambian las emisiones anuales al variar las horas en puerto. Bajo este concepto, se tiene que el contaminante con la mayor pendiente es el CO_2, seguido del NOx y, finalmente, $PM_{2,5}$.

Este orden de es el mismo que se dio en la sección anterior y se concluye que la variable tiempo en puerto tiene mayor impacto en las emisiones anuales que, por ejemplo, la distancia recorrida en maniobra.

3.3.4 Resumen de análisis de sensibilidad

Se han sensibilizado tres variables: tipo de combustible, distancia recorrida en maniobra y tiempo total en puerto. En cada análisis se han variado dichos parámetros y se observa cómo varían las emisiones anuales con respecto al escenario base bajo el cual se calculan las emisiones en el capítulo de resultados. A partir de la sensibilización realizada a cada parámetro, se busca juntar estos análisis para elaborar un rango de incertidumbre dentro del cual existen los resultados que se han obtenido en el presente estudio. Con esto se logra plasmar las variables que más impacto tienen a la hora de desarrollar un inventario de emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo y, por tanto, los frentes más importantes por donde atacar esta problemática en un futuro estudio. Esto se muestra de manera gráfica a continuación:

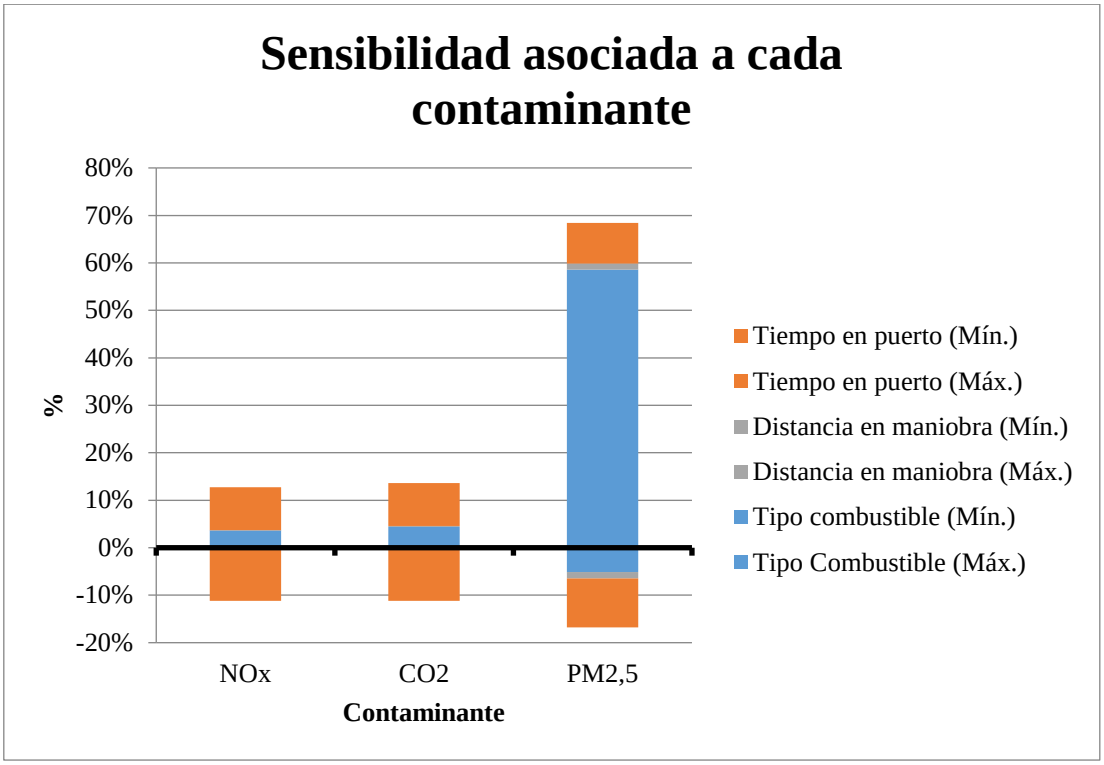

Gráfico 26: Representación gráfica de la diferencia de los valores máximos y mínimos de cada parámetro sensibilizado con respecto a los resultados base, en términos de porcentaje para cada contaminante.

A partir del análisis de sensibilidad de los parámetros tipo de combustible, distancia recorrida en maniobra y tiempo en puerto, se escogen los valores máximos y mínimos de las tablas 18, 20 y 21 para los tres contaminantes. Luego, se establece una diferencia en términos porcentuales de estos valores con respecto a los resultados base del estudio, es decir, los resultados de emisiones brutos expuestos en la sección de análisis y resultados. Estas diferencias son representadas en el gráfico 26, en donde el eje vertical expresa el porcentaje de variación y en el eje horizontal se tienen las variaciones de las emisiones por cada contaminante. La línea del eje horizontal correspondiente al 0% representa la emisión base de cada contaminante y las variaciones sobre y bajo el 0% representan cuánto varían dichas emisiones dependiendo del parámetro sensibilizado, en donde cada segmento de color representa la diferencia mencionada de cada parámetro.

Cualitativamente, se tiene que las emisiones de NOx y CO_2 al variar los parámetros se comportan de manera similar, mientras que las emisiones de material particulado poseen variaciones más significativas. Por un lado, al utilizar combustible residual en todos los modos de operación y en ambos motores se tiene que las emisiones de NOx aumentan cerca de un 4%, las emisiones de CO_2 un 5% y las emisiones de material particulado un 59%. Por el contrario, el eventual uso de estrictamente combustible destilado supone disminuciones

insignificantes en las emisiones de NOx y CO_2. No así en el caso del material particulado, en donde se experimentan bajas de un 5% en sus emisiones anuales.

Por otro lado, una variación del 20% del parámetro distancia recorrida en maniobra supone un aumento en un 0,15% de emisiones anuales de NOx y CO_2, mientras que para las emisiones de material particulado se tiene un aumento del 1,3%. Análogamente, una disminución del 20% del parámetro distancia recorrida en maniobra tiene como consecuencia una disminución de las emisiones de NOx y CO_2 en un 0,16% y en un 1,3% para las emisiones de material particulado.

Finalmente, se tiene que un aumento del 10% del parámetro tiempo en puerto supone un aumento en un 9% de las emisiones de NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$. Además, una disminución del 10% del parámetro tiempo en puerto tiene asociado una disminución del 11% aproximadamente para los tres contaminantes.

En conclusión, al sensibilizar los tres parámetros y observar cómo varían las emisiones contaminantes se desprende que el parámetro que mayor impacto genera en las emisiones de NOx y CO_2 es el de tiempo en puerto, mientras que para el contaminante $PM_{2,5}$ el parámetro que más influye en sus emisiones es el tipo de combustible. Por tanto, estos son parámetros a prestar especial atención a la hora de calcular emisiones contaminantes en estudios futuros.

3.4 Comparación con estudios anteriores

Esta sección tiene como propósito realizar una comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos investigativos provenientes de diversos ámbitos. Dicha comparación permite evaluar si los presentes resultados caen dentro de un rango razonable, para así poder afirmar que son válidos o no.

Adicionalmente, se busca hallar explicación en las diferencias que existan entre los valores a comparar a través del análisis de las distintas metodologías empleadas.

3.4.1 Agencia Internacional de la Energía

Como se menciona en el capítulo de estado del arte del presente documento, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) publica año a año el documento que lleva por título "CO_2 Emissions from Fuel Combustion Highlights", el cual entrega estimaciones en torno a la generación de dióxido de carbono a partir de la quema de combustibles de todos los países pertenecientes a la OCDE y a lo largo de los sectores de la economía global, entendiendo que cualquier política relacionada con materias energéticas y mitigación del calentamiento global debe ser fundada a partir de información fidedigna.

