

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



Determinación del nivel de actividad y emisiones
contaminantes producidas por maquinaria fuera de ruta
en Chile

Francisco Javier Pardo Ortiz

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Mauricio Osses

Profesor Co-referente: Ing. Aliosha Reinoso

Agosto 2018

Agradecimientos

Agradezco a mi familia y en especial a mis padres por demostrarme que con esfuerzo todo es posible, y ser siempre una fuente de inspiración.

Al profesor Mauricio Osses por darme esta gran oportunidad y estar siempre presente en el desarrollo de este trabajo, cooperando alegremente como es característico en él. Al señor Aliosha Reinoso por su buena disposición y aceptar ser mi co-referente.

A Berta Soto y su hermano Diego por la indispensable ayuda que me brindaron.

A mi grupo de compañeros que se transformaron en valiosos amigos a lo largo de mi estancia en la universidad, en especial a Gonzalo Antúnez por ser mi principal compañero de estudios, de celebraciones y el mejor amigo.

A mis amigos que a pesar de no ser parte de la universidad siempre estuvieron pendientes de mí, en especial a Karla, Catalina y Gustavo.

Agradezco por sobre todo a la vida por presentar en mi camino a la mujer que se transformó en mi principal motivación para salir adelante, aquella que me levantaba cada vez que tropezaba, la que supo decirme la palabra correcta en el momento indicado, gracias por tanto Carolina Véliz. Adicionalmente, quisiera agradecerle por su ayuda en la redacción de este trabajo, te amo.

Este trabajo fue también parcialmente apoyado por el proyecto FONDAP/CONICYT 15110009.

Resumen

En Chile, una maquinaria móvil fuera de ruta (MMFR) se define como: “Cualquier máquina móvil o equipo industrial portátil o vehículo con o sin carrocería, no destinados al transporte de pasajeros o mercancías por carretera, aptos para desplazarse sobre el suelo, con o sin carretera y que funciona en base a motores de combustión interna, de encendido por compresión, con una potencia neta instalada, igual o superior a 19 kW e inferior a 560 kW. Se excluyen los motores destinados a la propulsión de automotores, locomotoras u otros elementos y equipos ferroviarios que se desplacen sobre rieles, barcos, aeronaves y vehículos de recreación”.

El objetivo de este trabajo de título es estimar el nivel de actividad y las emisiones contaminantes generadas por MMFR en Chile, utilizando como año base el 2017. Para realizar dicho objetivo, se utiliza la metodología entregada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de USA), con lo que es posible obtener las emisiones en toneladas por año de los contaminantes HC, CO, NO_x, MP₁₀, MP_{2,5}, CO₂ y SO₂, para la flota importada al país entre los años 2014 y 2017. Para la flota anterior al año 2014, se actualizarán los resultados reportados por el Ministerio del Medio Ambiente, realizando un aumento de dichas emisiones por el deterioro de motores y una mejora debido al retiro de maquinarias por envejecimiento.

Se comparan los factores de emisión (FE) de equipos nuevos en estado estacionario de la EPA (Actualizados en 2010) con los de la EEA (Actualizados en 2016), y debido a las diferencias que presentan, se utiliza una ponderación de estos para el cálculo de las emisiones de la flota importada entre los años 2014 y 2017. Adicionalmente, se calculan las emisiones utilizando solo FE de la EEA y solo FE de la EPA, siendo estos resultados las incertidumbres de las emisiones, es decir, las cotas inferior o superior de los resultados.

Para la flota anterior al año 2014, el escenario favorable (cota inferior de las emisiones) corresponderá a un caso en que se retire maquinaria y la maquinaria que siga en operación no presente deterioro en sus motores, mientras que el escenario desfavorable (cota superior de las emisiones) corresponderá a un caso en que toda la maquinaria siga en operación y sus motores se hayan deteriorado desde que se realizó el estudio en 2013 hasta el año base 2017.

Los resultados para el año base 2017, estarán compuestos entonces por una actualización de emisiones provenientes de MMFR anterior al año 2014 y por las emisiones calculadas con la metodología EPA para la flota importada entre los años 2014 y 2017, y se presentan a continuación:

	Contaminantes [Ton/año]						
	HC	CO	NO _x	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO ₂	SO ₂
MMFR 2017	5744	27740	38088	4523	4388	5033808	139

Abstract

In Chile, a non-road mobile machinery (NRMM as per its Spanish acronym) is define as: “any mobile machine, portable industrial equipment or vehicle, with or without body, not intended to transport people or goods on road, which are able to move on above the ground, on and off road, and which operates with an internal combustion engine with a compression ignition of a net installed power between 19 kW and 560 kW. Excluding engines for the propulsion of railcars, locomotives or any other railroad elements and equipment that moves over rails, ships, aircrafts and leisure vehicles”.

The objective of this thesis is to estimate the level of activity and the polluting emissions generated by the non-road mobile machinery in Chile in 2017. To achieve this, method used is the one delivered by the Environmental Protection Agency (EPA), which enables to determine the emissions in tons from the pollutants HC, CO, NO_x, MP₁₀, MP_{2.5}, CO₂ y SO₂ per year from the fleet imported between 2014 and 2017. As for the fleets prior to 2014 the results reported by the Ministry of the Environment will be updated with the deterioration of those emissions due to the damage of the engines and an improvement due to the removal of old machinery.

The emission factors (EF) between new EPA equipment in stationary state (updated in 2010) and EEA equipment (updated in 2016) will be compared and according to the differences observed a balancing of these will be use for the calculations of the emissions of the imported fleet between 2014 and 2017. In addition, the emissions are calculated by using only EFs from the EEA and the EPA, being these results the uncertainties of the emissions, in other words, the inferior or superior heights of the results.

For the fleets prior to 2014, the propitious scenario (inferior height of emissions) will be a case in which the machinery is removed and the ones that remain in operation does not present damages in its engines, while the unfavorable scenario (superior height of emissions) will correspond to a case in which all machinery is still in operation and its engines have deteriorated since the study was carried out in 2013 until the reference year, 2017.

The results for the reference year 2017 will be constituted by an update of the emissions originated from NRMMs prior to 2014 and by the emissions calculated with the EPA method for the fleet imported between 2014 and 2017, submitted hereafter:

	Pollutants [Ton/year]						
	HC	CO	NO _x	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO ₂	SO ₂
NRMM 2017	5744	27740	38088	4523	4388	5033808	139

Glosario

MMFR: Maquinaria móvil fuera de ruta.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

EEA: European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente).

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).

MP: Material particulado.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

HC: Hidrocarburos.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

SO₂: Dióxido de azufre.

COVDM: Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano.

THC: Hidrocarburos totales.

TOG: Gas orgánico total.

NMHC: Hidrocarburos distintos del metano.

NMOG: Gas orgánico distinto del metano.

VOC: Compuestos orgánicos volátiles.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	xi
OBJETIVOS	xii
Objetivo General	xii
Objetivos Específicos	xii
1 Capítulo 1 – Estado del Arte	1
1.1 Antecedentes Internacionales	1
1.1.1 Maquinaria Fuera de Ruta en Europa. [1]	1
1.1.2 Maquinaria Fuera de Ruta en USA. [2]	3
1.2 Antecedentes Nacionales	4
1.2.1 Primer Acercamiento a las MMFR en Chile. [3]	4
1.2.2 Emisiones MMFR Año Base 2013. [4]	9
1.2.3 Emisiones de Contaminantes Provenientes de Maquinaria Pesada en Faenas Mineras Ubicadas en la Cordillera de los Andes. [5]	12
1.3 Normativa Nacional	14
1.3.1 Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental en la RM: Acuerdo N°13/2016. [6] ..	14
1.3.2 Anteproyecto de Norma de Emisión para Maquinaria Móvil Fuera de Ruta. [6]	16
2 Capítulo 2 – Metodología	17
2.1 Nivel de Actividad	17
2.1.1 Cantidad y Tipología de Maquinarias	17
2.1.2 Horas Anuales en Operación y Factor de Carga	18
2.1.3 Potencia Nominal	19
2.1.4 Tipo de Tecnología	20
2.2 Factores de Emisión	20
2.3 Cálculo de Emisiones	23
2.3.1 Factor de Emisión Ajustado	23
2.3.2 Eliminación de Equipos Viejos (Chatarrización)	27
2.3.3 Emisiones de Maquinarias Importadas Antes del Año 2014	28
3 Capítulo 3 – Resultados	30
3.1 Nivel de Actividad	30
3.1.1 Cantidad de Maquinarias	30
3.1.2 Horas Anuales en Operación y Factor de Carga.	32
3.1.3 Potencia Nominal	33
3.1.4 Tipo de Tecnología	34
3.2 Factores de Emisión	35
3.3 Cálculo de Emisiones	36

3.3.1	Emisiones Flota Aduanas 2014 – 2017 (año base 2017)	36
3.3.2	Emisiones Flota Anterior al 2014 (Año Base 2017)	41
3.3.3	Emisiones MMFR Totales (Año Base 2017)	42
4	Capítulo 4 – Conclusiones	49
4.1	Conclusiones Generales	49
4.2	Conclusiones Específicas	50
4.2.1	Estado del Arte	50
4.2.2	Metodología	50
4.2.3	Resultados	51
4.3	Recomendaciones	52
	REFERENCIAS	54
	ANEXOS	56

Lista de Anexos

ANEXO I. Homologación Tipologías Nacionales con Internacionales (Elaboración propia).	56
ANEXO II. Factores de ajuste transitorio por tipo de equipo (Fuente: NONROAD2008a Technical Reports).....	58
ANEXO III. Retiro de maquinaria de la flota (Fuente: NONROAD2008a Technical Reports).....	59
ANEXO IV. Estándares de Emisión.....	60

Lista de Figuras

Figura 2-1. Curva de chatarrización predeterminada (Adaptado de [8]).	28
Figura 3-1. Cantidad de maquinarias por importación.....	30
Figura 3-2. Comparación de cantidades con y sin datos atípicos.....	31
Figura 3-3. Distribución de maquinaria según rango de potencia (Elaboración Propia).	34
Figura 3-4. Participación en importaciones (2014-2017).....	34
Figura 3-5. Comparación porcentual entre factores de emisión EPA y EEA, EEA como referencia.	35
Figura 3-6. Relación entre emisiones de CO ₂ , SO ₂ y cantidad de maquinaria importada por año. .	38
Figura 3-7. Comparación de emisiones contaminantes de la flota de aduanas 2014-2017.....	40
Figura 3-8. Comparación de emisiones contaminantes de la flota de aduanas anterior al 2014 con las emisiones utilizando deterioro de motores y retiro de maquinarias por chatarrización.....	42
Figura 3-9. Emisiones contaminantes MMFR año base 2017 con incertidumbre.	43
Figura 3-10. Comparación porcentual de emisiones por contaminantes entre MMFR 2013 y MMFR 2017, utilizando MMFR 2017 como referencia.	44
Figura 3-11. Comparación emisiones MMFR 2017 con vehículos de ruta y transporte aéreo, marítimo y ferrocarriles (Elaboración Propia).	45
Figura 3-12. Comparación porcentual entre emisiones de MMFR 2017 y emisiones de maquinaria pesada de faenas mineras ubicadas en la cordillera de los Andes, con referencia MMFR 2017.	46
Figura 3-13. Aporte en emisiones contaminantes de las distintas fuentes consideradas.....	47

Lista de Tablas

Tabla 1-1. Cantidad de equipos a nivel nacional. [3]	6
Tabla 1-2. Nivel de Actividad en horas/año, para la MMFR de construcción en la RM de Santiago año 2013. [3]	7
Tabla 1-3. Cantidad de MMFR de construcción por tipología en la RM de Santiago, a partir de información de Aduanas. [3].....	8
Tabla 1-4. Estimación de emisiones contaminantes máxima (considerando la MMFR anterior al año 2000) y mínima (sin considerar la MMFR anterior al año 2000) para MMFR de construcción. [3]	9
Tabla 1-5. Número de MMFR por tipología y rubro año 2013. [4]	11
Tabla 1-6. Emisiones de los distintos contaminantes para los distintos escenarios estudiados.	12
Tabla 1-7. Emisiones contaminantes por cada faena minera ubicada en la Cordillera de Los Andes 2014. [5]	13
Tabla 1-8. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]	15
Tabla 1-9. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]	15
Tabla 1-10. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh).[6]	15
Tabla 1-11. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]	16
Tabla 2-1. Factor de carga y horas anuales de operación (Elaboración propia a partir de [8])......	19
Tabla 2-2. Homologación Tier / Stage (Elaboración Propia).....	20
Tabla 2-3. Factores de emisión y consumo específico de combustible en función de la potencia nominal y la tecnología de la maquinaria (Elaboración propia a partir de [8])......	21
Tabla 2-4. Factores de emisión y consumo específico de combustible en función de la potencia nominal y la tecnología de la maquinaria (Fuente: [1]).	22
Tabla 2-5. Factores de conversión para los resultados de emisión de gases de hidrocarburos (Fuente: [8]).	23
Tabla 2-6. Factor de deterioro relativo (A) para motores diésel fuera de carretera (Fuente: [8]). ..	26
Tabla 2-7. Vida media en función de la potencia del motor (Fuente: [8]).	27
Tabla 2-8. Factor de Deterioro para cada contaminante (Fuente: [10]).	29
Tabla 3-1. Cantidad de MMFR por tipología (2014-2017).....	32
Tabla 3-2. Potencias nominales por tipología.	33
Tabla 3-3. Contenido de azufre en el combustible comercial en Chile (Elaboración Propia).....	37
Tabla 3-4. Cantidad de MMFR por tipología, considerando chatarrización (2014-2017).	37
Tabla 3-5. Emisiones Contaminantes Flota Aduanas 2014-2017 (año base 2017).	38
Tabla 3-6. Emisiones contaminantes MMFR anterior al 2014 (año base 2017).	41
Tabla 3-7. Emisiones contaminantes MMFR (año base 2017).	43
Tabla 3-8. Comparación MMFR 2017 con informe CCVC 2013. [16].	45
Tabla 3-9. Emisiones de maquinaria minera en faenas mineras en la cordillera de los Andes (Elaboración propia a partir de [5]).....	47

INTRODUCCIÓN

Esta memoria tiene como finalidad aportar para generar un mapa actualizado de emisiones para Chile, y forma parte de un conjunto de memorias y tesis destinadas a estimar las emisiones de transporte:

- Tesis de Ignacio Suárez: Transporte Terrestre.
- Memoria de Alberto Pino: Barcos.
- Memoria de Natalia Saldaña: Maquinaria pesada en minería.
- Memoria de Constanza Bustamante: Aviones.

El estudio se centrará en las emisiones contaminantes producidas por maquinaria fuera de ruta, ya que hoy en día esta área está poco estudiada. Los contaminantes estudiados serán HC, CO, NO_x, MP₁₀, MP_{2.5}, CO₂ y SO₂.

Al estimar las emisiones generadas por MMFR, se busca poder determinar el impacto que tienen dichas emisiones a nivel país, ya que estas maquinarias se usan en rubros sumamente importantes para la producción nacional: minería, agricultura, industria y construcción.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar el nivel de actividad y emisiones contaminantes producidas por maquinaria fuera de ruta en Chile.