La metodología que utiliza este estudio es la adoptada de la guía de la IPCC, organismo el cual se encarga de facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. La estimación se realiza, básicamente, a partir del producto entre el consumo de combustible y el factor de emisión y se conoce por el nombre de Tier I.

A continuación, se muestra una tabla que compara ambos estudios:

Investigación	Estimación CO_2 [ton/año]
Presente estudio (2015)	614.726
IEA (2014)	640.000

Tabla 22: Comparación de la estimación anual de CO2 del presente estudio con el propuesto por la IEA.

La comparación se hace con respecto a la estimación anual de dióxido de carbono asociado al sector transporte marítimo en Chile. Como es posible observar, ambos valores se encuentran relativamente cercanos. La diferencia entre el resultado de este estudio y la estimación de la IEA asciende a un 4% aproximadamente, pero corresponden a años diferentes, puesto que aún no se cuentan con resultados más actualizados por parte de la IEA. Esto hace que se desprenda que los resultados deben tener, necesariamente, cierta diferencia, puesto que año a año el tráfico marítimo varía.

Sin embargo, al observar el gráfico 5, el cual muestra mediante un gráfico de barra la evolución de la estimación de cada año de dióxido de carbono en Chile para el sector transporte marítimo por parte de la IEA se puede evidenciar que el resultado obtenido en el presente estudio encaja con el rango de resultados que aquel estudio ofrece.

3.4.2 "Inventario de emisiones de la actividad portuaria en la zona de Valparaíso, Quintero y San Antonio"

Otro estudio que se utiliza para validar la información desprendida del presente documento, es la memoria de licenciatura para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico de nuestra Universidad Técnica Federico Santamaría, cuyo autor es José Miguel Espinoza Torres. Este estudio desarrolla una estimación de emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo en la V Región, particularmente en los puertos de Valparaíso, Quintero y San Antonio para el año 2012.

Debido al alcance de este estudio es que solo es posible comparar resultados de emisiones anuales de la V Región. No obstante, el estudio abarca gran cantidad de contaminantes, por lo que, a diferencia de la comparación anterior, se procede a comparar las emisiones anuales no

solo de dióxido de carbono, sino que también de óxidos de nitrógeno y material particulado. Además, resulta interesante realizar la comparación, pues ambas metodologías convergen en varios supuestos y consideraciones.

A continuación, se muestra una tabla para cada puerto, las cuales resumen la comparación de los resultados de emisiones anuales.

Investigación	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
Presente estudio (2015)	813	41.591	13
Memoria Licenciatura (2012)	1.116	53.267	16

Tabla 23: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de Valparaíso.

Investigación	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
Presente estudio (2015)	1.014	51.877	16
Memoria Licenciatura (2012)	707	25.479	9

Tabla 24: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de Quintero.

Investigación	NOx [ton/año]	CO_2 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]
Presente estudio (2015)	760	38.911	13
Memoria Licenciatura (2012)	1.261	54.957	17

Tabla 25: Comparación de resultados de emisiones anuales de principales contaminantes, para el puerto de San Antonio.

Se observan diferencias entre los resultados entre un estudio y otro, no obstante no son diferencias significativas y ambos caen en rangos similares. En general, se tiene que las emisiones del presente estudio son levemente menores que las del estudio comparado, a excepción del puerto de Quintero. Para el caso de los puertos de Valparaíso y San Antonio, se tiene una diferencia de alrededor del 20-40% menos en los resultados de emisiones de NOx y CO_2 y aproximadamente 15-20% menor en el caso del $PM_{2,5}$. En el caso del puerto de Quintero, la diferencia asciende alrededor del 30-50% mayor para el NOx y CO_2, mientras que para el $PM_{2,5}$ se cuenta con un 45% mayor.

La explicación de dichas diferencias radica en diversos factores. El primero de ellos, es que se están comparando años distintos, por lo que es lógico pensar que el tráfico marítimo no

son iguales entre un estudio y otro y, por tanto, las emisiones anuales de contaminantes tampoco lo son necesariamente. En efecto, en el presente estudio se tiene que entre los tres puertos analizados se reúnen 3.657 movimientos portuarios, mientras que en el estudio a comparar se tienen 4.442 movimientos portuarios. El hecho aislado de que hayan más movimientos portuarios sugiere que las emisiones sean más elevadas, pero si a ese factor se le agrega que en esta región predomina el tráfico de buques portacontenedores se desprende que, sin lugar a dudas, deben existir diferencias en los resultados, pues este tipo de naves son a las que se le asocian mayor nivel de emisiones contaminantes. Otro factor influyente es que se desconoce si en el estudio a comparar se realiza un pre-tratamiento de la información que contiene la base de datos de movimientos portuarios. Si bien en ambos estudios el organismo que facilita dicha información es la Armada de Chile, siempre van a existir datos atípicos que no son representativos para efectos de estimación de emisiones, como lo son los barcos que poseen un elevado tiempo en puerto por razones ajenas a su operación en condiciones normales. Estos elevados valores de tiempo en puerto no excluidos en conjunto con la diferencia de cantidad de movimientos portuarios explican, en gran parte, las diferencias que se observan en las tablas 23, 24 y 25. En el caso particular del puerto de Quintero, se tiene que, a diferencia de las comparaciones de los puertos de Valparaíso y San Antonio, los resultados obtenidos son mayores que los del estudio comparado. La razón de este hecho radica, principalmente, en que dentro de los supuestos que las dos metodologías adoptan. En el presente estudio se considera un valor más elevado de potencia del motor principal y auxiliar de las naves tipo petroleras con respecto al considerado en el estudio a comparar. Se decide asumir dichos valores de potencias para mantener un criterio consistente en materia de suposiciones, pues las potencias asumidas se basan en el estudio citado en la sección de metodología. En el estudio a comparar, también se adoptan estos supuestos a partir de un estudio connotado, pero en la categoría de naves petroleras se asume un valor de potencia único de un barco en particular. Aquel valor fue citado a partir de una memoria de licenciatura que aborda materias de economía energética de una nave nacional en particular de tipo petrolero. Además, se tiene que en el puerto de Quintero el tipo de nave que domina el tráfico marítimo es, precisamente, las de tipo petrolero. Por lo tanto, es esperable que las emisiones atmosféricas en este puerto en particular sean mayores.

3.4.3 Ingeniería DICTUC, UTFSM y Greenlab UC

Existe un estudio elaborado por académicos y profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad Técnica Federico Santamaría a petición de la Subsecretaría del Medio Ambiente, el cual desarrolla un inventario de emisiones de contaminantes climáticos de vida corta en Chile y que lleva por título “Apoyo a la iniciativa

para el plan de mitigación de los contaminantes climáticos de vida corta en Chile" (Ingeniería DICTUC, 2017).

Se conocen como contaminantes de vida corta aquellos contaminantes emitidos al aire y que contribuyen al cambio climático, pero que su permanencia en la atmósfera asciende a desde unas horas hasta un par de décadas. En consecuencia, el atacar la mitigación de éstos supone cambios y resultados a corto plazo. Los principales contaminantes son carbono negro[14], metano, ozono troposférico y algunos hidrofluorocarbonos.

El objetivo general del estudio es generar antecedentes técnicos que permitan incrementar el conocimiento sobre los contaminantes climáticos de vida corta y elaborar el Plan de Mitigación de los Contaminantes de Vida Corta en Chile. En consecuencia con el objetivo general, se entrega un inventario de emisiones de contaminantes de vida corta para el sector transporte marítimo, cuyos resultados se comparan con los de este documento a continuación.

Los resultados a comparar están asociados a los siguientes contaminantes: CH_4, $PM_{2,5}$, CO, NOx y NMCOV. Además, el estudio entrega los resultados en términos de toneladas anuales desagregadas por región del país, por lo que dicha comparación también se realiza. A continuación, se muestran dos tablas que resumen los resultados a comparar:

[14] Carbono negro hace referencia al aerosol que se emite directamente a la atmósfera en forma de partículas finas, más conocidas como material particulado (PM).