Objetivos Específicos

- Revisión de antecedentes nacionales e internacionales con respecto al nivel de actividad y las emisiones contaminantes producidas por maquinaria fuera de ruta.
- Estimación del nivel de actividad correspondiente al uso de maquinaria móvil fuera de ruta en Chile.
- Definición de factores de emisión para los distintos tipos de maquinaria móvil fuera de ruta utilizadas en Chile.
- Estimación de emisiones para el año 2017.

1 Capítulo 1 – Estado del Arte

En este capítulo se recopilan y describen los antecedentes nacionales e internacionales más relevantes, con referencia a MMFR. Se separarán en tres categorías: Antecedentes Internacionales, Antecedentes Nacionales y Normativa Nacional.

1.1 Antecedentes Internacionales.

En este capítulo, se presentan las metodologías internacionales más importantes para el cálculo de emisiones generadas por MMFR.

1.1.1 Maquinaria Fuera de Ruta en Europa. [1]

El documento “*1.A.4 Non road mobile machinery (2016)*” desarrollado por la EEA, es un capítulo de la guía de inventario de emisiones EMEP/EEA que ofrece metodologías para la estimación de emisiones de combustión y evaporación de fuentes selectas de MMFR. Las categorías excluidas de esta guía son:

- Aviación
- Transporte por carretera
- Ferrocarriles
- Navegación (las "embarcaciones de recreo" se incluyen en este documento).

Este capítulo abarca una mezcla de "otros" equipos que se distribuyen en una amplia gama de sectores de la industria, por lo general terrestres, y comúnmente se denomina colectivamente "Maquinaria móvil fuera de ruta" (MMFR¹). Sin embargo, a pesar de esta diversidad existe el tema común de que todo el equipo cubierto utiliza motores alternativos, alimentados con combustibles líquidos basados en hidrocarburos. Comprenden motores diésel (de ignición por compresión), gasolina y GLP (ignición por chispa).

Más específicamente, los tipos de equipos cubiertos en este capítulo están incluidos en las siguientes categorías:

- Combustión móvil en las industrias manufactureras y la construcción
- Maquinaria móvil comercial e institucional
- Combustión móvil utilizada en zonas residenciales: maquinaria móvil para el hogar y la jardinería

¹ Esta definición de MMFR es la utilizada por la EEA.

- Vehículos todoterreno y otras máquinas utilizadas en la maquinaria agrícola / forestal móvil (excluida la pesca);

- Otros móviles incluyendo maquinaria móvil militar.

Para todos estos tipos de equipos, las emisiones provienen de la combustión de combustible para alimentar el equipo.

En términos de tamaño relativo, la importancia de estos sectores varía de un sector a otro y de una nación a otra. Para muchos países, la contribución a la emisión total nacional será pequeña, es decir, las fuentes individuales no son fuentes clave. Sin embargo, las contribuciones de algunos sectores a los inventarios de algunas naciones pueden ser moderadamente importantes.

Las especies más importantes para esta guía de inventario de emisiones son: SO₂, NO_x, CO₂, MP, CO y COVDMs, con la importancia relativa de la especie dependiendo del tipo de motor (ignición por compresión diésel o encendido por chispa de gasolina) y del tipo de equipo. La metodología utilizada para estimar las emisiones de CO₂ y SO₂ es predominantemente basada en el combustible, y por lo tanto independiente de la tecnología del motor / tipo de equipo.

Este capítulo incluye factores de emisión para la maquinaria actualmente en uso. También incluye información sobre maquinaria que cumpla con los límites de emisión "Stage V" propuestos por la Comisión Europea. Si bien esta legislación aún no está en vigor, se espera que la maquinaria que cumpla con los límites de emisión Stage V estará en uso a partir de 2019.

Uno de los retos más significativos para estimar las emisiones de estas fuentes se relaciona con la obtención de datos de actividad. Los cálculos se pueden hacer sobre la base del consumo de combustible o las horas de funcionamiento de la maquinaria. Es raro que los datos de consumo de combustible (obtenidos de las tablas de balance energético nacional o los datos de ventas) resuelvan el combustible específicamente utilizado en MMFR del consumido por el transporte por carretera. Es una buena práctica garantizar que el combustible asignado al transporte por carretera no incluya el utilizado por MMFR, y se debe tener cuidado para evitar el doble conteo de emisiones. Esto es relevante si la estimación de emisiones de MMFR se basa en un enfoque de combustible utilizado o horas de operación.

Como resultado se tiene un modelo para el cálculo de emisiones que utiliza como factor de emisión el límite de emisiones que establece la norma, utiliza un factor de deterioro constante que incrementa indefinidamente (según la edad del motor) y que para retirar la maquinaria del parque utiliza una edad definida para cada máquina (independiente del nivel de actividad y factor de carga).

1.1.2 Maquinaria Fuera de Ruta en USA. [2]

Para ayudar a los estados y a las agencias reguladoras locales en la creación de inventarios precisos de emisiones para transporte fuera de las carreteras, la EPA ha desarrollado un modelo de emisiones fuera de las carreteras que cubre todas las áreas de la nación, denominado “*User’s Guide for the Final NONROAD2005 Model*”. Las emisiones fuera de carretera son el resultado del uso de combustible en una colección diversa de vehículos y equipos, incluidos vehículos y equipos en las siguientes categorías:

- vehículos recreativos, como vehículos todoterreno y motocicletas todoterreno;
- equipo de registro, como sierras de cadena;
- equipo agrícola, como tractores;
- equipos de construcción, como niveladoras y azadas traseras;
- equipos industriales, tales como carretillas elevadoras y barredoras;
- equipos residenciales y comerciales para césped y jardín, como sopladores de hojas y de nieve;
- embarcaciones marinas recreativas y comerciales, como embarcaciones a motor y petroleros;
- equipos de locomotoras, tales como motores de trenes; y
- aviones, como jets y aviones de propulsión.

Esta versión del modelo de emisiones fuera de las carreteras predice las emisiones para todas las categorías de equipos fuera de carretera enumeradas anteriormente, con excepción de las emisiones comerciales marinas, de locomotoras y de aeronaves.

El modelo incluye más de 80 tipos básicos y 260 tipos específicos de equipos fuera de carretera, y estratifica aún más los tipos de equipos por potencia nominal. Los tipos de combustible incluyen gasolina, diesel, gas natural comprimido (GNC) y gas licuado de petróleo (GLP).

El modelo NONROAD estima las emisiones de seis contaminantes del escape: hidrocarburos (HC), NO_x, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SO_x) y MP. El usuario selecciona entre cinco tipos diferentes para informar sobre HC: hidrocarburos totales (THC), gases orgánicos totales (TOG), gases orgánicos distintos del metano (NMOG), hidrocarburos no metánicos (NMHC) o compuestos orgánicos volátiles (VOC). El material particulado puede informarse MP₁₀ o MP_{2.5}. El modelo también estima las emisiones de HC sin escape para varios modos: derrames diurnos, de reabastecimiento de combustible, desplazamiento de vapor, remojo en caliente, pérdida de funcionamiento, permeación del tanque, permeabilidad de la manguera y emisiones del cárter. Todas las emisiones se informan como toneladas cortas (es decir, 2000 lbs).

Para estimar de manera correcta las emisiones de MMFR, se actualizan periódicamente documentos que entregan las variables utilizadas en el modelo. Estos documentos son conocidos por el nombre de reportes técnicos (Technical Reports).

1.2 Antecedentes Nacionales.

En esta sección se presentan los reportes oficiales solicitados por el ministerio del medio ambiente y una memoria relacionada con las emisiones de maquinarias mineras, un rubro de las MMFR.

1.2.1 Primer Acercamiento a las MMFR en Chile. [3]

Este documento fue realizado para el ministerio del medio ambiente y tiene como objetivo realizar un diagnóstico del estado actual de la venta de maquinaria fuera de ruta a nivel nacional y del parque en uso para la industria de la construcción en la RM, que considere: caracterización de la flota, usos, nivel de actividad, potencias medias, marca-modelo, entre otros parámetros. Complementariamente, desarrollar el inventario de emisiones atmosféricas para la Región Metropolitana, considerando el segmento de maquinaria de construcción, para una base temporal correspondiente al año 2013.

Para llevar a cabo este estudio se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica sobre maquinaria fuera de ruta.
- Recopilación de estadísticas de importaciones y sectoriales de actividad.
- Desarrollo de encuestas a usuarios y distribuidores de maquinaria.
- Visitas a obras en construcción.
- Modelación de las emisiones para el rubro de la construcción en la RM.
- Validación del inventario de emisiones a través de estadísticas nacionales e internacionales.
- Análisis regulatorio sobre maquinaria fuera de ruta y propuestas normativas.

Con la información obtenida en los antecedentes internacionales se revisaron dos metodologías para realizar el inventario de emisiones: EPA y Corinair. Además, se procedió a realizar una caracterización de la tipología, para así conocer la maquinaria fuera de ruta existente en cada rubro (agrícola, minería, construcción, etc.), los rangos de potencia que están normados internacionalmente y los límites aplicables a cada uno de estos.

Las principales legislaciones internacionales (EPA y EURO) se encuentran bastante homologadas entre sí, tanto en lo que respecta a rangos de potencia normados, límites de

emisión y ciclos de medición. Con lo anterior se hace posible exigir indistintamente cualquiera de las dos legislaciones con similar nivel de exigencia.

Conocida la tipología y normativas internacionales, se realizó una recopilación de información, a partir de estadísticas nacionales (INE, Aduanas, RCA, CChc y plantas de revisión técnica). La principal fuente de información de referencia fueron las importaciones de equipos entre el 2000 y 2012. Los resultados obtenidos para la estimación de equipos del parque a nivel nacional al año 2012, es la siguiente:

Tabla 1-1. Cantidad de equipos a nivel nacional. [3]

Maquinaria	Rubros	Cantidad Nacional 2013	Maquinaria	Rubros	Cantidad Nacional 2013
Tractor	Agrícola	26830	Dumper	Construcción	71
Cosechadora	Agrícola	2334	Zanjadora	Construcción	28
Plataforma Telescópica	Agrícola	2016	Tractor	Forestal	641
Desmalezador	Agrícola	1550	Cargador de Troncos	Forestal	470
Sembradora	Agrícola	1452	Arrastrador de Tronco	Forestal	122
Máquina Vendimiadora	Agrícola	249	Grúa Telescópica	Forestal	60
Recolector Agrícola	Agrícola	238	Rodillo	Forestal	2
Sacudidor	Agrícola	80	Grúa Horquilla	Industrial	6686
Trilladora	Agrícola	34	Plataforma Telescópica	Industrial	803
Deshojadora	Agrícola	31	Cargador Frontal	Industrial	735
Zanjadora	Agrícola	24	Manipulador	Industrial	372
Retroexcavadora	Construcción	8758	Rodillo	Industrial	55
Cargador Frontal	Construcción	5078	Grúa Telescópica	Industrial	38
Excavadora	Construcción	4924	Minicargador	Minería	748
Minicargador	Construcción	4608	Perforador	Minería	2407
Rodillo	Construcción	2849	Camión Tolva	Minería	1979
Perforador	Construcción	2418	Retroexcavadora	Minería	1860
Plataforma Telescópica	Construcción	2160	Excavadora	Minería	1364
Camión Tolva	Construcción	1306	Cargador Frontal	Minería	1099
Bulldozer	Construcción	1242	Grúa Horquilla	Minería	444
Grúa Horquilla	Construcción	1236	Bulldozer	Minería	349
Motoniveladora	Construcción	1219	Motoniveladora	Minería	333
Manipulador	Construcción	1082	Máq. para hacer Túneles	Minería	304
Miniexcavadora	Construcción	416	Dumper	Minería	291
Asfaltadora	Construcción	236	Rodillo	Minería	15
Grúa Telescópica	Construcción	215	Zanjadora	Minería	7
Tiendetubo	Construcción	144	Total		94123
Máq. para hacer Túneles	Construcción	114			

Para recabar información de la maquinaria de construcción existente en la Región Metropolitana, se realizaron distintas encuestas: encuesta a las constructoras, encuesta a los distribuidores, visitas a terreno y se revisaron cerca de 100 resoluciones de calificación

Ambiental en el servicio de evaluación ambiental con el propósito de conocer el nivel de actividad, potencia y una estimación del parque existente de maquinaria fuera de ruta.

Los datos recopilados fueron comparados con la información internacional, obteniéndose escenarios o rangos en los que oscila la potencia y el nivel de actividad, los resultados son los siguientes:

Tabla 1-2. Nivel de Actividad en horas/año, para la MMFR de construcción en la RM de Santiago año 2013. [3]

Maquinaria	CORINAIR	CORINAIR + Terreno	CORINAIR + Distribuidores	CORINAIR + Terreno + Distribuidores
Retroexcavadora	1200	1600	1200	1600
Rodillo Compactador	600	600	600	600
Excavadora	1200	1200	1888	1888
Cargador	1200	1200	2442	2442
Minicargador	700	2209	700	2209
Perforador	700	700	700	700
Motoniveladora	700	700	700	700
Grúa Horquilla	700	700	700	700
Grúa Telescópica	700	700	700	700
Bulldozer	1100	1100	1100	1100
Miniexcavadora	1200	1200	1200	1200
Asfaltadora	700	700	700	700
Manipulador Telescópico	1000	1000	1000	1000
Plataforma Telescópica	925	925	925	925
Tiendetubo	700	700	700	700
Zanjadora	593	593	593	593
Máq. para hacer Túneles	700	700	700	700

Utilizando la información recopilada en las distintas secciones, se presenta una estimación del parque de la maquinaria fuera de ruta utilizada en el rubro de la construcción para la Región Metropolitana a partir de la información de Aduanas, la cual fue validada a través de los distribuidores. Los resultados son los siguientes:

Tabla 1-3. Cantidad de MMFR de construcción por tipología en la RM de Santiago, a partir de información de Aduanas. [3]

Maquinaria	Cantidad 2013
Retroexcavadora	4466
Excavadora	4466
Cargador Frontal	2590
Minicargador	2350
Rodillo	1453
Perforadora	1233
Plataforma Telescópica	1101
Bulldozer	634
Grúa Horquilla	630
Motoniveladora	622
Manipulador	552
Miniexcavadora	212
Asfaltadora	120
Grúa Telescópica	110
Tiendetubo	73
Máq. para hacer Túneles	58
Zanjadora	14
Total RM 2013	20686

Con la información recopilada anteriormente se procede a modelar el inventario de emisiones, para esto existen metodologías de cálculo para las emisiones provenientes de la maquinaria fuera de ruta, tanto en Europa (CORINAIR), como en Estados Unidos (EPA).

Ambos modelos obedecen a un enfoque Bottom-Up, que comienza con niveles de actividad desagregados por cada maquinaria y los integra a nivel de la flota y según tecnología y rangos de potencia. Al momento del presente informe se cuenta con estimaciones para la mayoría de las variables requeridas para este enfoque, según se ha expuesto anteriormente.

La información entregada por PRT según año modelo de la maquinaria de construcción nos indica que existe un 15% de maquinaria anterior al año 2000, que Aduanas no considera.