Región	CH_4 [ton/año]	BC [ton/año]	CO [ton/año]	NOx [ton/año]	NMVOC [ton/año]
XV Región de Arica y Parinacota	0	10	7	232	4
I Región de Tarapacá	0	23	15	516	9
II Región de Antofagasta	0	15	10	339	6
III Región de Atacama	1	105	70	2.403	43
IV Región de Coquimbo	0	26	17	598	11
V Región de Valparaíso	3	324	216	7.418	132
VIII Región de Bío-Bío	1	146	98	3.350	59
XIV Región de los Ríos	0	3	2	76	1
X Región de Los Lagos	0	6	4	133	2
XI Región de Aysén	0	6	4	142	3
XII Región de Magallanes	2	259	173	5.931	105
Total Nacional	**7**	**923**	**616**	**21.138**	**375**

Tabla 26: Resultados del estudio de Ingeniería DICTUC de emisiones anuales de contaminantes de vida corta asociadas al sector transporte marítimo en Chile el 2013.

Región	CH_4 [ton/año]	$PM_{2,5}$ [ton/año]	CO [ton/año]	NOx [ton/año]	NMVOC [ton/año]
XV Región de Arica y Parinacota	0	17	75	1.118	17
I Región de Tarapacá	0	14	59	884	13
II Región de Antofagasta	0	26	111	1.662	25
III Región de Atacama	0	6	25	371	6
IV Región de Coquimbo	0	3	14	202	3
V Región de Valparaíso	1	42	177	2.633	40
VIII Región de Bío-Bío	1	34	144	2.146	32
XIV Región de Los Ríos	0	3	12	185	3
X Región de Los Lagos	1	29	126	1.876	28
XI Región de Aysén	0	4	17	244	4
XII Región de Magallanes	0	11	47	696	10
Total Nacional	**4**	**189**	**806**	**12.017**	**180**

Tabla 27: Resultados del presente estudio de emisiones anuales de contaminantes de vida corta asociadas al sector transporte marítimo en Chile el 2015.

Al observar las tablas 26 y 27 se presencian diferencias en los resultados que, en algunos casos, son elevadas. Las diferencias más altas se dan al comparar las emisiones anuales de NOx y las de material particulado

Al igual que las comparaciones anteriores, se tiene que, necesariamente, deben existir diferencias en los resultados puesto que son estudios que analizan distintos años. Sin embargo, el hecho principal que explican dichas diferencias entre los resultados es la metodología empleada en un estudio y en el otro. Para desarrollar un inventario de emisiones existen dos famosas metodologías conocidas como Top Down y Bottom Up. La primera, del inglés "de arriba hacia abajo", se caracteriza por formular un resumen sistema, sin especificar detalles. El sistema se divide por partes, en donde cada parte se va redefiniendo con mayor detalle hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo. Esta es el tipo de metodología que adopta el estudio a comparar, donde se aplica un enfoque basado en la demanda regional de transporte de pasajeros y toneladas de carga. A partir de este enfoque es que la metodología considera supuestos únicos para todas las embarcaciones. En contraste con esta metodología, el presente estudio adopta una metodología Bottom Up, del inglés de abajo hacia arriba, que se caracteriza porque las partes individuales se caracterizan con detalle para posteriormente enlazarlas y generar componentes más grandes, hasta llegar a formar el sistema completo. Esta característica hace que el presente estudio posea resultados más específicos, pues se desarrolla el inventario a partir de un detallado tráfico marítimo y supuestos que dependen de la conjugación de una serie de parámetros. Por lo tanto, se tiene que, en general, este hecho explica las discrepancias entre un resultado y otro.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones Generales

El presente trabajo calcula la cantidad de emisiones de los principales contaminantes asociados al transporte marítimo en Chile para el año 2015. Esto se logra a través del desarrollo de una metodología del tipo Bottom Up, la cual obtiene los resultados a partir de la actividad marítima dentro del área de estudio, factores de emisión asociados a cada contaminante y supuestos relacionados con los parámetros físicos propios de las embarcaciones que participan en el tráfico marítimo. Como resultado, se obtienen las emisiones contaminantes en toneladas anuales distribuidas por regiones del país y por tipo de nave, como también en forma mensual categorizada por puertos.

A partir de la información recopilada, se realiza un pre-procesamiento de la base de datos que consta en analizar la información con el objeto de dilucidar si existen datos que no sean representativos para la materia de estudio. Se eliminan, principalmente, datos de movimientos cuyo tiempo en puerto supere el criterio establecido mayor a 20 días y datos que no tengan lógica, como por ejemplo, movimientos entre puertos que no sean físicamente posibles (recaladas de naves a un determinado puerto sin siquiera haberse despachado del puerto del viaje anterior, entre otros).

Adicionalmente, se tiene que en materia de supuestos para el desarrollo de la metodología se adoptan las ideas propuestas por el estudio Entec, obteniendo valores referenciales para las potencias de los motores, velocidades crucero por tipo de embarcación y velocidades del motor en rpm. En cuanto a los factores de emisión utilizados, estos fueron extraídos del estudio publicado por SMED.

4.2 Conclusiones Específicas

Se revisa la normativa vigente en cuanto a emisiones atmosféricas en el transporte marítimo tanto a nivel nacional como internacional. A nivel nacional, se tiene escasa documentación que respalde el marco regulatorio de la emisión de contaminantes atmosféricos asociados a embarcaciones marítimas en el ámbito local, puesto que no existe una autoridad competente que regule y fiscalice esta materia. A nivel internacional, se tiene que Chile está adscrito al convenio de MARPOL 73/78 bajo el manto de la IMO. Este convenio está compuesto de seis anexos y su propósito es preservar el ambiente marino mediante la completa eliminación de

la polución por hidrocarburos y otras sustancias dañinas, así como la minimización de las posibles descargas accidentales. Dentro de este convenio, llama la atención las reglas 13, 14 y 15 del Anexo VI las cuales establecen límites de emisiones de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado y compuesto orgánicos volátiles, respectivamente. En el caso de la regla 13, limita las emisiones de NOx aplicando estándares directamente a los fabricantes de embarcaciones marítimas a nivel mundial, en particular a las embarcaciones fabricadas desde el año 2000 en adelante. Por lo que es muy probable que existan naves de este tipo que recalan regularmente en los puertos de Chile y para efectos de estimaciones de NOx se debiese adoptar un factor de emisión acorde a este contexto. Lamentablemente, resulta muy difícil identificar las naves que recalan en Chile que fueron construidas posterior al año 2000 y que cumplan con esta normativa. En el caso de la regla 14 y 15, estas operan sobre un área geográfica determinada conocidas como zonas de control de emisiones, donde se prohíben las emisiones deliberadas de estas sustancias mediante procedimientos establecidos y regulados por la autoridad competente de cada país adscrito al convenio.

Sin embargo, no existe en Chile un ente fiscalizador en cuanto a materia de emisiones atmosféricas asociadas a embarcaciones marítimas.

En cuanto al desarrollo de la metodología, se cuenta con dos frentes que atacar: por un lado un frente administrativo y de recopilación de datos y, por otro lado, un frente técnico en relación a los supuestos a definir para el cálculo de emisiones. El ámbito administrativo hace referencia a la manera en que se recopila la base de datos de movimientos portuarios a nivel nacional. Dicha información es provista por la Armada de Chile y es tratada como comercial y no de libre acceso. Esto implica que las únicas dos maneras de acceder a ella es a través de un acuerdo comercial de venta de la base de datos entre la institución pública y la institución privada o solicitarla para fines académicos de manera gratuita. La segunda opción es la que este estudio sigue, pero para ello es necesario seguir el conducto regular para la solicitación de información como también cumplir con las distintas exigencias que la institución demanda.