El 15% de maquinaria no considerada corresponde aproximadamente a 3102 maquinarias.

Finalmente, si consideramos esta maquinaria no catastrada en las importaciones, podemos llegar a un valor final estimado que puede situarse entre el valor estimado sin maquinaria anterior al 2000 y el valor que incluya la estimación de maquinaria faltante anterior al 2000.

Tabla 1-4. Estimación de emisiones contaminantes máxima (considerando la MMFR anterior al año 2000) y mínima (sin considerar la MMFR anterior al año 2000) para MMFR de construcción. [3]

	NO_x [Ton]	VOC [Ton]	CO [Ton]	MP₁₀ [Ton]	MP_{2,5} [Ton]	CO₂ [Ton]	SO₂ [Ton]	FC [m ³]
Mínimo	5244	1002	5423	568	534	681638	6	252564
Máximo	6849	1269	6254	793	745	782496	7	290702

1.2.2 Emisiones MMFR Año Base 2013. [4]

El presente documento corresponde a un estudio desarrollado a solicitud del Ministerio del Medio Ambiente. En este documento se llevan a cabo los siguientes objetivos:

- Sistematización de información y depuración de bases de datos y estadísticas.
- Resultados de definición de línea base considerando las variables internacionales.
- Caracterización de opciones tecnológicas disponibles.
- Evaluación de los costos incrementales de la actualización tecnológica.
- Diseño de encuestas y/o entrevistas a importadores.
- Comparación línea base con escenarios propuestos.

En este documento se presenta la recopilación bibliográfica de las principales legislaciones internacionales (EPA y EURO). Al analizar dichas normativas, se observó que ambas se encuentran bastante homologadas entre sí, tanto en los rangos de potencia normados, límites de emisión y ciclos de medición.

Además, como parte de la bibliografía internacional analizada, se presentan los niveles normativos de Brasil y China, considerando su participación en las importaciones de este tipo de maquinaria.

Finalmente, como parte de la recopilación bibliográfica, se presentan las diferentes tecnologías de motores por normativa para el control de emisiones.

Para elaborar la línea base de emisiones a nivel nacional, es necesario caracterizar las maquinarias existentes. Para obtener esta información se realizó una depuración de las bases de datos de Aduanas entre los años 2000-2013, con el objetivo de conocer características de la flota, esenciales para el desarrollo de este estudio, tales como: cantidad, potencia, tipo de combustible, rubro, etc. Así se obtuvo un total de 107.797 MMFR importada entre los años 2000-2013, que se ajusta a la definición de referencia.

Para poder estimar la cantidad de máquinas anteriores al año 2000, se utiliza la base de datos de PRT entre los años 2010-2013, con la cual se determinarán los porcentajes de maquinaria que todavía están en funcionamiento. Para ello se utilizarán los equipos que

cumplen con la definición de MMFR. Así se determinó la existencia de 21.069 máquinas con edad anteriores al año 2000.

Entre las metodologías para el cálculo de emisiones, se examinaron las dos más relevantes:

1) Modelo EPA

2) Modelo CORINAIR.

Para la elaboración de la línea base de emisiones 2013, se llegó a la conclusión de usar el factor de emisión CORINAIR, aplicando el modelo EPA de estimación de emisiones.

Finalmente, consolidando los resultados obtenidos y retirando la maquinaria que cumplió su ciclo de vida, conforme modelo EPA de chatarrización, se obtuvo el siguiente total de MMFR para el año 2013:

Tabla 1-5. Número de MMFR por tipología y rubro año 2013. [4]

Rubro	Tipología	Cantidad	Rubro	Tipología	Cantidad
Agrícola-Forestal	Bulldozer	3	Industrial	Barredora	33
	Camión Fuera de Ruta	4		Cargador Frontal	272
	Cargador de Troncos	422		Excavadora	4
	Cargador Frontal	61		Grúa Horquilla	4037
	Cosechadora	4209		Grúa Telescópica	285
	Excavadora	38		Manipulador	481
	Grúa Horquilla	97		Minicargador	11
	Grúa Telescópica	83		Plataforma Telescópica	6490
	Minicargador	18		Quitanieve	68
	Miniexcavadora	2		Retroexcavadora	7
	Otros Equipos Agrícolas	2720		Rodillo	34
	Plataforma Telescópica	22		Tractor	1
	Retroexcavadora	23			
	Rodillo	6			
	Tractor Agrícola	38409			
Construcción	Asfaltadora	256	Minería	Bulldozer	201
	Bulldozer	1511		Camión Fuera de Ruta	715
	Camión Fuera de Ruta	353		Cargador Frontal	2378
	Cargador Frontal	5255		Dumper	9
	Dumper	48		Excavadora	2894
	Excavadora	6007		Grúa Horquilla	224
	Grúa Horquilla	922		Grúa Telescópica	19
	Grúa Telescópica	816		Manipulador	284
	Manipulador	998		Minicargador	1026
	Minicargador	6935		Miniexcavadora	33
	Miniexcavadora	315		Motoniveladora	266
	Motoniveladora	1398		Otros Equipos en Minas Sub.	355
	Otros Equipos de Construcción	160		Perforador	2665
	Otros Equipos en Minas Sub.	122		Plataforma Telescópica	162
	Perforador	1883		Quitanieve	2
	Plataforma Telescópica	2976		Retroexcavadora	2400
	Retroexcavadora	12485		Rodillo	43
	Rodillo	3421		Tractor	7
	Tractor	9		Zanjadora	10
				Total	117403

Los resultados obtenidos en este estudio (a nivel de emisiones) para el año son dos: 1) considerando la flota sólo de Aduanas y 2) considerando la flota de Aduanas más la estimación de maquinarias anterior al 2000, estos resultados son comparados con la información reportada en el RETC (Registro de emisiones y transferencia de

contaminantes) a nivel nacional, proveniente de todas las fuentes contaminantes (móviles y fijas)².

Tabla 1-6. Emisiones de los distintos contaminantes para los distintos escenarios estudiados.

	COV [Ton]	CO [Ton]	NO _x [Ton]	MP ₁₀ [Ton]	MP _{2,5} [Ton]	CO ₂ [Ton]	SO ₂ [Ton]
MMFR 2013 Aduanas	4890,90	22647,04	30324,67	3313,66	3214,25	3029626,00	92,83
MMFR 2013 Aduanas + Estimadas <2000	5982,68	26286,37	36857,67	4387,73	4256,10	3416971,60	104,70
Fuentes Móviles (RETC 2012)	30473,28	372881,05	83471,14	1121,14	1115,07	6964568,02	110,71

1.2.3 Emisiones de Contaminantes Provenientes de Maquinaria Pesada en Faenas Mineras Ubicadas en la Cordillera de los Andes. [5]

Este documento corresponde a una memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico de una estudiante de la Universidad Técnica Federico Santa María, que tiene como objetivo principal determinar la emisión de contaminantes producidos por maquinaria pesada en faenas mineras ubicadas en la Cordillera de los Andes. Dada la importancia del sector minero en la actividad productiva nacional, surge la necesidad de realizar un catastro real de emisiones que se producen en las mineras, la cual emite de variadas maneras: fundiciones, perforaciones, tronaduras y transporte, acopio de material y gases de escape provenientes de maquinaria pesada. Esta última es un área que carece de estudios relacionados con el tema y además no existe una regulación vigente de límite de emisión hasta el momento.

La maquinaria móvil fuera de ruta, en especial aquella utilizada en el rubro de la minería, utiliza mayoritariamente diésel como combustible, por lo que genera emisiones de contaminantes atmosféricos como por ejemplo óxidos nitrosos y material particulado en sus modalidades fino y ultrafino, los cuales generan efectos adversos en salud que impactan en forma directa a los habitantes de los centros urbanos con mayor densidad de población.

El objetivo de estimar las emisiones que surgen en la cordillera es entender que cantidad de contaminantes, principalmente material particulado, se está depositando en la nieve lo que contribuye al cambio climático aumentando la temperatura de los hielos.

Para el desarrollo de este trabajo se comenzó realizando un levantamiento de información sobre las faenas mineras ubicadas en la cordillera (fuente: Lo Castillo SA, 2016) y la maquinaria pesada utilizada en ellas (fuente: Ritchiespecs, 2007-2017). Posteriormente, se determinaron los factores de emisión de contaminantes para los distintos tipos de maquinaria pesada, para lo cual se utilizó la base de datos “NONROAD-EPA” que entrega la información de una gran cantidad de marcas reconocidas que comercializan maquinarias fuera de ruta y, a su vez, se utilizaron las normativas Tier que fijan los valores límites máximos de emisiones contaminantes permitidos por los motores fuera de ruta al momento de ser comercializados (dependiendo de su potencia nominal). Los factores de carga y

² Se consideran solo las emisiones provenientes del tubo de escape de los vehículos y partidas en frío.

niveles de actividad de las distintas máquinas fueron extraídos del reporte “Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”, realizado para el ministerio del medio ambiente el año 2014. Finalmente, habiendo recopilado los datos anteriormente señalados es posible estimar las emisiones contaminantes utilizando la metodología EPA definida en el documento “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling-Compression-Ignition” (EPA, 2004), donde la metodología se expresa en la siguiente ecuación:

$$E_i = N \cdot NA \cdot P \cdot 0,7456 \cdot FC \cdot FE$$

Dónde:

E_i : Emisiones del contaminante i durante el período, en [g].

N : Población (unidades).

NA : Nivel de Actividad (horas de uso en el período) [h].

P : Potencia nominal promedio [hp]. El factor 0,7456 es para convertir a kW.

FC : Factor de carga típica, representa la fracción de la potencia a la que se opera típicamente la máquina.

FE : Factor de emisión [g/kW h].

Los principales resultados se presentan a continuación:

Tabla 1-7. Emisiones contaminantes por cada faena minera ubicada en la Cordillera de Los Andes 2014. [5]

Faena	Región	Emisiones Ton/año			
		CO	NO _x	MP	CO ₂
Quebrada Blanca	I	164	1021	22	120708
Cerro Colorado	I	352	2030	48	223974
Collahuasi	I	1564	6271	207	578976
Gabriela Mistral	II	167	794	16	109124
Chuquicamata	II	1556	8313	168	810836
R. Tomic	II	1360	5963	173	680599
Escondida	II	1644	12343	154	1188550
El Abra	II	867	2769	129	190410
Salvador	III	245	803	38	52963
Los Pelambres	IV	330	2915	23	267160
Andina	V	322	1575	34	208257
Los Bronces	RM	552	3232	61	298277
El Teniente	VI	126	525	21	60975
Total		9252	48555	1096	4790809

1.3 Normativa Nacional

En esta última sección del estado del arte se presentan las normativas nacionales vigentes o en proceso de revisión.

1.3.1 Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental en la RM: Acuerdo N°13/2016. [6]

El Acuerdo N°13/2016, corresponde a un Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica que regirá en la Región Metropolitana de Santiago que tiene por objetivo dar cumplimiento a las normas primarias de calidad ambiental de aire vigentes, asociados a los contaminantes Material Particulado Respirable (MP₁₀), Material Particulado Fino Respirable (MP_{2.5}), Ozono (O₃), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Dióxido de Azufre (SO₂), en un plazo de 10 años.

Mediante el D.S. N°67, de 2014, del Ministerio del Medio Ambiente, se declaró Zona Saturada por MP_{2.5} a la Región Metropolitana de Santiago. Según lo establecido en el Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación, se dio inicio a la elaboración del anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférico por MP_{2.5}, como concentración de 24 horas, para la Región Metropolitana de Santiago, mediante la Resolución Exenta N°1171, de 2014, del Ministerio del Medio Ambiente.

Asimismo, mediante la Resolución Exenta N°218, de 2015, del Ministerio del Medio Ambiente, se da inicio al proceso de revisión, reformulación y actualización del D.S. N°66, de 2009, de MINSEGPRES, y se ordenó acumularlo con el proceso de elaboración del Plan de Descontaminación Atmosférica por MP_{2.5}, los que continúan como un solo procedimiento.

En el “CAPÍTULO III: FUENTES MÓVILES”, se hace referencia en el apartado III.5 a la MMFR.

En el Artículo 18 se menciona que, a partir del año 2020, el Ministerio de Obras Públicas, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el Ministerio de Salud y otros Órganos de la Administración del Estado cuando ejecuten obras de construcción, directamente o a través de terceros, en la Región Metropolitana de Santiago, deberán establecer en las Bases Administrativas, Términos de Referencia y/o contratos, la obligación de usar filtros de partículas cerrados para el total de la MMFR de construcción que tenga una potencia superior a 56 kW e inferior a 560 kW. La obligación regirá para la maquinaria propia y la de terceros que ejecuten los proyectos de obras de construcción. La implementación, excepciones y fiscalización de la medida se definirán por reglamento dictado por el Ministerio del Medio Ambiente y por los otros organismos del Estado que ejecuten obras de construcción.

A su vez los Municipios podrán incluir esta exigencia en las bases administrativas, términos de referencia y/o contratos cuando ejecuten obras de construcción de manera directa y/o a través de terceros.

En el Artículo 19 se señala lo siguiente, la MMFR deberá cumplir en los plazos señalados en cada caso, los límites máximos de emisión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), hidrocarburos no metánicos (HCNM), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (MP), según la norma que el fabricante, armador, importador o sus representantes soliciten al momento de la certificación referida en el inciso final del presente artículo, conforme se indica en las siguientes tablas:

- a) A contar de enero del 2019, la maquinaria móvil fuera de ruta deberá cumplir con lo señalado en la siguiente Tabla 3-8.

Tabla 1-8. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]

Potencia [kW]	CO [g/kWh]	HCNM + NO _x [g/kWh]	MP [g/kWh]
130 ≤ P ≤ 560	3,5	4,0	0,2
75 ≤ P < 130	5,0	4,0	0,3
37 ≤ P < 75	5,0	4,7	0,4
19 ≤ P < 37	5,5	7,5	0,6

- b) A contar de enero del 2022, la MMFR deberá cumplir indistintamente, los niveles de emisión señalados en la Tabla 3-9 o la Tabla 3-10.

Tabla 1-9. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]

Potencia [kW]	CO [g/kWh]	HCNM [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HCNM + NO _x [g/kWh]	MP [g/kWh]
130 ≤ P ≤ 560	3,5	0,19	0,40	-	0,02
56 ≤ P < 130	5,0	0,19	0,40	-	0,02
37 ≤ P < 56	5,0	-	-	4,7	0,03
19 ≤ P < 37	5,5	-	-	4,7	0,03

Tabla 1-10. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh).[6]

Potencia [kW]	CO [g/kWh]	HCNM [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HCNM + NO _x [g/kWh]	MP [g/kWh]
130 ≤ P ≤ 560	3,5	0,19	0,40	-	0,025
75 ≤ P < 130	5,0	0,19	0,40	-	0,025
56 ≤ P < 75	5,0	0,19	0,40	-	0,025
37 ≤ P < 56	5,0	-	-	4,7	0,025
19 ≤ P < 37	5,5	-	-	7,5	0,600

Los fabricantes de MMFR o sus representantes legales en Chile, distribuidores o importadores, deberán acreditar mediante un certificado de origen ante la Superintendencia

del Medio Ambiente, que el tipo o familia de motor de la maquinaria nueva cumple con lo exigido en la Tabla 3-8, la Tabla 3-9 o la Tabla 3-10.