Se consideran 21.638 movimientos portuarios que se dieron lugar en Chile durante el 2015 correspondientes a las 16 categorías de naves que el estudio considera. De la totalidad de movimientos, el tipo de nave que mayor participación es el de carga general con un 18%, seguido por las naves de tipo wellboat con un 12%, portacontenedores con un 10%, petroleros con un 9% y pesqueros de cerco con un 9%. La región que acumula más movimientos es la X región de Los Lagos con un 28%, seguido de la región de Valparaíso con un 17%, la región de Bío-Bío con un 14%, la región de Magallanes con un 10% y la

región de Antofagasta con un 8%. Además, el mes que acumula más actividad es marzo con 2.048 movimientos, seguido de noviembre con 2.019 y abril con 2.911.

Como resultados de emisiones a nivel regional, se obtienen las siguientes emisiones medidas en toneladas por año:

Región	NOx	CO_2	$PM_{2,5}$
XV Arica	1.118	57.185	17
I Tarapacá	884	45.234	14
II Antofagasta	1.662	84.980	26
III Atacama	371	18.966	6
IV Coquimbo	202	10.351	3
V Valparaíso	2.633	134.728	42
VIII Bío-Bío	2.146	109.769	34
XIV Los Ríos	185	9.443	3
X Los Lagos	1.876	95.972	29
XI Aysén	244	12.477	4
XII Magallanes	696	35.622	11
Total general	**12.017**	**614.726**	**189**

Tabla 28: Emisiones anuales de principales contaminantes distribuidas por región.

Se concluye que la región que lidera en cuanto a emisiones atmosféricas asociadas al transporte marítimo es la V región de Valparaíso, seguida de la X región de Los Lagos y después la VIII región de Bío-Bío. En términos porcentuales, la región de Valparaíso representa un 22% de las emisiones anuales de NOx, seguido de un 18% la región de Bío-Bío, 16% la región de Los Lagos y 14% la región de Antofagasta. Para el caso del CO_2 y el $PM_{2,5}$ las proporciones son las mismas.

Al contrastar los resultados de emisiones por región con el análisis de los movimientos portuarios, se ve que el más alto tráfico marítimo (región de Los Lagos) no necesariamente asegura el más alto nivel de emisiones contaminantes (región de Valparaíso), pues otros de los factores que determinan las emisiones son los tipos de naves que componen dichos movimientos y el tiempo en puerto que permanecen. Naves de mayor envergadura implican un rango mayor de potencias instaladas en los motores principales y auxiliares, lo que se refleja en emisiones de mayor valor.

A nivel de tipos de naves, se concluye que los tipos de naves que más emisiones de NOx tienen asociadas en Chile durante el 2015 son los de tipo portacontenedor y graneleros con un

16%, seguidos de pesqueros de cerco, carga general y petrolero con un 13%, 12% y 11% respectivamente. Para los casos de CO_2 y $PM_{2,5}$ las proporciones se mantienen.

A nivel de puertos, se concluye que el puerto nacional que más emisiones de NOx tiene asociado es el de Puerto Montt con un 11%, seguido de Arica con un 9%, Mejillones y Quintero con 8% y Valparaíso con 7%. En el caso de CO_2 y $PM_{2,5}$ las proporciones se mantienen.

A nivel mensual, marzo es el mes en que más emisiones atmosféricas se concentran y es explicado porque marzo posee el mayor nivel de actividad marítima, tanto en cantidad de recaladas como en suma de tiempo en puerto. Este peak de actividad no solo trae como consecuencia un alto nivel de emisiones contaminantes asociadas a embarcaciones marítimas, sino que también conlleva un alto nivel de emisiones asociadas a actividades que se dan lugar en las áreas portuarias, tales como carga, descarga y transporte de productos. Estas actividades tienen asociadas una variedad de maquinarias tales como grúas, camiones, generadores eléctricos, entre otros. Esto genera un impacto negativo en la calidad del aire concentrado en un corto período de tiempo.

En cuanto a la distribución de las emisiones contaminantes por modo de operación, se tiene que a nivel nacional durante el 2015 un 15% del total general de toneladas de contaminantes atmosféricos asociados a embarcaciones marítimas corresponden a emisiones en el modo de operación en maniobra, mientras que el 85% restante está asociado al modo en puerto. Es interesante destacar que de las emisiones asociadas al modo en maniobra, la mayoría de estas son producto de la actividad de naves del tipo remolcadores de alta mar. La operación de este tipo de naves es casi puramente en modo maniobra, pues su función es asistir y dirigir la maniobra de naves de mayor envergadura al momento de entrar a un determinado puerto. Hay casos en los cuales se necesitan 3 o 4 remolcadores para asistir una sola nave. Sin embargo, la naturaleza de la operación de estas naves hacen difícil la estimación de emisiones contaminantes de estas, pues se desconoce la distancia o tiempo de maniobra de este tipo de naves.

Se realiza análisis de sensibilidad para determinar el impacto en las emisiones que tienen los parámetros: tipo de combustible, distancia recorrida en maniobra y tiempo en puerto. Se concluye que el contaminante más sensible a la alteración de dichos parámetros es el material particulado y que la variable que mayor impacto tiene en NOx y CO_2 es el tiempo en puerto. También, se concluye que el parámetro que menos impacto genera en las emisiones es el de distancia recorrida en maniobra. Para el caso del material particulado la variable más influyente es el tipo de combustible utilizado. En general, los resultados de emisiones anuales

de NOx y CO_2 poseen una incertidumbre de, aproximadamente, ± 10%. Esto se concluye a partir del análisis de sensibilidad, en donde se toman los valores extremos de emisiones en cada sensibilización de parámetros y se comparan con los resultados obtenidos en bruto, obteniendo así un rango en donde las emisiones existen. Para el caso del material particulado, la incertidumbre asciende a + 70% y - 20%, aproximadamente. En efecto, esto se puede representar gráficamente como sigue:

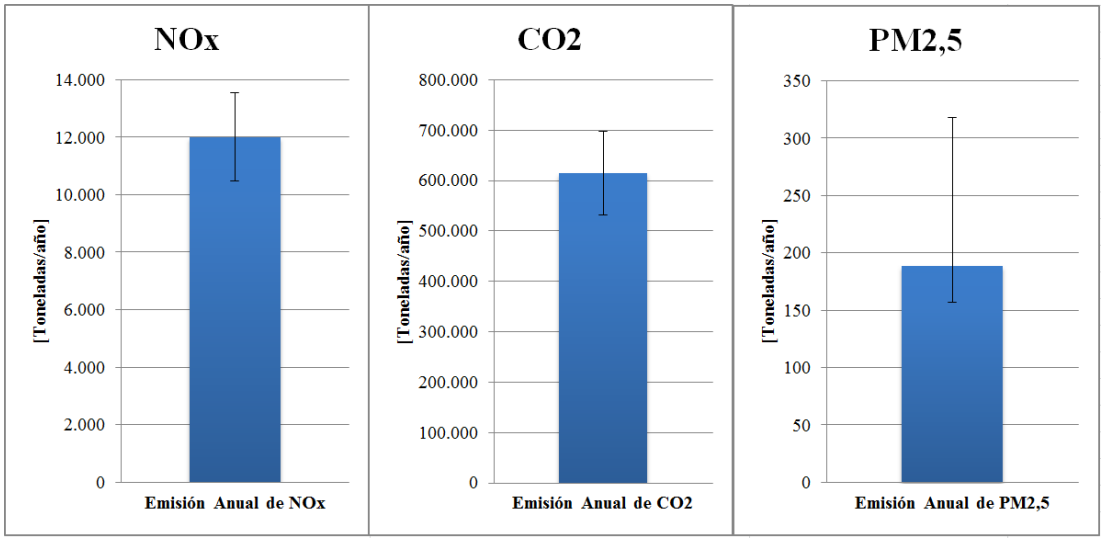

Gráfico 27: Emisión anual de NOx, CO_2 y $PM_{2,5}$ con sus respectivas barras de error.