Tabla 3-10 según corresponda, de acuerdo al método de prueba en laboratorio ISO 8178: *Motores de combustión interna. Medición de las emisiones de gases de escape. Parte 1: Medición de las emisiones de gas y de partículas en banco de ensayo.*

Se entenderá por MMFR nueva, aquella que ingresa al país o es fabricada en Chile después de las fechas señaladas en las letras A y B, en cada caso. Corresponderá a los fabricantes de MMFR o sus representantes legales en Chile, distribuidores o importadores acreditar lo anterior.

1.3.2 Anteproyecto de Norma de Emisión para Maquinaria Móvil Fuera de Ruta. [6]

Este Anteproyecto de Norma de Emisión para MMFR establece la exigencia de límites máximos de emisión para dicha maquinaria, equivalente a Stage IIIA o Tier3, a partir del año 2019, y Stage 5 o Tier 4, a partir del 2022. Lo anterior se pretende aplicar debido a que es necesario garantizar un nivel de protección óptimo a las personas que trabajan, habitan o transitan en las proximidades de las máquinas móviles y mantener lo más baja posible la exposición acumulativa a las personas mencionadas en las proximidades de varias máquinas y equipos móviles diferentes. Para tal efecto, debe utilizarse la mejor tecnología disponible en la actualidad a fin de reducir al mínimo las emisiones.

El Análisis General del Impacto Económico y Social del Anteproyecto fue realizado en base a un análisis costo beneficio que estimó indicadores económicos para dar luces de la conveniencia social del anteproyecto en estudio y los resultados indicaron que la razón beneficio-costado de la norma propuesta es superior a 1 y es favorable para el país.

Esta norma estará dirigida a todo el país.

En el Artículo 1, se define una MMFR tal como fue descrita previamente en este trabajo.

El Artículo 2 señala lo mismo que el Artículo 19 del Acuerdo N°13/2016 descrito previamente, presentándose solamente 2 diferencias. En primer lugar, este anteproyecto no es exclusivo para la Región Metropolitana de Santiago y, en segundo lugar, la Tabla 3-10 presenta ciertas variaciones que son presentadas a continuación en la Tabla 3-11:

Tabla 1-11. Límites máximos de emisión provenientes del sistema de escape en gramos por kilowatt hora (g/kWh). [6]

Potencia [kW]	CO [g/kWh]	HCNM [g/kWh]	NOx [g/kWh]	HCNM + NOx [g/kWh]	MP [g/kWh]	PN [1/kWh]
130 ≤ P ≤ 560	3,5	0,19	0,40	-	0,015	1x10 ¹²
75 ≤ P < 130	5,0	0,19	0,40	-	0,015	1x10 ¹²
56 ≤ P < 75	5,0	0,19	0,40	-	0,015	1x10 ¹²
37 ≤ P < 56	5,0	-	-	4,7	0,015	1x10 ¹²
19 ≤ P < 37	5,0	-	-	4,7	0,015	1x10 ¹²

2 Capítulo 2 – Metodología

Este capítulo presenta tres subcapítulos que indican la metodología de los objetivos específicos. En primer lugar, se presenta el nivel de actividad, posteriormente los factores de emisión y, finalmente, la metodología internacional utilizada para el cálculo de emisiones del sector.

2.1 Nivel de Actividad

El nivel de actividad corresponde a la cantidad y tipo de maquinarias existentes, además de cómo y cuánto tiempo operan al año.

Los documentos que se utilizan en este capítulo se detallan a continuación:

- Anexo, Arancel Aduanero Chileno. [7]
- NONROAD2005 User's Guide (EPA). [2]
- NONROAD 2008a Technical Reports (EPA). [8]
 - Conversion Factors for Hydrocarbon Emission Components, NR-002d.
 - Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling, NR-005d.
 - Nonroad Engine Population Estimates, NR-006e.
 - Calculation of Age Distributions in the Nonroad Model: Growth and Scrappage, NR-007c.
 - Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling Compression-Ignition, NR-009d.
- Emission Standards for Nonroad Engines and Vehicles (EPA, 2016). [9]
- 1.A.4 Non road mobile machinery 2016, update May 2017 (EEA). [1]
- 1.A.4 Non-road mobile sources - machinery (Guide Book 2013, EEA) [10]

2.1.1 Cantidad y Tipología de Maquinarias

Considerando que Chile no fabrica motores ni MMFR, se utilizó el *Registro de Comercio Exterior de Aduanas* [11] (más específicamente las bases de datos de las importaciones), con el fin de obtener información correspondiente a la cantidad y tipo de maquinarias ingresadas al país entre los años 2014 y 2017³. Dichas bases de datos pueden entregar: rango de potencia de operación, tipo de combustible, rubro en el cual se desempeña, etc.

Se utilizan los siguientes criterios para depurar la base de datos:

- En primer lugar, con ayuda del documento “*Anexo, Arancel Aduanero Chileno*” se seleccionan los aranceles (código numérico que identifica a un objeto

³ Para realizar los análisis estadísticos de mejor manera, se utilizaron las bases de datos de aduanas entre los años 2013 y 2017.

comercializado) que tengan relación con la definición de MMFR entregada por el ministerio del medio ambiente en sus documentos oficiales.

- Luego, se filtran las bases de datos con dichos aranceles para obtener la cantidad total (por año) de maquinarias de cada tipo ingresadas al país.
- Posteriormente, para eliminar datos atípicos, se calcula el coeficiente de variación (CV) para cada maquinaria utilizando como muestra las cantidades totales de maquinarias importadas por año. El coeficiente de variación indica el nivel de dispersión de una muestra con respecto a otra y se calcula como:

$$CV = \frac{\bar{x}}{s}$$

Donde \bar{x} corresponde a la media aritmética y s a la desviación estándar de la muestra.

Inicialmente se seleccionan las maquinarias que presenten $CV > 1$, ya que estas son muestras muy dispersas. Aquellas maquinarias que presenten registro de importaciones solo en uno de los años estudiados el CV no es representativo, y será analizado el único año en el cuál se tenga registro. Para el resto de materiales con $CV > 1$, se analiza el año que tenga la cantidad total de maquinarias más alejada del promedio.

Para seleccionar las importaciones atípicas se utilizará un método apropiado considerando la naturaleza de las muestras.

- A las maquinarias que se les quiten datos atípicos con este criterio, posteriormente habrá que repetir el proceso anterior para ver si algún otro año posee valores atípicos.
- Finalmente, se extraen las importaciones que presenten parte decimal, debido a que las maquinarias se miden en unidades y claramente estos datos son erróneos.

Para poder relacionar las maquinarias depuradas de las bases de datos de aduanas con la información proporcionada por la EPA y la EEA, es necesario homologar las tipologías nacionales con las internacionales. En el **ANEXO I**, se presenta una tabla que relaciona las tipologías nacionales (“Descripción Aduanas”) con las internacionales (“Homologación EPA”).

2.1.2 Horas Anuales en Operación y Factor de Carga

Los factores de carga reportados por la EPA son obtenidos a partir de pruebas reales del motor durante varios ciclos transitorios, y son agrupados en 3 categorías: alto, bajo y estado estable (promedio). Dado el número limitado de ciclos diseñados para representar la operación de los distintos tipos de maquinarias y la incertidumbre al extrapolar los datos de prueba a poblaciones de equipos más amplias se considera que este enfoque es más simple y defendible. Este enfoque también es consistente con el utilizado para desarrollar los factores de ajuste transitorios en el modelo.

A continuación, se presenta el nivel de actividad y el factor de carga para las maquinarias relevantes para este trabajo, obtenidas del documento “*Median Life, Annual Activity, and*

Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling (EPA, NONROAD2008a Technical Reports)”.

Tabla 2-1. Factor de carga y horas anuales de operación (Elaboración propia a partir de [8]).

Maquinaria	FC	HRS x AÑO
Bulldozer	0,59	899
Camión Fuera de Carretera	0,59	1641
Cargador Frontal	0,59	761
Compactador de Rodillo	0,59	760
Cosechadora-Trilladora ⁴	0,59	150
Dumper	0,21	566
Excavadora	0,59	1092
Grúa	0,43	990
Grúa horquilla	0,59	1700
Minicargador	0,21	818
Motoniveladora	0,59	962
Otros Equipos Agrícolas	0,59	381
Otros Equipos de Construcción	0,59	606
Otros Equipos Mineros Subterráneos	0,21	1533
Perforadora	0,43	466
Quitanieve	0,43	400
Scrapers	0,59	914
Tractor de Oruga	0,59	936
Tractor Agrícola	0,59	475
Tractor Fuera de Carretera	0,59	855
Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	0,21	1135
Zanjadora	0,59	593

2.1.3 Potencia Nominal

Para identificar las potencias nominales de los distintos tipos de MMFR, se utilizan los siguientes criterios:

- En primer lugar, se comienza revisando las bases de datos de aduanas. Si existe un rango de potencias en la descripción de las maquinarias, la potencia nominal corresponderá al promedio entre el límite máximo y mínimo.
- Para las restantes maquinarias agrícolas, se le solicita información a experto en maquinaria agrícola.
- Adicionalmente, la EPA y la EEA entregan información sobre las potencias de las maquinarias en los documentos “Nonroad Engine Population Estimates, NR-006e” y “1.A.4 Non road mobile machinery 2016”, respectivamente.
- Finalmente, si quedan maquinarias sin identificar su potencia nominal, se utilizan los sitios web de “CAT” [12] (para maquinarias mineras y de construcción) y de “John Deere” [13] (para maquinarias agrícolas).

⁴ En los documentos de la EPA se le conoce como “Combines”, debido a que siega, trilla y limpia (o sea cosecha) los productos de los principales cultivos.

2.1.4 Tipo de Tecnología

Para la asignación del tipo de tecnología a las MMFR estudiadas, es necesario conocer el retraso tecnológico con el cuál las importaciones llegan a Chile con respecto al calendario normativo correspondiente al país de origen.

Las normas de emisión de los diferentes países se encuentran recopiladas y actualizadas en el sitio web “Dieselnet”. [14]

Para definir el origen de las importaciones se utilizan las bases de datos de aduanas entre los años estudiados (2014 a 2017).

Adicionalmente, se presenta la homologación entre las principales tecnologías: norteamericana (EPA) y europea (EEA).

Tabla 2-2. Homologación Tier / Stage (Elaboración Propia).

EPA	EEA
Tier 1	Stage I
Tier 2	Stage II
Tier 3	Stage IIIA
Tier 4 Intermedia	Stage IIIB
Tier 4 Final	Stage IV

2.2 Factores de Emisión

Con respecto a los factores de emisión y el consumo de específico de combustible en estado estacionario de equipos nuevos, se cuenta con las tablas entregadas por la EPA (“*Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression Ignition (NONROAD2008a Technical Reports)*”) y por la EEA (“*1.A.4 Non road mobile machinery 2016*”).

Tabla 2-3. Factores de emisión y consumo específico de combustible en función de la potencia nominal y la tecnología de la maquinaria (Elaboración propia a partir de [8]).

Potencia (kW)	Tecnología	BSFC (g/kWh)	Factores de Emisión (g/kWh)			
			HC	CO	NO _x	MP
19 ≤ P < 37	Tier 0	248,18	2,4138	6,7051	9,2531	1,0728
	Tier 1		0,3740	2,0548	6,3402	0,4545
	Tier 2		0,3740	2,0548	6,3402	0,4545
	Tier 4 ^a		0,3740	2,0548	6,3402	0,2682
	Tier 4		0,1762	0,2052	4,0231	0,0247
37 ≤ P < 56	Tier 0	248,18	1,3276	4,6802	9,2531	0,9682
	Tier 1		0,6991	3,1722	7,5081	0,6343
	Tier 2		0,4924	3,1722	6,3028	0,3218
	Tier 4 ^a		0,2462	3,1722	4,0231	0,2682
	Tier 4		0,1762	0,3178	4,0231	0,0247
56 ≤ P < 75	Tier 0	248,18	1,3276	4,6802	9,2531	0,9682
	Tier 1		0,6991	3,1722	7,5081	0,6343
	Tier 2		0,4924	3,1722	6,3028	0,3218
	Tier 3B		0,2462	3,1722	4,0231	0,2682
	Tier 4		0,1762	0,3178	4,0231	0,0123
	Tier 4N		0,1762	0,3178	0,3701	0,0123
75 ≤ P < 130	Tier 0	223,24	0,9119	3,6208	11,2378	0,5391
	Tier 1		0,4538	1,1623	7,5799	0,3754
	Tier 2		0,4538	1,1623	5,4982	0,2414
	Tier 3		0,2462	1,1623	3,3526	0,2950
	Tier 4		0,1762	0,1167	3,3526	0,0123
	Tier 4N		0,1762	0,1167	0,3701	0,0123
130 ≤ P < 225	Tier 0	223,24	0,9119	3,6208	11,2378	0,5391
	Tier 1		0,4137	1,0024	7,4791	0,3381
	Tier 2		0,4137	1,0024	5,3641	0,1765
	Tier 3		0,2462	1,0024	3,3526	0,2012
	Tier 4		0,1762	0,1006	3,3526	0,0123
	Tier 4N		0,1762	0,1006	0,3701	0,0123
225 ≤ P < 450	Tier 0	223,24	0,9119	3,6208	11,2378	0,5391
	Tier 1		0,2716	1,7514	8,0666	0,2693
	Tier 2		0,2238	1,1298	5,8135	0,1765
	Tier 3		0,2238	1,1298	3,3526	0,2012
	Tier 4		0,1762	0,1126	3,3526	0,0123
	Tier 4N		0,1762	0,1126	0,3701	0,0123
450 ≤ P < 560	Tier 0	223,24	0,9119	3,6208	11,2378	0,5391
	Tier 1		0,1975	1,7798	7,8068	0,2952
	Tier 2		0,2238	1,7798	5,4982	0,1765
	Tier 3		0,2238	1,7798	3,3526	0,2012
	Tier 4		0,1762	0,1784	3,3526	0,0123
	Tier 4N		0,1762	0,1784	0,3701	0,0123

Tabla 2-4. Factores de emisión y consumo específico de combustible en función de la potencia nominal y la tecnología de la maquinaria (Fuente: [1]).

Potencia (kW)	Tecnología	FC (g/kWh)	Factores de Emisión (g/kWh)			
			COV	CO	NO _x	MP
19 ≤ P < 37	Stage I	262	1,80	4,50	9,80	1,400
	Stage II		0,60	2,20	6,50	0,400
	Stage IIIA		0,60	2,20	6,08	0,400
	Stage V		0,42	2,20	3,81	0,015
37 ≤ P < 56	Stage I	260	0,60	2,20	7,70	0,400
	Stage II		0,40	2,20	5,50	0,200
	Stage IIIA		0,40	2,20	3,81	0,200
	Stage IIIB		0,28	2,20	3,81	0,025
56 ≤ P < 75	Stage V	260	0,28	2,20	3,81	0,015
	Stage I		0,60	2,20	7,70	0,400
	Stage II		0,40	2,20	5,50	0,200
	Stage IIIA		0,40	2,20	3,81	0,200
	Stage IIIB		0,28	2,20	2,97	0,025
	Stage IV		0,28	2,20	0,40	0,025
75 ≤ P < 130	Stage V	255	0,13	2,20	0,40	0,015
	Stage I		0,40	1,50	8,10	0,200
	Stage II		0,30	1,50	5,20	0,200
	Stage IIIA		0,30	1,50	3,24	0,200
	Stage IIIB		0,13	1,50	2,97	0,025
	Stage IV		0,13	1,50	0,40	0,025
130 ≤ P < 560	Stage V	250	0,13	1,50	0,40	0,015
	Stage I		0,30	1,50	7,60	0,200
	Stage II		0,30	1,50	5,20	0,100
	Stage IIIA		0,30	1,50	3,24	0,100
	Stage IIIB		0,13	1,50	1,80	0,025
	Stage IV		0,13	1,50	0,40	0,025

No todas las emisiones se miden para todos los motores, por lo que se necesita una conversión del tipo de medición más común a otras para proporcionar una estimación de estos otros contaminantes. La siguiente tabla fue elaborada a partir del documento “*Conversion Factors for Hydrocarbon Emission Components (NONROAD2008a Technical Reports, EPA)*” y entrega los factores de conversión para informar las emisiones de hidrocarburos en diferentes formas:

Tabla 2-5. Factores de conversión para los resultados de emisión de gases de hidrocarburos (Fuente: [8]).

Tipo de Motor	TOG/THC	NMOG/THC	NMHC/THC	VOC/THC
Diésel	1,07	1,054	0,984	1,053

2.3 Cálculo de Emisiones

Para el cálculo de emisiones se revisaron las metodologías más importantes. Por un lado, se tiene la metodología de la EPA (“NONROAD 2005 Model”) y, por otro, la metodología Tier 3 de la EEA (“EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016”). En esta nueva versión de la metodología europea se vuelven a presentar los mismos problemas (con respecto a la metodología de la EPA) que en su versión previa:

- El factor de deterioro utilizado por la EEA no depende del factor de carga y no tiene un valor máximo (crece indefinidamente).
- La EEA estima que la maquinaria se deja de utilizar cuando estas cumplen su respectiva vida útil esperada. En cambio, la EPA utiliza una curva de retiro que considera el nivel de actividad y el factor de carga de las maquinarias.
- La EPA, a diferencia de la EEA, realiza un ajuste en los factores de emisión del MP que consiste en considerar la variación en el contenido de azufre en el combustible comercial respecto del utilizado para la certificación (para calcular los factores de emisión de equipos nuevos).

Es por esto, que para este trabajo se utiliza la Metodología de la EPA. La ecuación principal para estimar las emisiones es la siguiente:

$$E_i = \sum_k N_k \cdot HRS_k \cdot P_k \cdot FC_k \cdot FE_{i,k} \quad (1)$$

Dónde:

E_i = Emisiones del contaminante i $\left[\frac{g}{año}\right]$.

N_k = Población de la maquinaria k [unidades].

HRS_k = Horas anuales de operación de la maquinaria k $\left[\frac{hrs}{año}\right]$.

P_k = Potencia nominal de la maquinaria k [kW].

FC_k = Factor de carga de la maquinaria k [-].

FE_i = Factor de emisión del contaminante i para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh}\right]$.

2.3.1 Factor de Emisión Ajustado

La metodología indica que, para el correcto cálculo de las emisiones contaminantes, es necesario considerar un ajuste en los factores de emisión por operación transiente y deterioro de los equipos (“Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression Ignition (EPA, NONROAD2008a Technical Reports”).

Para los contaminantes HC, CO y NO_x, el factor de emisión se calcula de la siguiente manera:

$$FE_{aj(i,k)} = FE_{EE(i,k)} \cdot FAT_{i,k} \cdot FD_{i,k} \quad (2)$$

Dónde:

$FE_{aj(i,k)}$ = Factor de emisión ajustado del contaminante i para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh}\right]$.

$FE_{EE(i,k)}$ = Factor de emisión en estado estacionario de equipo nuevo del contaminante i para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh}\right]$.

$FAT_{i,k}$ = Factor de ajuste transiente del contaminante i para la maquinaria k [-].

$FD_{i,k}$ = Factor de deterioro del motor del contaminante i para la maquinaria k [-].

En el caso del MP, es necesario realizar un ajuste por contenido de azufre en el combustible. La metodología utilizada indica que los resultados obtenidos a partir de las expresiones que se señalan a continuación y las tablas de factores de emisión en estado estacionario de equipos nuevos corresponden a MP₁₀, para calcular los valores respectivos para MP_{2,5} hay que multiplicar los resultados obtenidos por el factor 0,97. El factor de emisión para MP se calcula como:

$$FE_{aj(MP,k)} = FE_{EE(MP,k)} \cdot FAT_{MP,k} \cdot FD_{MP,k} - S_{aj(MP,k)} \quad (3)$$

Dónde:

$S_{aj(MP)}$ = Ajuste del MP por el contenido de azufre en el combustible para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh}\right]$.

Este ajuste se calcula con la siguiente expresión:

$$S_{aj(MP,k)} = BSFC_{aj(k)} \cdot 7,0 \cdot soxcnv \cdot 0,01 \cdot (soxbas - soxdsl) \quad (4)$$

Dónde:

$BSFC_{aj(k)}$ = Consumo de combustible específico del freno ajustado para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh}\right]$.

7,0 = Razón entre gramos de sulfato de MP y gramos de azufre en MP [-].

$soxcnv$ = Razón entre gramos de azufre en MP y gramos de azufre en combustible [-].

0,01 = Conversión de porcentaje a fracción [-].

$soxbas$ = Contenido de azufre en el combustible de la certificación [%].

$soxdsl$ = Contenido de azufre en el combustible comercial [%].

Para el $BSFC$, no existe deterioro, por lo que se ajusta de la siguiente forma:

$$BSFC_{aj(k)} = BSFC_{EE(k)} \cdot FAT_k \quad (5)$$

Dónde:

$BSFC_{EE(k)}$ = Consumo de combustible específico del freno en estado estacionario de equipo nuevo para la maquinaria k $\left[\frac{g}{kWh} \right]$.

El término $soxcnv$ representa la fracción de azufre del combustible diésel convertido a MP. Esto varía según el tipo de tecnología. Para los tipos de tecnología hasta Tier 4 intermedia, $soxcnv$ es igual a 0,02247. Para los motores Tier 4 y Tier 4N $soxcnv$ es igual a 0,30.

Los valores para el término $soxbas$ varían según el tipo de tecnología: hasta Tier 1, $soxbas = 0,33\%$; para Tier 2 y Tier 3, $soxbas = 0,2\%$; para Tier 4 intermedia, $soxbas = 0,005\%$; para Tier 4 final, $soxbas = 0,0015\%$.

Los factores de emisión para CO_2 y SO_2 se calculan en función del consumo de combustible específico del freno, por lo tanto, el modelo no requiere factores de emisión de CO_2 y SO_2 en estado estacionario para equipos nuevos. El carbono que se destina a las emisiones de HC, se resta como combustible no quemado. Las ecuaciones para calcular los factores de emisión de CO_2 y SO_2 se presentan a continuación:

$$FE_{aj(CO_2,k)} = (BSFC_{aj(k)} - FE_{aj(HC,k)}) \cdot 0,87 \cdot \left(\frac{44}{12} \right) \quad (6)$$

$$FE_{aj(SO_2,k)} = (BSFC_{aj(k)} \cdot (1 - soxcnv) - FE_{aj(HC,k)}) \cdot 0,01 \cdot soxdsl \cdot 2 \quad (7)$$

Dónde:

0,87 = Fracción de masa de carbono del diésel [-].

$\left(\frac{44}{12} \right)$ = Proporción de masa de CO_2 y masa de carbono [-].

0,01 = Conversión de porcentaje a fracción [-].

2 = Gramos de SO_2 formados a partir de un gramo de azufre [-].

Factor de Deterioro (FD): el factor de deterioro indica el incremento de las emisiones por el uso del motor (varía en función de la edad del motor). La siguiente ecuación se usa para calcular FD:

$$FD = 1 + A \cdot (\text{Factor Edad})^b \quad ; \text{para } (\text{Factor Edad}) \leq 1 \quad (8)$$

$$FD = 1 + A \quad ; \text{para } (\text{Factor Edad}) > 1 \quad (9)$$

Dónde:

Factor Edad = Fracción de la vida media gastada [–].

A = Factor de deterioro relativo (% de aumento / % de vida útil) [–].

b = Constante que indica la forma de la función de deterioro [–].

El deterioro se limita al final de la vida media de un motor (factor edad = 1), bajo la suposición de que un motor se deteriora hasta el punto en que cualquier aumento en el deterioro se ve compensado por el mantenimiento.

Para calcular el factor edad, utilizamos la siguiente ecuación:

$$\text{Factor Edad} = \frac{\text{Horas Acumuladas} \cdot FC}{\text{Vida Media a Plena Carga (hrs)}} \quad (10)$$

Debido a la falta de datos de deterioro para los motores de ignición por compresión fuera de carretera, los factores de deterioro relativo se basan en datos derivados de los motores de las carreteras.

La constante *A* se encuentra tabulada en los reportes del modelo NONROAD2008a de la EPA:

Tabla 2-6. Factor de deterioro relativo (A) para motores diésel fuera de carretera (Fuente: [8]).

Contaminante	Factor de Deterioro Relativo (A)		
	Tier 1	Tier 2	Tier 3+
HC	0,036	0,034	0,027
CO	0,101	0,101	0,151
NO _x	0,024	0,009	0,008
PM	0,473	0,473	0,473

Para motores de encendido por compresión, *b* siempre es igual a 1. Esto da como resultado un patrón de deterioro lineal, en el que la tasa de deterioro es constante a lo largo de la vida media de un motor.

Por otro lado, la vida media de los motores de MMFR de encendido por compresión, se obtuvo del documento “*Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling (EPA, NONROAD2008a Technical Reports)*”:

Tabla 2-7. Vida media en función de la potencia del motor (Fuente: [8]).

Potencia Nominal (kW)	Vida Media (hrs)
19 – 37	2500
37 – 225	4667
225 – 560	7000

Factor Ajustado Transiente (FAT): los motores fuera de carretera se prueban principalmente en estado estacionario. Sin embargo, la operación en estado estacionario (típicamente utilizada para las pruebas de emisión) no siempre es representativa para la operación que realizan los motores en muchas aplicaciones fuera de carretera. Algunas de las diferencias pueden deberse a la carga o la velocidad del motor, y otras diferencias pueden deberse a las demandas transitorias. Los FAT se aplican a los factores de emisión hasta Tier 3. Los FAT no se aplican a los factores de emisión para los motores Tier 4 (es decir, el modelo aplica un $FAT = 1$).

El FAT se calcula como la relación entre el factor de emisión transitoria y el correspondiente factor de emisión de estado estacionario.

En el **ANEXO II**, se presentan los factores de ajuste transitorio (FAT) por tipo de equipo para motores de ignición por compresión.

2.3.2 Eliminación de Equipos Viejos (Chatarrización)

El término chatarrización se entenderá como el proceso de retirar los equipos definitivamente de la flota de maquinarias, es decir, aquellos equipos ya no contribuyen a las emisiones o al consumo de combustible. Esto puede deberse al envejecimiento del motor o a alguna otra parte del equipo que se está rompiendo.

El modelo NONROAD utiliza una curva de chatarrización para determinar la proporción de equipos que se han eliminado en función de la antigüedad del equipo. El modelo de chatarrización de la EPA muestra que la mitad de las unidades vendidas en un año determinado se descartarán cuando esas unidades alcancen su vida útil, y todas las unidades se eliminarán cuando se alcance el doble de la vida útil. Este modelo se obtuvo del documento “*Calculation of Age Distributions in the Nonroad Model: Growth and Scrappage (EPA, NONROAD2008a Technical Reports)*” e indica que la vida útil de cada MMFR se puede calcular de la siguiente forma:

$$Vida \acute{U}til = \frac{Vida \text{ Media a Carga Completa (hrs)}}{Horas \text{ Anuales de Operación} \cdot FC} \quad (11)$$

A continuación, se muestra visualmente cómo se comporta la flota de maquinarias desde que son adquiridos hasta que cumplen 2 veces con su vida útil:

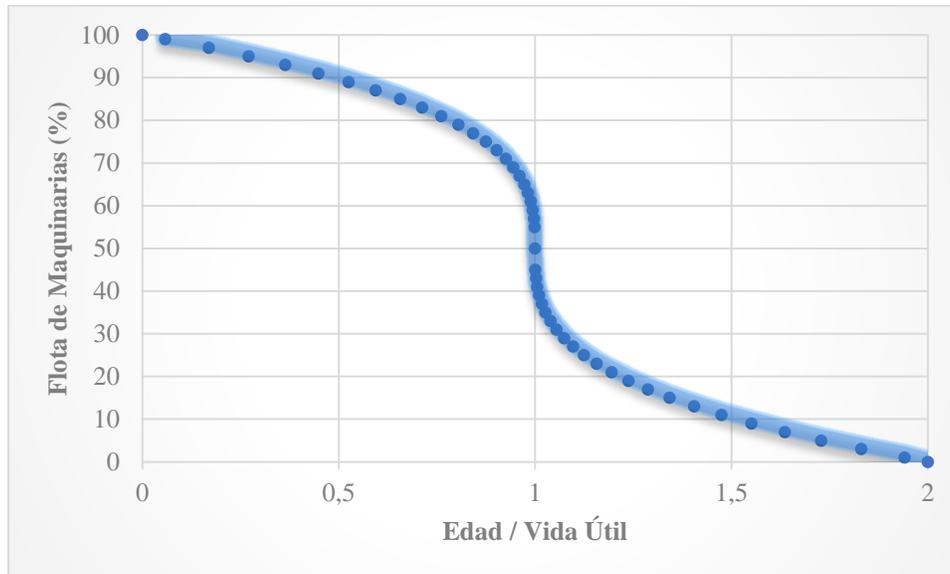


Figura 2-1. Curva de chatarrización predeterminada (Adaptado de [8]).

En el ANEXO II, se presenta el porcentaje de MMFR retirada de la flota en función de la razón entre la edad de la maquinaria y su vida útil.

2.3.3 Emisiones de Maquinarias Importadas Antes del Año 2014

Para estimar las emisiones correspondientes a los años previos al 2014, se utilizarán los resultados obtenidos en MMA 2014 (Tabla 1-6) para maquinarias obtenidas de aduanas entre 2000 y 2014 más las estimadas previo al año 2000.

Como se carece de información para realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente, se procederá a realizar un deterioro de emisiones (aumento de emisiones debido al envejecimiento de los motores) y un retiro de emisiones, correspondiente a un retiro de maquinarias por antigüedad.