En los gráficos anteriores quedan plasmadas las conclusiones extraídas del análisis de sensibilidad. Se aprecia que el contaminante más sensible a las variaciones de los parámetros mencionados es el material particulado.

Finalmente, se tiene que al comparar los resultados obtenidos con otros estudios de la materia se concluye que los resultados caen en un rango aceptable, pues al comparar con el estudio de la IEA y con la memoria de licenciatura se puede inferir esto. Se concluye que las diferencias entre los resultados se deben principalmente a:

- Diferencia en tráfico marítimo al comparar con estudios de otros años.
- Diferencias en la metodología para estimar emisiones, pues el presente estudio se basa en la actividad marítima y otros se basan en registros históricos de consumo energético (contraste entre metodologías Buttom Up y Top Down).
- Desconocimiento si las bases de datos de estudios anteriores fueron analizadas y filtradas en orden de utilizar información representativa para el estudio.
- Diferencias en los distintos supuestos adoptados en la metodología.

4.3 Recomendaciones

Se concluye que la forma más eficiente de solicitar la información para fines académicos es acudir directamente al Departamento de Tecnologías de la Información de DIRECTEMAR y tener, como estudiante, una carta que avale la calidad de alumno tesista firmada por profesor guía de la investigación y el respectivo Jefe de Carrera. Es importante tener en cuenta esto como recomendación para obtener la información necesaria de forma más rápida y fluida para futuras tesis de pregrado o investigaciones en torno a inventarios de emisiones asociados al transporte marítimo en Chile. El escenario ideal sería obtener la información desde la base de datos mundial de la empresa Lloyd's Register, pues esta es la fuente que utiliza la metodología citada del estudio de la empresa Entec UK. Dicha información es mucho más detallada y podría entregar resultados más representativos. No obstante, corresponde a una información comercial cuya adquisición significaría una inversión monetaria que no se justifica para un trabajo de memoria de licenciatura de pregrado.

Además de realizar una limpieza de datos atípicos o poco representativos de la base de datos, se recomienda prestar atención a los movimientos del mes de diciembre, puesto que el hecho de que la muestra contemple datos solo hasta el 31 de diciembre trae como consecuencia que naves que recalan en mes de diciembre, pero zarpan en un momento posterior al 31 de ese mes, no estén presentes en la base datos. Esta problemática se puede solucionar extendiendo la muestra de actividad portuaria, es decir, considerar una holgura en el final de la muestra con el fin de que el estudio considere las recaladas que se dan lugar en diciembre y cuyo zarpe ocurre durante enero del año siguiente.

En materia de supuestos adoptados para la estimación es deseable tener información más específica aún. Con esto se hace referencia a obtener valores más representativos de las potencias de motores principales y auxiliares de los tipos de embarcaciones que recalan en territorio nacional. Este parámetro en particular es de suma relevancia y se recomienda categorizar los movimientos portuarios no solo por tipos de naves, sino que también por rango de TRG. De esta forma entraría en juego la variable de "envergadura" de la nave, es decir, para un mismo tipo de nave se consideraría qué tan robusta es a través de su TRG. De esta forma se le podrían asociar a naves más grandes potencias más adecuadas con respecto a su operación. Este parámetro es conocido y se encuentra disponible en las bases de datos de DIRECTEMAR para cada movimiento portuario.

A su vez, se recomienda verificar los factores de emisión utilizados. Se recomienda considerar factores más actualizados y que sean más compatibles con las condiciones que se dan en nuestro país.

Otro parámetro importante a evaluar es el de distancia recorrida en modo maniobra, el cual es particularmente difícil de establecer, pues depende de muchas variables, tales como: condiciones climáticas y geográficas, criterio del capitán, tiempo en cola a esperar por un terminal libre donde atracar, entre otros. Por lo que se recomienda evaluarlo más a profundidad. Se conoce que toda nave antes de hacer ingreso a un puerto nacional es interferida por una delegación de DIRECTEMAR que proviene desde tierra hacia la nave en cuestión. Desde ese momento se da inicio a la maniobra de acercamiento al puerto a cargo de un práctico de la delegación, por lo que para cada movimiento portuario se contaría con el tiempo utilizado para el modo de operación en maniobra. Por lo tanto, se sugiere que para futuros estudios se intente obtener esta información anteriormente descrita, pues esta agregaría un valor enorme a la metodología que se utiliza para estimar emisiones en modo en maniobra, entregando resultados más representativos.

Bibliografía

1. Alver, F., Saraç, B., & Alver Sahin, Ü. (s.f.). *Emission Inventory of Ships in Samsun Port, Turkey.*

2. Armada de Chile - DIRECTEMAR. (2016). *Boletín Estadístico Marítimo.*

3. Armada de Chile. (2016). *Análisis Estadísitcas Portuarias.*

4. Benavides Flores, J. (2011). *Propuesta estructural para remolcador costero de 32m de eslora y 55ton de bollard pull.* Valdivia: Universidad Austral de Chile.

5. Broker Service and Logistic, O. L. (2013). Obtenido de http://www.bsl.com.mx/docspdf/tipo_de_buques.pdf

6. CONAMA. (2000). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial: Actividad Portuaria.* Santiago.

7. Cooper, D., & Gustafsson, T. (2004). *Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors.* Norrkoping, Suecia.

8. Draffin, N. (2008). *Guía de Abastecimiento del Combusible Marino.* Reino Unido: Petrospot Limited.

9. Entec UK Limited. (2002). *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.*

10. Entec UK Limited. (2010). *UK Ship Emissions Inventory, Final Report.*

11. Espinoza Torres, J. M. (2014). Memoria de Licenciatura. *Inventario de emisiones de la actividad portuaria en la zona de Valparaíso, Quintero y San Antonio*. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santamaría.

12. European Comission. (2011). *Change, how can you control climate change?* Obtenido de https://ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_es.pdf

13. Ingeniería DICTUC. (2017). *Apoyo a la iniciativa para el plan de mitigación de los contaminantes climáticos de vida corta en Chile, Informe Final.* Santiago.

14. International Energy Agency. (2016). *CO2 Emissions from Fuel Consumption Highlights.*

15. Manaadiar, H. (2015). *Shiping and freight resource.* Obtenido de https://shippingandfreightresource.com/what-is-bunker-and-bunkering/

16. MAPS Chile. (2013). *Escenarios referenciales para la mitigación del cambio climático en Chile.* Santiago, Chile: Gobierno de Chile.

17. MAPS Chile. (2014). *Resultados Fase 2.* Santiago, Chile: Gobierno de Chile.

18. MAPS Chile, Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático. (2014). *Informe Final: "Proyección Escenario Línea Base 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Transporte y Urbanismo".* Santiago, Chile: Gobierno de Chile.

19. Merico, E., Donateo, A., Gambaro, A., Cesari, D., Gregoris, E., Barbaro, E., . . . Contini, D. (2016). *Influence of in-port ships emissions to gaseous atmospheric pollutants and to particulate matter of different sizes in a Mediterranean harbour in Italy.*

20. Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Estado del Medio Ambiente.*

21. Opazo, M. (2016). *Revista Negocios Globales - El Transporte Marítimo Mundial*. Obtenido de http://www.emb.cl/negociosglobales/articulo.mvc?xid=1390

22. Pérez Pro, Á. (2014). *Análisis de la aplicación del Anexo VI del convenio de Marpol en la flota española.* Barcelona, España.