Para realizar el retiro de emisiones por antigüedad, se utilizará la Tabla 1-5 y se realizará el mismo procedimiento señalado en el apartado 2.3.2, es decir, teniendo la potencia neta de las maquinarias, se obtiene la vida media de estas a partir de la Tabla 2-7, y con ayuda del FC y el NA [Hrs], se obtiene la vida útil de cada una de las maquinarias. Posteriormente, se estimará la edad de la flota y con ayuda del ANEXO III, se indicará el porcentaje de retiro de cada maquinaria. Finalmente, el porcentaje de retiro de emisiones se calculará como un promedio ponderado para los retiros de maquinaria indicados previamente, utilizando como grado de importancia las cantidades de cada una de las MMFR.

Por otro lado, para estimar el deterioro de las emisiones, como no se tiene suficiente información sobre las tecnologías de las maquinarias, se utilizarán los factores de deterioro obtenidos a partir del documento “1.A.4 Non-road mobile sources - machinery (Guide Book 2013, EEA)”:

Tabla 2-8. Factor de Deterioro para cada contaminante (Fuente: [10]).

Contaminante	Factor de Deterioro
CH4 / NMCOV	1,5% por año
CO	1,5% por año
NO _x	0% por año
FC / SO ₂ / CO ₂	1% por año
N ₂ O / NH ₃	0% por año
PM	3% por año

3 Capítulo 3 – Resultados

Este capítulo presenta tres subcapítulos que responden a lo solicitado en los objetivos específicos. En primer lugar, se presenta el nivel de actividad, posteriormente los factores de emisión seleccionados para los cálculos posteriores y, finalmente, las emisiones estimadas para el sector junto a comparaciones con resultados extraídos de otros trabajos.

3.1 Nivel de Actividad

3.1.1 Cantidad de Maquinarias

Luego de elaborar el inventario inicial de MMFR entre los años 2014 y 2017, con ayuda de las bases de datos de Aduanas, fue necesaria la extracción de datos atípicos del registro de importaciones. Las cantidades de maquinarias importadas individualmente se señalan a continuación:

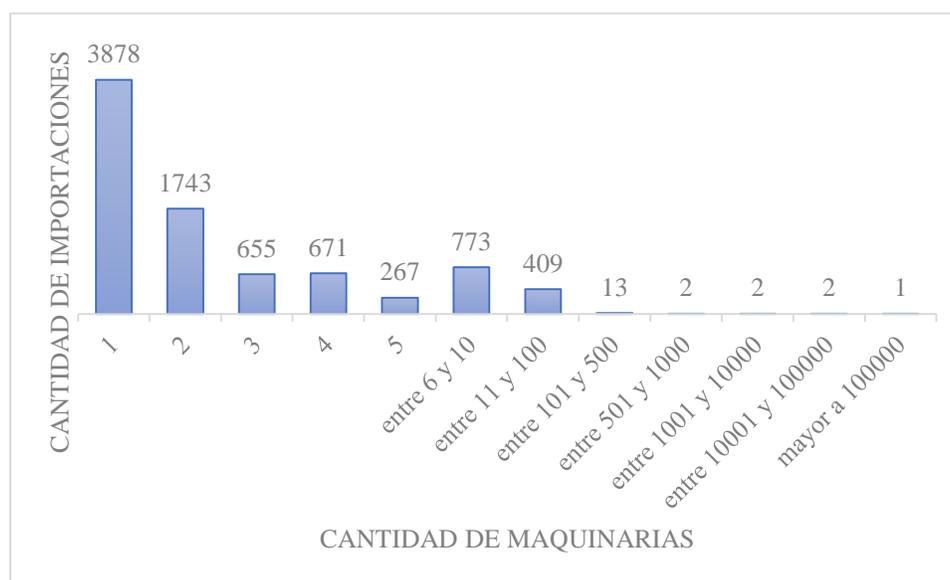


Figura 3-1. Cantidad de maquinarias por importación.

La figura muestra que entre los años 2014 y 2017, se realizaron 3878 importaciones en las cuales se ingresó al país 1 máquina o que se realizaron 773 importaciones en las que las maquinarias importadas fueron entre 6 y 10 unidades, por ejemplo.

De este gráfico se puede observar que las cantidades importadas no se distribuyen de manera normal, por lo cual, los métodos más comunes para identificar datos atípicos no sirven. Se realizó el análisis con el test de Tukey (Caja de Bigotes) y con otros criterios, pero todos estos daban resultados que, debido a la distribución de los datos, eran notoriamente erróneos. Finalmente, se tomarán como datos atípicos las importaciones mayores a 1000 maquinarias, que correspondan a las maquinarias y al año analizado con el criterio indicado en el apartado **2.1.1**.

Las cantidades de importaciones y las cantidades de máquinas, con y sin datos atípicos, se presentan a continuación:

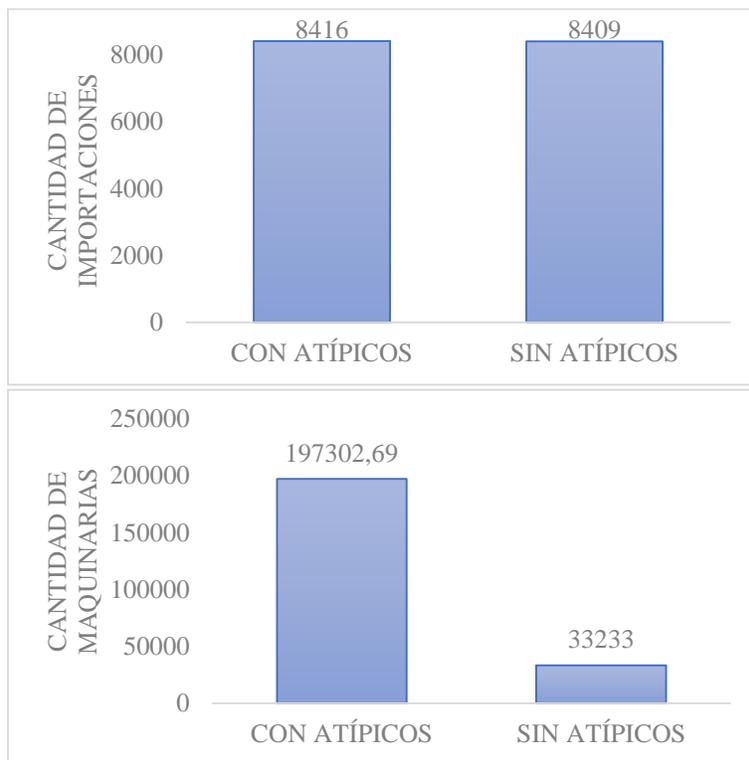


Figura 3-2. Comparación de cantidades con y sin datos atípicos.

De la figura anterior, se observa que al quitar los datos atípicos la cantidad de maquinarias baja hasta un 16,84% de su valor original, pero los datos extraídos de la muestra son solamente 7: 4 valores corresponden a datos muy dispersos con respecto al registro histórico y 3 corresponden a números decimales.

Luego de homologar las MMFR obtenidas de las bases de datos de aduanas con la información entregada en el **ANEXO I**, se obtiene la siguiente tabla con el registro de maquinarias importadas entre los años 2014 y 2017:

Tabla 3-1. Cantidad de MMFR por tipología (2014-2017).⁵

MMFR	Cantidad [U]
Grúa	2585
Grúa Horquilla	2948
Bulldozer	303
Motoniveladora	515
Scrapers	2501
Compactador de Rodillo	1120
Cargador Frontal	4673
Minicargador	356
Excavadora	4096
Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	3995
Zanjadora	348
Quitanieve	79
Otros Equipos Mineros Subterráneos	315
Perforadora	310
Perforadora	2737
Cosechadora-Trilladora	686
Otros Equipos Agrícolas	1090
Tractor de Oruga	51
Tractores Agrícolas	568
Tractores Fuera de Carretera	24
Tractores Agrícolas	2020
Tractores Fuera de Carretera	3
Tractores Agrícolas	788
Tractores Fuera de Carretera	15
Tractores Agrícolas	183
Tractores Fuera de Carretera	207
Dumper	638
Camiones Fuera de Carretera	25
Camiones Fuera de Carretera	44
Total	33223

3.1.2 Horas Anuales en Operación y Factor de Carga.

En el reporte oficial emitido por el MMA el año 2014, se realizaron encuestas a los importadores de equipos y se observó que los valores referentes a factor de carga y horas anuales en operación de las maquinarias presentaban gran dispersión entre un importador y otro, y al momento de sacar un valor promedio estos no diferían mucho de los valores internacionales entregados por la EPA. Por lo anterior, los valores utilizados para las horas anuales en operación (comúnmente denominado nivel de actividad) y el factor de carga, serán extraídos de la *Tabla 2-1*.

⁵ Las MMFR que se repiten en la tabla es debido a que presentan la misma tipología, pero distintas potencias nominales.

3.1.3 Potencia Nominal

Utilizando los criterios señalados en el apartado 2.1.3, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 3-2. Potencias nominales por tipología.

MMFR	Potencia Neta (kW)
Grúa	175
Grúa Horquilla	90
Bulldozer	140
Motoniveladora	120
Scrapers	415
Compactador de Rodillo	55
Cargador Frontal	165
Minicargador	38
Excavadora	275
Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	70
Zanjadora	25
Quitanieve	226
Otros Equipos Mineros Subterráneos	95
Perforadora	300
Perforadora	200
Cosechadora-Trilladora	150
Otros Equipos Agrícolas	50
Tractor de Oruga	400
Tractor Agrícola	28
Tractor Fuera de Carretera	28
Tractor Agrícola	56
Tractor Fuera de Carretera	56
Tractor Agrícola	103
Tractor Fuera de Carretera	103
Tractor Agrícola	270
Tractor Fuera de Carretera	270
Dumper	280
Camión Fuera de Carretera	30
Camión Fuera de Carretera	300

A continuación, se presenta la distribución de la flota de maquinarias según los rangos de potencia normados:

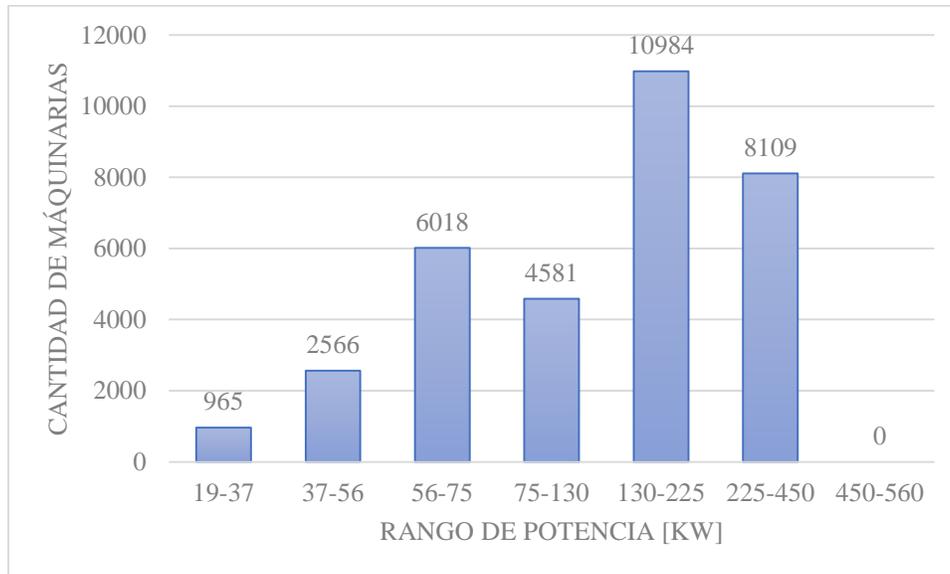


Figura 3-3. Distribución de maquinaria según rango de potencia (Elaboración Propia).

La figura anterior, indica la cantidad de maquinaria distribuida según rango de potencia, para la maquinaria registrada en las bases de datos de aduanas entre los años 2014-2017. Se observa claramente que las maquinarias que más abundan son aquellas con potencia entre 130 y 225 kW, y en el caso de maquinarias con potencia nominal entre 450 y 560 kW, no se registran equipos.

3.1.4 Tipo de Tecnología

Utilizando las bases de datos de aduanas entre los años 2014 y 2017, se obtuvo que el origen de las importaciones es el siguiente:

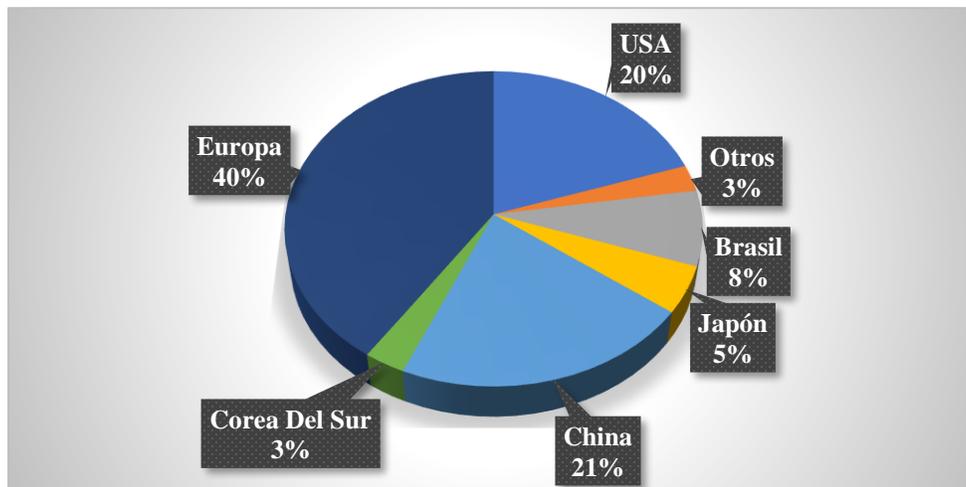


Figura 3-4. Participación en importaciones (2014-2017).

La figura anterior muestra la procedencia de las importaciones de MMFR ingresadas al país en los años estudiados. Por ejemplo, un 20% de la flota de MMFR proviene de USA. La

categoría “Otros” corresponde a todos los países que participan en menor cantidad, y corresponden a más de 20 orígenes, por lo cual, para simplificar los cálculos, se divide dicha participación de manera proporcional en los otros 6 ítems.

Los estándares de emisión de la EEA, EPA, Japón, China, Corea del Sur y Brasil se presentan en el **ANEXO IV**.

En el estudio del MMA 2014, por medio de encuestas a los importadores de equipos, se obtuvo que el retraso promedio entre las maquinarias provenientes de EEUU, Europa y Japón es de 4 años. Al igual que en este documento, se considera que para los países que no se tenga información sobre el retraso tecnológico, se utiliza como norma la equivalente a la regulación existente en dicho país de origen en el año que se realizó la importación.

3.2 Factores de Emisión

El año 2016, la EEA publicó una nueva guía de inventario de emisiones que reemplaza a su versión previa (2013). En este documento, se presentan cambios significativos en la tabla de factores de emisión de equipos nuevos en estado estacionario, por lo cual, es necesario comparar estos nuevos factores de emisión con los entregados por la EPA.

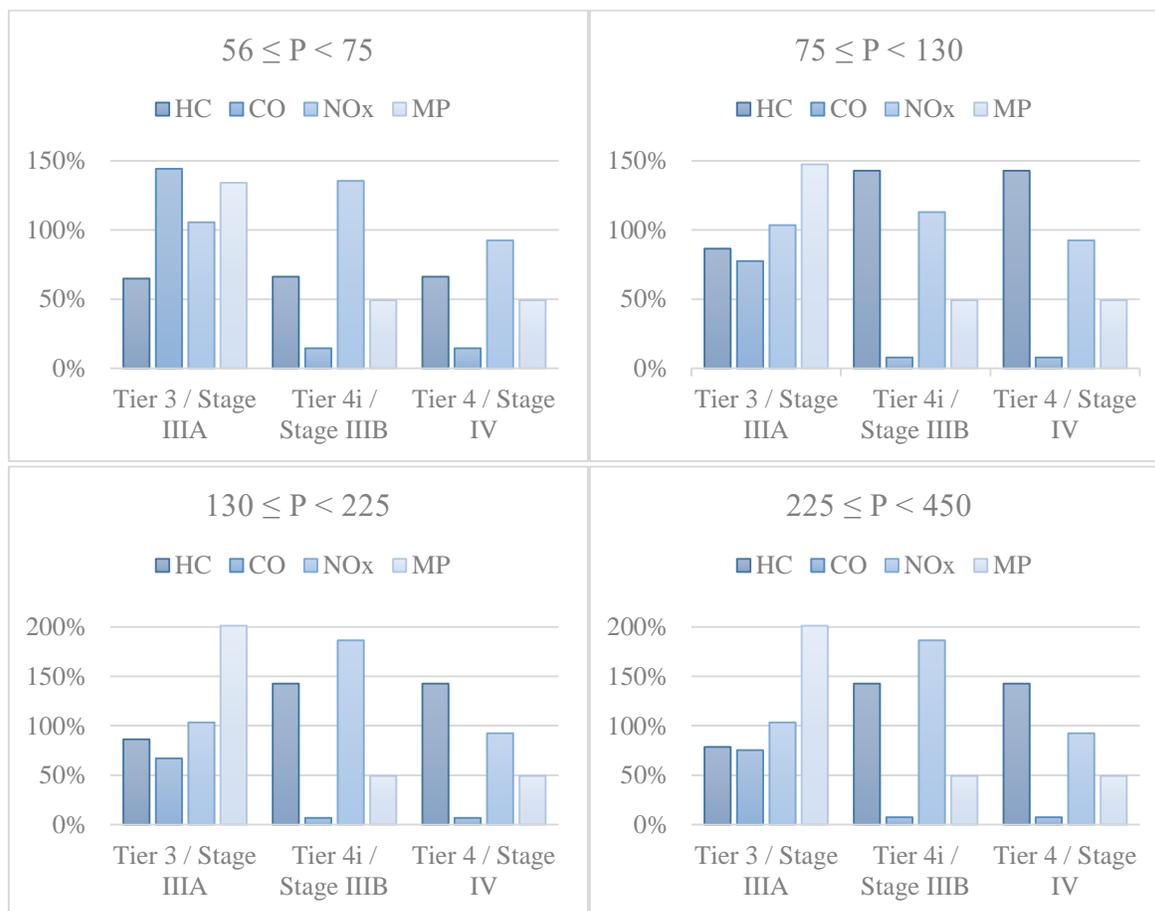


Figura 3-5. Comparación porcentual entre factores de emisión EPA y EEA, EEA como referencia.

En la figura anterior, se muestra la comparación porcentual de los factores de emisión norteamericanos sobre los europeos. Se comparan las normativas Tier 3, 4i y 4 con Stage IIIA, IIIB y IV, respectivamente, debido a que son las de interés para las maquinarias importadas entre los años 2014 y 2017. Se grafica esta comparación para las potencias nominales entre 56 y 450 kW, debido a que para las potencias menores las tecnologías mencionadas no se encuentran en su totalidad, además se excluyen las maquinarias con potencia nominal mayor a 450 kW debido a que la flota registrada con dicha potencia es nula.

Además, se observa que la mayor diferencia se encuentra en los factores de emisión del CO, debido a que a medida que mejora la tecnología norteamericana se reduce de manera muy drástica el factor de emisión de dicho contaminante, mientras que los factores de emisión europeos de CO se mantienen constante con el cambio de tecnología. Para los factores de emisión de MP, ocurre algo similar al caso del CO, pero en menor cantidad, debido a que, sí ocurre una mejora tecnológica para los factores de emisión europeos de MP, pero es menor a la norteamericana. Los factores de emisión norteamericanos de HC para máquinas con potencias nominales entre 56 y 75 kW son más bajos para cualquier tecnología que los europeos, pero cuando la potencia nominal supera los 75 kW el avance tecnológico europeo es mejor al norteamericano, ya que la diferencia de factores de emisión se invierte desde Tier 3 / Stage IIIA a Tier 4i / Stage IIIB. Finalmente, para el caso del NO_x, los factores de emisión son bastantes similares, excepto para las tecnologías Tier 4i / Stage IIIB en el rango de potencia 130 a 450 kW, donde los factores norteamericanos alcanzan a ser un 186% de los europeos.

3.3 Cálculo de Emisiones

3.3.1 Emisiones Flota Aduanas 2014 – 2017 (año base 2017)

De acuerdo a lo analizado en el apartado anterior, se calculan las emisiones utilizando factores de emisión europeos para las máquinas que tengan como origen un lugar donde los estándares de emisión se basen principalmente en la norma europea, es decir, Europa y China. Por otro lado, se utilizarán los factores de emisión norteamericanos para la flota que provenga de países que se basen en la norma de la EPA, es decir: USA, Japón, Corea del Sur y Brasil. Además, se calcularán las emisiones utilizando solo factores de emisión europeos y, por otro lado, solo factores de emisión norteamericanos, para definir los valores máximos y mínimos posibles de emisiones para cada contaminante.

Para ajustar correctamente los factores de emisión del material particulado, es necesario conocer el contenido de azufre en el combustible comercial (*soxdsl*) de Chile. El Ministerio de Energía es quien establece su valor. En Chile se comercializan 3 tipos de diésel: Diésel A-1 para la región Metropolitana, y Diésel B-1 (vehicular) y B-2 (industrial) para el resto del país [15]. En el documento MMA 2014, se obtuvo que las MMFR se encuentran distribuidas aproximadamente en un 26% en la Región Metropolitana y un 74% en el resto del país. Utilizando estas proporciones se obtiene que el *soxdsl* de Chile es:

Tabla 3-3. Contenido de azufre en el combustible comercial en Chile (Elaboración Propia).

	Combustible	soxdsl (%)	Distribución MMFR (%)	soxdsl Chile (%)
RM	Diésel A-1	0,0015	26	0,00409
Resto de Chile	Diésel B-2	0,0050	74	

Retiro de Maquinaria (Chatarrización)

Al tener la cantidad de maquinarias que ingresaron al país en cada año entre el 2014-2017, es posible obtener a flota de equipos que se ha retirado de operación, con ayuda del ANEXO III. La cantidad de MMFR al año 2017 se muestra a continuación:

Tabla 3-4. Cantidad de MMFR por tipología, considerando chatarrización (2014-2017).

MMFR	Cantidad [U]
Grúa	2540
Grúa Horquilla	2779
Bulldozer	297
Motoniveladora	503
Scrapers	2476
Compactador de Rodillo	1095
Cargador Frontal	4569
Minicargador	355
Excavadora	4016
Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	3977
Zanjadora	340
Quitanieve	79
Otros Equipos Mineros Subterráneos	312
Perforadora	309
Perforadora	2727
Cosechadora-Trilladora	686
Otros Equipos Agrícolas	1084
Tractor de Oruga	50
Tractor Agrícola	568
Tractor Fuera de Carretera	24
Tractor Agrícola	2020
Tractor Fuera de Carretera	3
Tractor Agrícola	788
Tractor Fuera de Carretera	15
Tractor Agrícola	183
Tractor Fuera de Carretera	207
Dumper	638
Camión Fuera de Carretera	14
Camión Fuera de Carretera	42
	32696

De la tabla anterior, se observa que la cantidad final de maquinarias disminuyó a un 98,41%, es decir, la cantidad de maquinarias retiradas de la flota operativa corresponde solo a un 1,59%. Este valor resulta ser bastante pequeño, ya que como se puede observar

en la **Figura 2-1**, se puede observar que, para los primeros años de vida de las maquinarias, la disminución de la flota es relativamente lenta en comparación a cuando la maquinaria ya cumplió su vida útil.

Resultados Emisiones de MMFR

Considerando los criterios descritos previamente, las emisiones contaminantes generadas por MMFR perteneciente a la flota de aduanas entre los años 2014 – 2017, son:

Tabla 3-5. Emisiones Contaminantes Flota Aduanas 2014-2017 (año base 2017).

	Contaminantes [Ton/año]						
	HC	CO	NO _x	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO ₂	SO ₂
Flota Aduanas 2014-2017	466	3321	5787	216	210	1919474	44

Si se observa el comportamiento de las emisiones de CO₂ y SO₂ en función del año (**Figura 3-6**), se logra apreciar que estos contaminantes siguen un patrón de ventas, es decir, a mayor número de máquinas importadas, mayor son las emisiones.

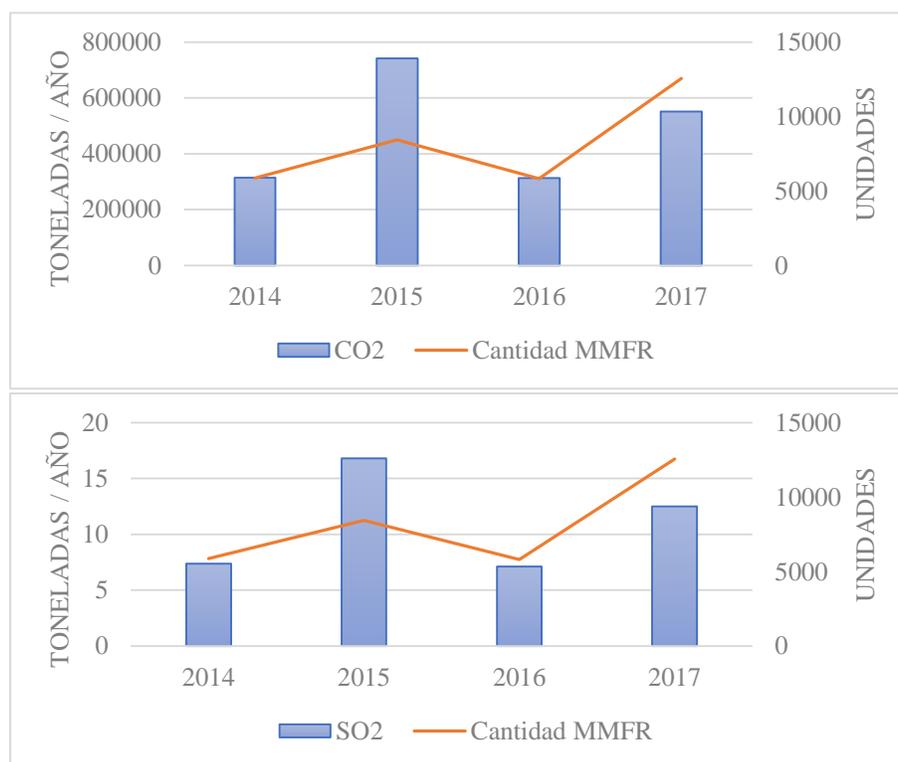


Figura 3-6. Relación entre emisiones de CO₂, SO₂ y cantidad de maquinaria importada por año.

Si bien, el CO₂ y SO₂ no dependen de las tecnologías de las maquinarias directamente, dependen de los HC emitidos (los cuales si dependen de la tecnología del motor), ya que los HC representan las emisiones contaminantes producidas por la no quema de

combustible y los otros contaminantes mencionados anteriormente se generan al producirse correctamente la combustión. Con el paso del tiempo, los factores de emisión en estado estacionario y el factor transiente disminuyen (debido a los avances tecnológicos), lo que ocasiona que disminuya la emisión de HC, por otro lado, el factor de deterioro genera un aumento en las emisiones de HC de la MMFR adquirida en el pasado, todo esto genera un aumento en las emisiones de CO₂ y SO₂ de la maquinaria más nueva y una disminución en las emisiones producidas por maquinaria más antigua, respectivamente. Caso contrario, a medida que mejoran las tecnologías, el factor transiente disminuye, generando una disminución en el consumo de combustible ($BSFC_{aj}$), por lo cual las emisiones de CO₂ y SO₂ tienden a disminuir con el paso del tiempo. Si comparamos el año 2015 con el año 2017, se puede observar que a pesar de que la cantidad de maquinarias importadas el año 2017 superan a las importadas en cualquier año previo, las emisiones de CO₂ y SO₂ son inferiores que las emitidas por MMFR adquirida el año 2015, esto no solo se debe a la predominancia que exista entre el $BSFC_{aj}$ y el $FE_{aj,HC}$ (factor de emisión en estado estacionario, factor de deterioro y factor de ajuste transiente de HC), también depende del aumento o disminución en las cantidades importadas por año de cada una de las maquinarias, por ejemplo, el año 2015 se registró la importación de 2500 Scrapers, los que corresponden a un 28,96% de la flota importada ese año, y aportan con un 21,89 % y un 21,73% de las emisiones de CO₂ y SO₂ para dicho año respectivamente, mientras que el año 2017 se registraron 0 Scrapers.

A continuación, se presentan las emisiones por contaminante comparándolas con el mejor y el peor escenario, es decir, utilizando solo factores de emisión norteamericanos en un caso y solo factores de emisión europeos en el otro, esto no quiere decir que el mejor escenario sea siempre utilizando los factores de la EPA y el peor sea utilizando los factores de la EEA, dependiendo el contaminante se verá cual escenario es mejor y cual es peor.