23. Rosas Gómez, J. (1995). *Compendio de terminología náutica.* Lima, Perú.

24. Sin, M. (2012). *Análisis de la implementación de combustibles con bajo contenido en azufre en el tráfico marítimo en el Mar del Norte.* Barcelona, España: Universitat Politecnica de Catalunya.

25. Sistemas Sustentables. (2009). *Desarrollo y aplicación de una metodología local de cálculo de emisiones búnker para gases de efecto invernadero.* Santiago, Chile.

26. The Carbon Directory. (2011). Obtenido de http://www.thecarbondirectory.com/Services-for-Businesses/Environmental/Entec-UK-Ltd-22912

27. Trozzi, C. (2010). *Emission estimate methodology for maritime navigation.* Roma, Italia.

28. Wunderlich Contreras, M. R. (2005). *Análisis de la Contaminación Atmosférica Provocada por Buques en base a las Exigencias del Anexo VI del MARPOL 73/78.* Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Anexos

Anexo 1: Factores de Emisión

Contaminantes Criterios

Tipo de motor	Combustible	CO	NMVOC	SOx	TSP	PM 10
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	0,5	0,3	1,5	0,2	0,2
Velocidad Baja	Petróleo Residual	0,5	0,3	9	1,3	1,3
Velocidad Media	Petróleo Destilado	1,1	0,2	1,6	0,2	0,2
Velocidad Media	Petróleo Residual	1,1	0,2	9,9	0,5	0,5

Tabla 29: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	CO	NMVOC	SOx	TSP	PM 10
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	1	0,6	1,6	0,4	0,4
Velocidad Baja	Petróleo Residual	1	0,6	9,9	2,6	2,6
Velocidad Media	Petróleo Destilado	2,2	0,4	1,8	0,4	0,4
Velocidad Media	Petróleo Residual	2,2	0,4	10,9	1	1

Tabla 30: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	CO	NMVOC	Sox	TSP	PM 10
Velocidad Media	Petróleo Destilado	0,9	0,2	1,7	0,2	0,2
Velocidad Media	Petróleo Residual	0,9	0,2	10,4	0,5	0,5

Tabla 31: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh].

Gases de Efecto Invernadero

Tipo de motor	Combustible	CH_4	N_2O
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	6,0,E-03	3,1,E-02
Velocidad Baja	Petróleo Residual	6,0,E-03	3,1,E-02
Velocidad Media	Petróleo Destilado	4,0,E-03	3,1,E-02
Velocidad Media	Petróleo Residual	4,0,E-03	3,1,E-02

Tabla 32: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	CH_4	N_2O
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	1,E-02	3,E-02
Velocidad Baja	Petróleo Residual	1,E-02	3,E-02

Velocidad Media	Petróleo Destilado	8,E-03	3,E-02
Velocidad Media	Petróleo Residual	8,E-03	3,E-02

Tabla 33: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	CH_4	N_2O
Velocidad Media	Petróleo Destilado	4,E-03	3,E-02
Velocidad Media	Petróleo Residual	4,E-03	3,E-02

Tabla 34: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh].

Metales

Tipo de motor	Combustible	Pb	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Se	Zn
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	3,0,E-05	9,3,E-07	9,0,E-09	6,0,E-06	9,0,E-06	3,2,E-04	2,0,E-04	9,3,E-09	2,0,E-04
Velocidad Baja	Petróleo Residual	3,0,E-05	2,5,E-06	6,0,E-07	2,0,E-04	2,0,E-04	3,9,E-04	6,6,E-03	3,9,E-06	3,0,E-04
Velocidad Media	Petróleo Destilado	3,0,E-05	1,0,E-06	1,0,E-08	6,0,E-06	1,0,E-05	3,5,E-04	2,0,E-04	1,0,E-08	2,0,E-04
Velocidad Media	Petróleo Residual	3,0,E-05	2,8,E-06	6,0,E-07	2,0,E-04	3,0,E-04	4,3,E-04	7,3,E-03	4,3,E-06	3,0,E-04

Tabla 35: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	Pb	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Se	Zn
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	3,0,E-05	1,0,E-06	1,0,E-08	2,0,E-04	1,0,E-05	3,5,E-04	2,0,E-04	1,0,E-08	2,0,E-04
Velocidad Baja	Petróleo Residual	3,0,E-05	2,8,E-06	6,0,E-07	6,0,E-06	3,0,E-04	4,3,E-04	7,3,E-03	4,3,E-06	3,0,E-04
Velocidad Media	Petróleo Destilado	3,0,E-05	1,1,E-06	1,0,E-08	2,0,E-04	1,0,E-05	3,8,E-04	2,0,E-04	1,1,E-08	2,0,E-04
Velocidad Media	Petróleo Residual	4,0,E-05	3,1,E-06	7,0,E-07	7,0,E-06	3,0,E-04	4,7,E-04	8,0,E-03	4,7,E-06	3,0,E-04

Tabla 36: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	Pb	Cd	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Se	Zn
Velocidad Media	Petróleo Destilado	3,0,E-05	1,1,E-06	1,0,E-08	7,0,E-06	1,0,E-05	3,7,E-04	2,0,E-04	1,1,E-08	2,0,E-04
Velocidad Media	Petróleo Residual	3,0,E-05	3,0,E-06	7,0,E-07	2,0,E-04	3,0,E-04	4,5,E-04	7,7,E-03	4,5,E-06	3,0,E-04

Tabla 37: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh].

Contaminantes Orgánicos Persistentes

Tipo de motor	Combustible	PCB	Diox/Fur	Ben(a)pyr	Ben(b)flu	Ben(k)flu	Indenopyr	PAH-4	HCB
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Baja	Petróleo Residual	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Media	Petróleo Destilado	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Media	Petróleo Residual	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09

Tabla 38: Factores de emisión para modo de operación "En Océano" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	PCB	Diox/Fur	Ben(a)pyr	Ben(b)flu	Ben(k)flu	Indenopyr	PAH-4	HCB
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09

Velocidad Baja	Petróleo Residual	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Media	Petróleo Destilado	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Media	Petróleo Residual	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09

Tabla 39: Factores de emisión para modo de operación "En Maniobra" medidos en [g/kWh].

Tipo de motor	Combustible	PCB	Diox/Fur	Ben(a)pyr	Ben(b)flu	Ben(k)flu	Indenopyr	PAH-4	HCB
Velocidad Media	Petróleo Destilado	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09
Velocidad Media	Petróleo Residual	0,0000001	1,0,E-09	1,0,E-06	2,0,E-06	1,0,E-06	2,0,E-06	6,0,E-06	8,0,E-09

Tabla 40: Factores de emisión para modo de operación "En Puerto" medidos en [g/kWh].

Anexo 2: Emisiones mensuales a nivel nacional

Contaminantes Criterios

Mes	NOx	CO	NMVOC	SOx
Enero	885,8	59,5	13,3	114,7
Febrero	952,5	63,9	14,3	123,0
Marzo	1.237,6	83,0	18,6	159,2
Abril	1.015,7	68,2	15,3	131,0
Mayo	1.108,5	74,3	16,6	142,5
Junio	965,6	64,8	14,5	124,4
Julio	1.031,4	69,1	15,5	132,7
Agosto	1.067,9	71,6	16,0	137,3
Septiembre	889,7	59,7	13,4	114,8
Octubre	1.072,8	71,9	16,1	138,2
Noviembre	1.030,3	69,1	15,5	132,9
Diciembre	759,4	51,0	11,4	98,5
Total general	**12.017,1**	**806,1**	**180,4**	**1.549,2**

Tabla 41: Emisiones mensuales de contaminantes criterio a nivel país medidos en toneladas.

Mes	TSP	PM 10	PM 2,5
Enero	14,1	14,0	14,1
Febrero	15,0	15,0	15,0
Marzo	19,4	19,3	19,4
Abril	16,0	16,0	16,0
Mayo	17,3	17,3	17,3
Junio	15,1	15,1	15,1
Julio	16,1	16,1	16,1
Agosto	16,7	16,7	16,7
Septiembre	14,0	14,0	14,0

Octubre	16,8	16,8	16,8
Noviembre	16,2	16,2	16,2
Diciembre	12,1	12,1	12,1
Total general	**188,9**	**188,6**	**188,9**

Tabla 42: Emisiones mensuales de contaminantes criterio a nivel país medido en toneladas.

Gases de Efecto Invernadero

Mes	CO_2	CH_4	N_2O
Enero	45.318,8	0,3	2,0
Febrero	48.727,6	0,3	2,2
Marzo	63.303,4	0,4	2,8
Abril	51.961,1	0,3	2,3
Mayo	56.699,1	0,3	2,5
Junio	49.393,9	0,3	2,2
Julio	52.755,7	0,3	2,4
Agosto	54.620,6	0,3	2,5
Septiembre	45.511,2	0,3	2,0
Octubre	54.874,7	0,3	2,5
Noviembre	52.707,6	0,3	2,4
Diciembre	38.852,7	0,2	1,7
Total general	**614.726,4**	**3,6**	**27,6**

Tabla 43: Emisiones mensuales de gases de efecto invernadero a nivel país medido en toneladas.

Metales

Mes	Pb	Cd	Hg	As
Enero	2,0,E-03	7,2,E-05	8,7,E-07	5,3,E-04
Febrero	2,1,E-03	7,8,E-05	9,1,E-07	5,6,E-04
Marzo	2,8,E-03	1,0,E-04	1,2,E-06	7,2,E-04
Abril	2,3,E-03	8,3,E-05	9,7,E-07	6,0,E-04
Mayo	2,5,E-03	9,0,E-05	1,0,E-06	6,4,E-04
Junio	2,1,E-03	7,9,E-05	9,1,E-07	5,6,E-04
Julio	2,3,E-03	8,4,E-05	9,6,E-07	6,0,E-04
Agosto	2,4,E-03	8,7,E-05	9,9,E-07	6,2,E-04
Septiembre	2,0,E-03	7,2,E-05	8,5,E-07	5,2,E-04
Octubre	2,4,E-03	8,7,E-05	1,0,E-06	6,3,E-04
Noviembre	2,3,E-03	8,4,E-05	9,8,E-07	6,0,E-04
Diciembre	1,7,E-03	6,2,E-05	7,6,E-07	4,6,E-04
Total general	**2,7,E-02**	**9,8,E-04**	**1,1,E-05**	**7,0,E-03**

Tabla 44: Emisiones mensuales de metales a nivel país medido en toneladas.

Mes	Cr	Cu	Ni	Se	Zn
Enero	7,6,E-04	2,4,E-02	1,6,E-02	2,3,E-06	1,3,E-02
Febrero	8,1,E-04	2,6,E-02	1,7,E-02	2,3,E-06	1,4,E-02
Marzo	1,0,E-03	3,4,E-02	2,1,E-02	2,7,E-06	1,8,E-02
Abril	8,6,E-04	2,8,E-02	1,8,E-02	2,4,E-06	1,5,E-02
Mayo	9,2,E-04	3,0,E-02	1,9,E-02	2,4,E-06	1,6,E-02
Junio	8,1,E-04	2,7,E-02	1,7,E-02	2,2,E-06	1,4,E-02
Julio	8,6,E-04	2,8,E-02	1,8,E-02	2,3,E-06	1,5,E-02
Agosto	8,9,E-04	2,9,E-02	1,8,E-02	2,3,E-06	1,6,E-02
Septiembre	7,5,E-04	2,4,E-02	1,5,E-02	2,1,E-06	1,3,E-02
Octubre	9,0,E-04	2,9,E-02	1,9,E-02	2,4,E-06	1,6,E-02
Noviembre	8,7,E-04	2,8,E-02	1,8,E-02	2,4,E-06	1,5,E-02
Diciembre	6,6,E-04	2,1,E-02	1,4,E-02	2,1,E-06	1,1,E-02
Total general	**1,0,E-02**	**3,3,E-01**	**2,1,E-01**	**2,8,E-05**	**1,8,E-01**

Tabla 45: Emisiones mensuales de metales a nivel país medido en toneladas.

Contaminantes Orgánicos Persistentes

Mes	PCB	Diox/Fur	Ben(b)flu	Ben(a)pyr
Enero	6,6,E-06	6,6,E-08	1,3,E-04	6,6,E-05
Febrero	7,1,E-06	7,1,E-08	1,4,E-04	7,1,E-05
Marzo	9,2,E-06	9,2,E-08	1,8,E-04	9,2,E-05
Abril	7,5,E-06	7,5,E-08	1,5,E-04	7,5,E-05
Mayo	8,2,E-06	8,2,E-08	1,6,E-04	8,2,E-05
Junio	7,2,E-06	7,2,E-08	1,4,E-04	7,2,E-05
Julio	7,6,E-06	7,6,E-08	1,5,E-04	7,6,E-05
Agosto	7,9,E-06	7,9,E-08	1,6,E-04	7,9,E-05
Septiembre	6,6,E-06	6,6,E-08	1,3,E-04	6,6,E-05
Octubre	8,0,E-06	8,0,E-08	1,6,E-04	8,0,E-05
Noviembre	7,6,E-06	7,6,E-08	1,5,E-04	7,6,E-05
Diciembre	5,6,E-06	5,6,E-08	1,1,E-04	5,6,E-05
Total general	**8,9,E-05**	**8,9,E-07**	**1,8,E-03**	**8,9,E-04**

Tabla 46: Emisiones mensuales de contaminantes orgánicos persistentes a nivel país medido en toneladas.

Mes	Ben(k)flu	Indenopyr	PAH-4	HCB
Enero	6,6,E-05	1,3,E-04	3,9,E-04	5,3,E-07
Febrero	7,1,E-05	1,4,E-04	4,2,E-04	5,6,E-07
Marzo	9,2,E-05	1,8,E-04	5,5,E-04	7,3,E-07
Abril	7,5,E-05	1,5,E-04	4,5,E-04	6,0,E-07
Mayo	8,2,E-05	1,6,E-04	4,9,E-04	6,6,E-07
Junio	7,2,E-05	1,4,E-04	4,3,E-04	5,7,E-07
Julio	7,6,E-05	1,5,E-04	4,6,E-04	6,1,E-07
Agosto	7,9,E-05	1,6,E-04	4,7,E-04	6,3,E-07
Septiembre	6,6,E-05	1,3,E-04	4,0,E-04	5,3,E-07
Octubre	8,0,E-05	1,6,E-04	4,8,E-04	6,4,E-07
Noviembre	7,6,E-05	1,5,E-04	4,6,E-04	6,1,E-07
Diciembre	5,6,E-05	1,1,E-04	3,4,E-04	4,5,E-07
Total general	**8,9,E-04**	**1,8,E-03**	**5,3,E-03**	**7,1,E-06**

Tabla 47: Emisiones mensuales de contaminantes orgánicos persistentes a nivel país medido en toneladas.

Anexo 3: Emisiones anuales por región

Contaminantes Criterios

Región	NOx	CO	NMVOC	SOx
XV Arica	1.118,3	74,8	16,7	142,6
I Tarapacá	884,1	59,4	13,3	114,4
II Antofagasta	1.661,7	111,3	24,9	213,4
III Atacama	370,9	24,8	5,6	47,6
IV Coquimbo	202,3	13,6	3,0	26,1
V Valparaíso	2.633,5	176,8	39,7	342,0
VIII Bío-Bío	2.145,8	144,0	32,2	277,0
XIV Los Ríos	184,6	12,4	2,8	23,5
X Los Lagos	1.876,1	125,8	28,1	240,6
XI Aysén	243,6	16,5	3,7	32,3
XII Magallanes	696,2	46,8	10,5	89,9
Total general	**12.017,1**	**806,1**	**180,4**	**1.549,2**

Tabla 48: Emisiones anuales de contaminantes criterio por región medido en toneladas.

Región	TSP	PM 10	PM 2,5
XV Arica	17,1	17,1	17,1
I Tarapacá	14,0	14,0	14,0
II Antofagasta	25,9	25,8	25,9
III Atacama	5,8	5,8	5,8
IV Coquimbo	3,2	3,2	3,2
V Valparaíso	42,1	42,0	42,1
VIII Bío-Bío	33,8	33,8	33,8
XIV Los Ríos	2,8	2,8	2,8
X Los Lagos	29,1	29,1	29,1
XI Aysén	4,1	4,1	4,1
XII Magallanes	11,0	11,0	11,0
Total general	**188,9**	**188,6**	**188,9**

Tabla 49: Emisiones anuales de contaminantes criterio por región medido en toneladas.

Gases de Efecto Invernadero

Región	CO_2	CH_4	N_2O
XV Arica	57.184,8	0,3	2,6
I Tarapacá	45.233,7	0,3	2,0
II Antofagasta	84.980,4	0,5	3,8
III Atacama	18.966,4	0,1	0,9
IV Coquimbo	10.350,6	0,1	0,5
V Valparaíso	134.728,2	0,8	6,1
VIII Bío-Bío	109.768,9	0,6	4,9
XIV Los Ríos	9.442,7	0,1	0,4
X Los Lagos	95.971,7	0,6	4,3
XI Aysén	12.476,9	0,1	0,6
XII Magallanes	35.622,0	0,2	1,6
Total general	**614.726,4**	**3,6**	**27,6**

Tabla 50: Emisiones anuales de gases de efecto invernadero por región medido en toneladas.

Metales

Región	Pb	Cd	Hg	As	Cr
XV Arica	2,5,E-03	9,1,E-05	9,5,E-07	6,2,E-04	8,9,E-04
I Tarapacá	2,0,E-03	7,2,E-05	8,7,E-07	5,3,E-04	7,6,E-04
II Antofagasta	3,7,E-03	1,4,E-04	1,5,E-06	9,6,E-04	1,4,E-03
III Atacama	8,2,E-04	3,0,E-05	3,4,E-07	2,1,E-04	3,1,E-04
IV Coquimbo	4,5,E-04	1,6,E-05	1,9,E-07	1,2,E-04	1,7,E-04
V Valparaíso	5,9,E-03	2,1,E-04	2,7,E-06	1,6,E-03	2,3,E-03
VIII Bío-Bío	4,8,E-03	1,7,E-04	2,1,E-06	1,3,E-03	1,8,E-03
XIV Los Ríos	4,1,E-04	1,5,E-05	1,5,E-07	1,0,E-04	1,5,E-04
X Los Lagos	4,2,E-03	1,5,E-04	1,7,E-06	1,1,E-03	1,5,E-03
XI Aysén	5,4,E-04	2,0,E-05	2,9,E-07	1,6,E-04	2,3,E-04
XII Magallanes	1,5,E-03	5,7,E-05	6,7,E-07	4,1,E-04	5,9,E-04
Total general	**2,7,E-02**	**9,8,E-04**	**1,1,E-05**	**7,0,E-03**	**1,0,E-02**

Tabla 51: Emisiones anuales de metales por región medida en toneladas.

Región	Cu	Ni	Se	Zn
XV Arica	3,1,E-02	1,8,E-02	1,8,E-06	1,7,E-02
I Tarapacá	2,4,E-02	1,6,E-02	2,2,E-06	1,3,E-02
II Antofagasta	4,6,E-02	2,8,E-02	3,4,E-06	2,5,E-02
III Atacama	1,0,E-02	6,2,E-03	7,5,E-07	5,5,E-03
IV Coquimbo	5,6,E-03	3,5,E-03	4,5,E-07	3,0,E-03
V Valparaíso	7,2,E-02	4,8,E-02	7,3,E-06	3,9,E-02
VIII Bío-Bío	5,9,E-02	3,7,E-02	5,2,E-06	3,2,E-02
XIV Los Ríos	5,1,E-03	2,9,E-03	2,7,E-07	2,7,E-03
X Los Lagos	5,1,E-02	3,1,E-02	3,7,E-06	2,8,E-02
XI Aysén	6,7,E-03	4,9,E-03	9,9,E-07	3,6,E-03
XII Magallanes	1,9,E-02	1,2,E-02	1,6,E-06	1,0,E-02
Total general	**3,3,E-01**	**2,1,E-01**	**2,8,E-05**	**1,8,E-01**

Tabla 52: Emisiones anuales de metales por región medida en toneladas.

Contaminantes Orgánicos Persistentes

Región	PCB	Diox/Fur	Ben(a)pyr	Ben(b)flu
XV Arica	8,3,E-06	8,3,E-08	8,3,E-05	1,7,E-04
I Tarapacá	6,6,E-06	6,6,E-08	6,6,E-05	1,3,E-04
II Antofagasta	1,2,E-05	1,2,E-07	1,2,E-04	2,5,E-04
III Atacama	2,7,E-06	2,7,E-08	2,7,E-05	5,5,E-05
IV Coquimbo	1,5,E-06	1,5,E-08	1,5,E-05	3,0,E-05
V Valparaíso	2,0,E-05	2,0,E-07	2,0,E-04	3,9,E-04
VIII Bío-Bío	1,6,E-05	1,6,E-07	1,6,E-04	3,2,E-04
XIV Los Ríos	1,4,E-06	1,4,E-08	1,4,E-05	2,7,E-05
X Los Lagos	1,4,E-05	1,4,E-07	1,4,E-04	2,8,E-04
XI Aysén	1,8,E-06	1,8,E-08	1,8,E-05	3,6,E-05
XII Magallanes	5,2,E-06	5,2,E-08	5,2,E-05	1,0,E-04
Total general	**8,9,E-05**	**8,9,E-07**	**8,9,E-04**	**1,8,E-03**

Tabla 53: Emisiones anuales de contaminantes orgánicos persistentes por región medido en toneladas.

Región	Ben(k)flu	Indenopyr	PAH-4	HCB
XV Arica	8,3,E-05	1,7,E-04	5,0,E-04	6,6,E-07
I Tarapacá	6,6,E-05	1,3,E-04	3,9,E-04	5,2,E-07
II Antofagasta	1,2,E-04	2,5,E-04	7,4,E-04	9,9,E-07
III Atacama	2,7,E-05	5,5,E-05	1,6,E-04	2,2,E-07
IV Coquimbo	1,5,E-05	3,0,E-05	9,0,E-05	1,2,E-07
V Valparaíso	2,0,E-04	3,9,E-04	1,2,E-03	1,6,E-06
VIII Bío-Bío	1,6,E-04	3,2,E-04	9,5,E-04	1,3,E-06
XIV Los Ríos	1,4,E-05	2,7,E-05	8,2,E-05	1,1,E-07
X Los Lagos	1,4,E-04	2,8,E-04	8,3,E-04	1,1,E-06
XI Aysén	1,8,E-05	3,6,E-05	1,1,E-04	1,4,E-07
XII Magallanes	5,2,E-05	1,0,E-04	3,1,E-04	4,1,E-07
Total general	**8,9,E-04**	**1,8,E-03**	**5,3,E-03**	**7,1,E-06**

Tabla 54: Emisiones anuales de contaminantes orgánicos persistentes por región medido en toneladas.