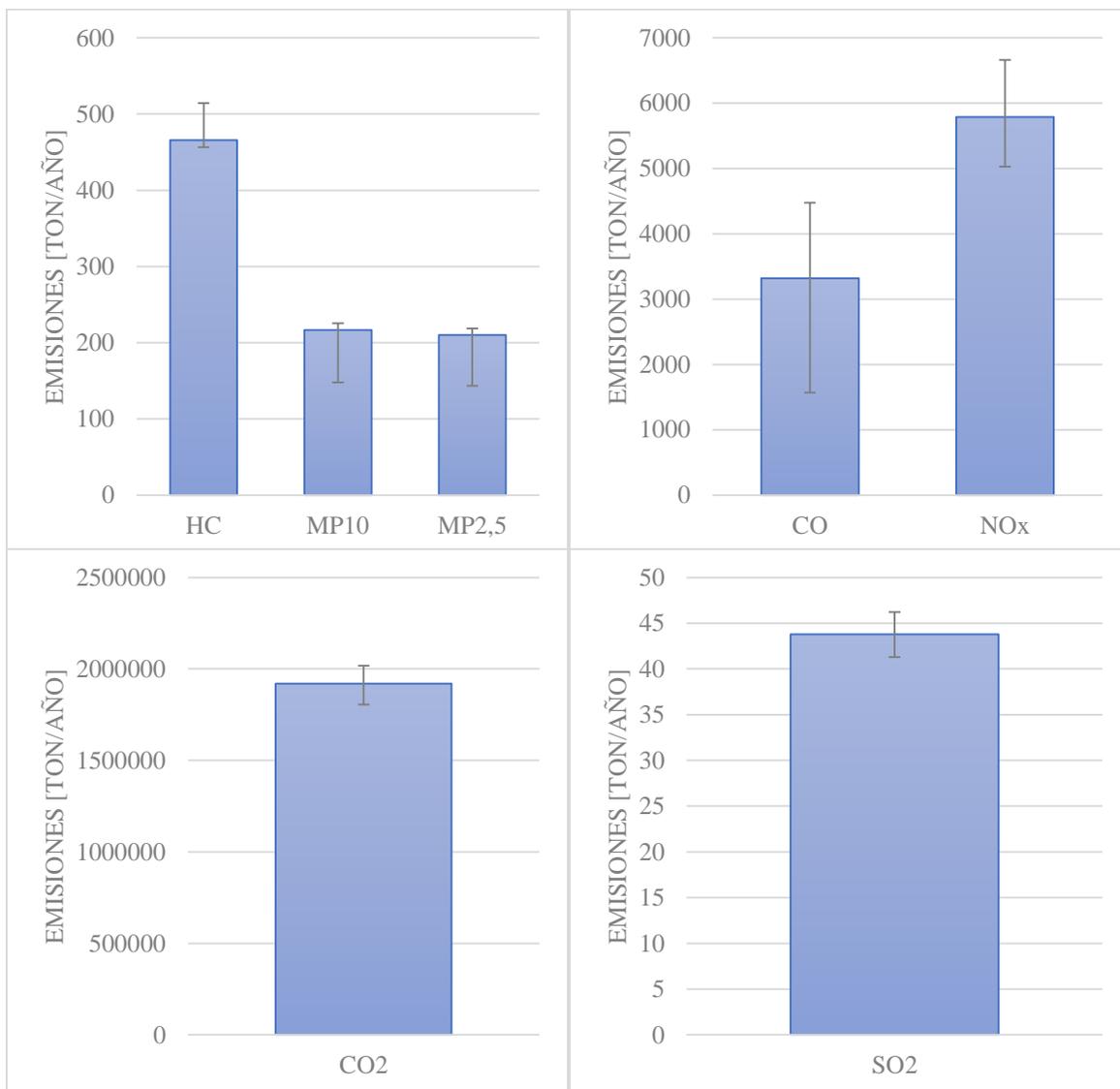


Figura 3-7. Comparación de emisiones contaminantes de la flota de aduanas 2014-2017.

Para los contaminantes HC, MP, y NO_x, el mejor escenario (menores emisiones) corresponde a cuando se utilizan solo FE europeos, mientras que el peor escenario (mayores emisiones) corresponde a cuando se utilizan solo FE de los Estados Unidos. Para los contaminantes CO, CO₂ y SO₂ ocurre lo contrario: mejor escenario FE EPA y peor escenario FE EEA.

El contaminante que presenta mayor incertidumbre es el CO, esto se debe a que, como se mencionó en el apartado 3.2, la diferencia entre los factores de emisión de CO de la EPA versus los de la EEA es mucha.

3.3.2 Emisiones Flota Anterior al 2014 (Año Base 2017)

Como se mencionó en el apartado 2.3.3, para estimar las emisiones contaminantes provenientes de MMFR fabricadas previo al año 2014, se utilizarán las emisiones calculadas en el informe MMA 2014.

En primer lugar, utilizando la **Tabla 2-8** para 4 años (2013 al 2017), se castigan o aumentan las emisiones registradas en la **Tabla 1-6** (MMFR 2013 Aduanas + Estimadas <2000). Posteriormente, conociendo que más de un 80% de las MMFR proviene del registro de Aduanas 2000-2013, y que las máquinas que se tienden a retirar en primer lugar son las más antiguas, se estima que la flota importada previo al año 2014 proviene es su totalidad del año 2007. Como los resultados de MMA 2014 incluyen retiro de maquinaria, se calcula el retiro para 6 años (2007 al 2013) y para 10 años (2007 al 2017), debiendo retirar para cada maquinaria la resta entre el retiro para 10 años y 6 años de edad. Finalmente, se calcula el retiro de emisiones como el promedio ponderado entre los retiros de cada una de las maquinarias, utilizando como grado de importancia las cantidades de maquinarias respectivas, y se obtiene que el retiro de emisiones corresponde a un 12,36 %.

A continuación, se presentan las emisiones contaminantes de MMFR anterior al año 2014, actualizadas al baño base 2017:

Tabla 3-6. Emisiones contaminantes MMFR anterior al 2014 (año base 2017).

	Contaminantes [Ton/año]						
	HC	CO	NO _x	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO ₂	SO ₂
Flota anterior al año 2014	5278	24419	32301	4307	4178	3114334	95

Adicionalmente, se presentan los resultados junto al mejor y peor escenario. El peor escenario sucedería si consideramos que las emisiones empeoran por envejecimiento de los motores, pero en este periodo no se retiran máquinas. Por otro lado, el mejor escenario sucedería si se retiraran maquinarias, pero aquellas que siguen en funcionamiento no sufren de deterioro de sus motores.

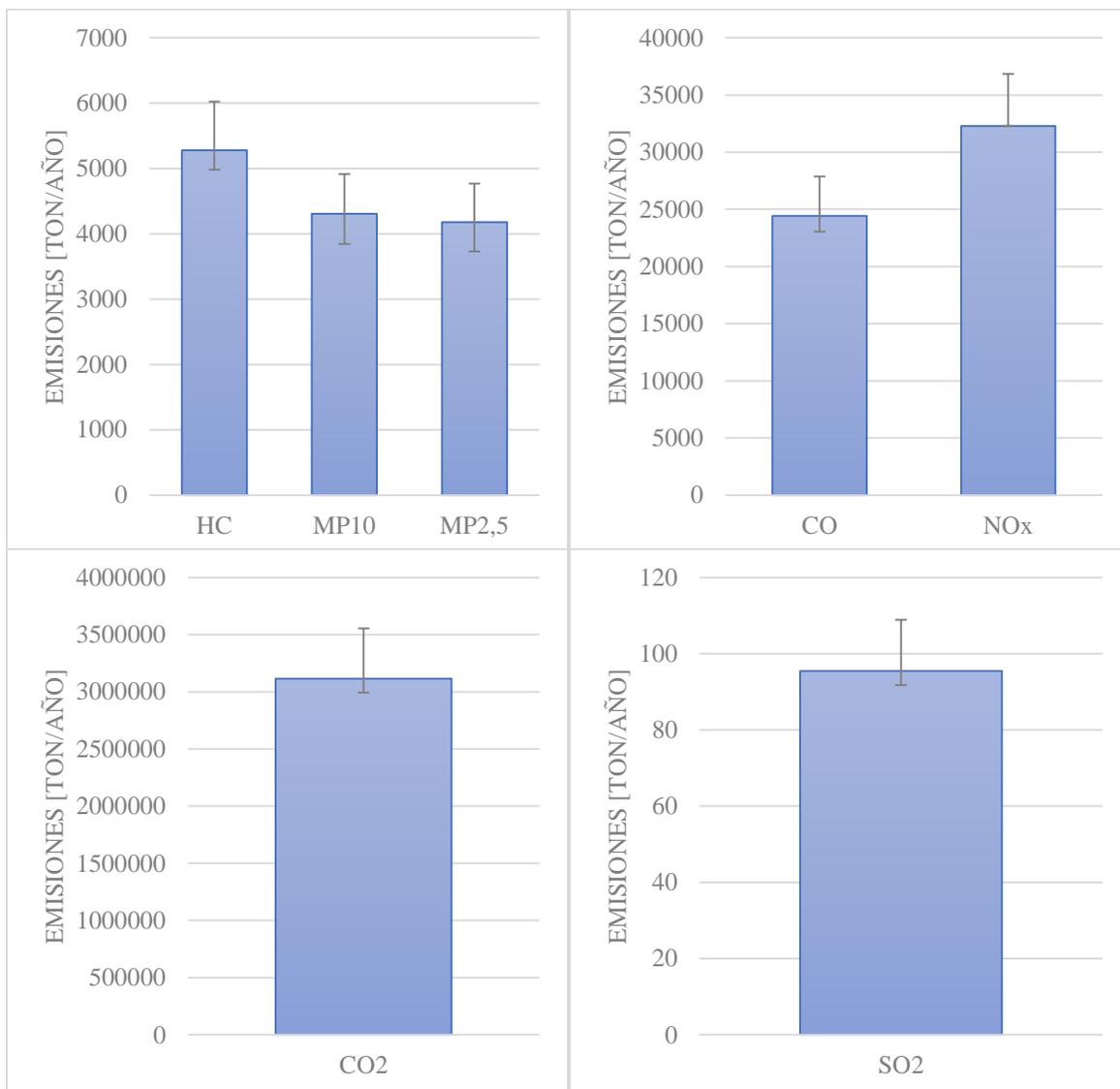


Figura 3-8. Comparación de emisiones contaminantes de la flota de aduanas anterior al 2014 con las emisiones utilizando deterioro de motores y retiro de maquinarias por chatarrización.

De la figura anterior, se observa que en todos los casos predomina el retiro sobre el deterioro, debido a que las emisiones se acercan más al caso que considera solo retiro. Lo anterior se debe a que el deterioro fue calculado utilizando la **Tabla 2.8**, y como hay que actualizar las emisiones desde el año 2013 al 2017 (4 años), el valor máximo de deterioro que se alcanza es de un 12% para el MP, y el retiro de emisiones utilizado fue de un 12,36% para todos los contaminantes. Por otro lado, se observa que el NO_x no presenta cota inferior, esto se debe a que, el deterioro del NO_x es de 0% anual.

3.3.3 Emisiones MMFR Totales (Año Base 2017)

Considerando toda la flota de maquinarias en operación para el año base 2017, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-7. Emisiones contaminantes MMFR (año base 2017).

Contaminantes [Ton/año]							
	HC	CO	NO _x	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO ₂	SO ₂
MMFR 2017	5744	27740	38088	4523	4388	5033808	139

Adicionalmente, se entregan las emisiones contaminantes con sus respectivas incertidumbres.

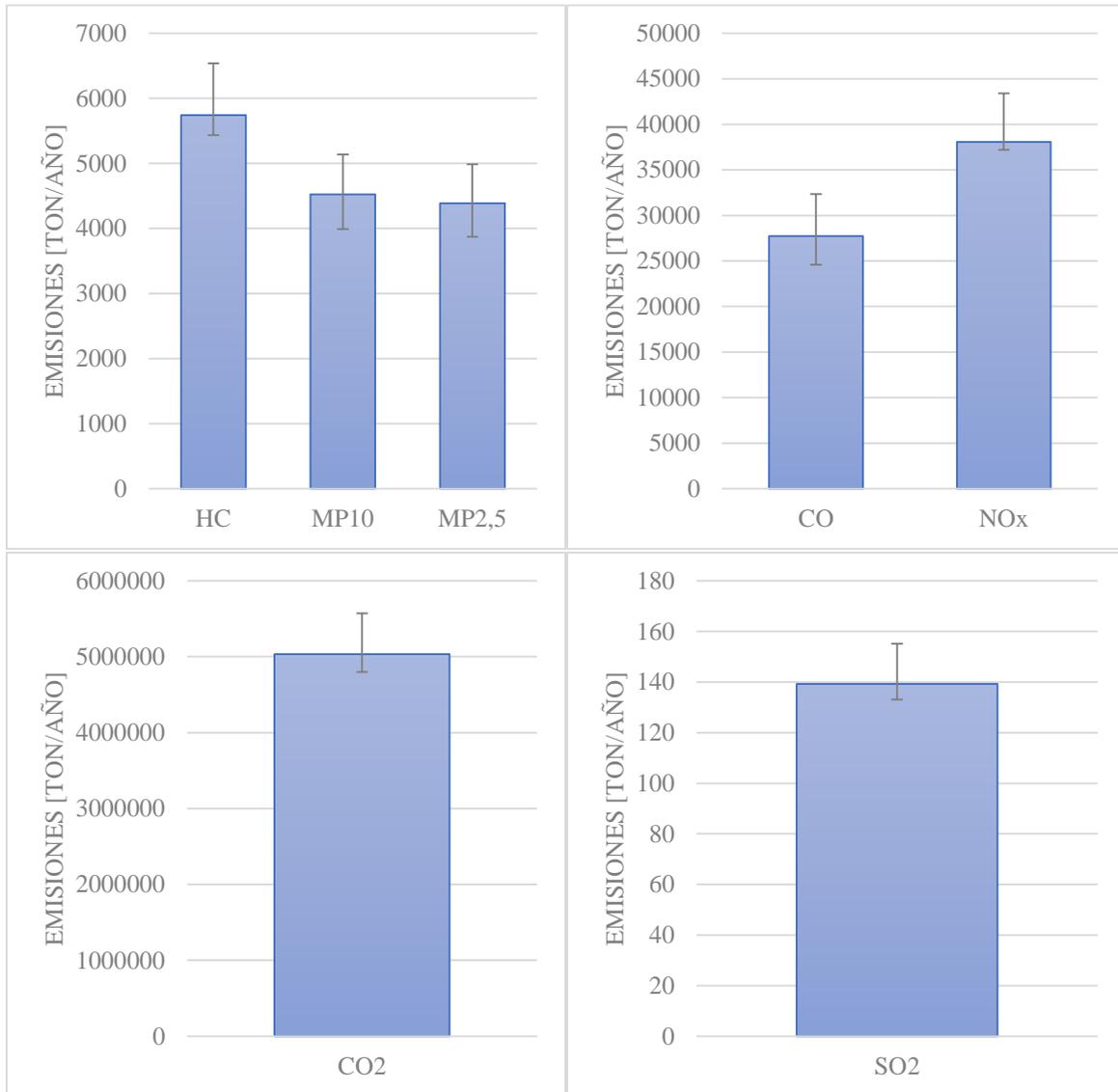


Figura 3-9. Emisiones contaminantes MMFR año base 2017 con incertidumbre.

Para los contaminantes HC, MP y NO_x, el valor mínimo corresponde a emisiones utilizando solo factores de emisión de la EEA y considerando solo retiro de maquinaria para la actualización de emisiones, mientras que el máximo corresponde a emisiones utilizando solo factores de emisión de la EPA y considerando solo deterioro en la actualización de

emisiones. Para los contaminantes CO, CO₂ y SO₂, el valor mínimo corresponde a emisiones utilizando solo factores de emisión de la EPA y considerando solo retiro de maquinaria para la actualización de emisiones, mientras que el máximo corresponde a emisiones utilizando solo factores de emisión de la EEA y considerando solo deterioro en la actualización de emisiones.

Comparación de Resultados

En primer lugar, se comparan porcentualmente los resultados obtenidos en este trabajo (*Tabla 3-7*) con los obtenidos en el informe MMA 2014 (*Tabla 1-6*), utilizando como referencia los resultados basados en el 2017.

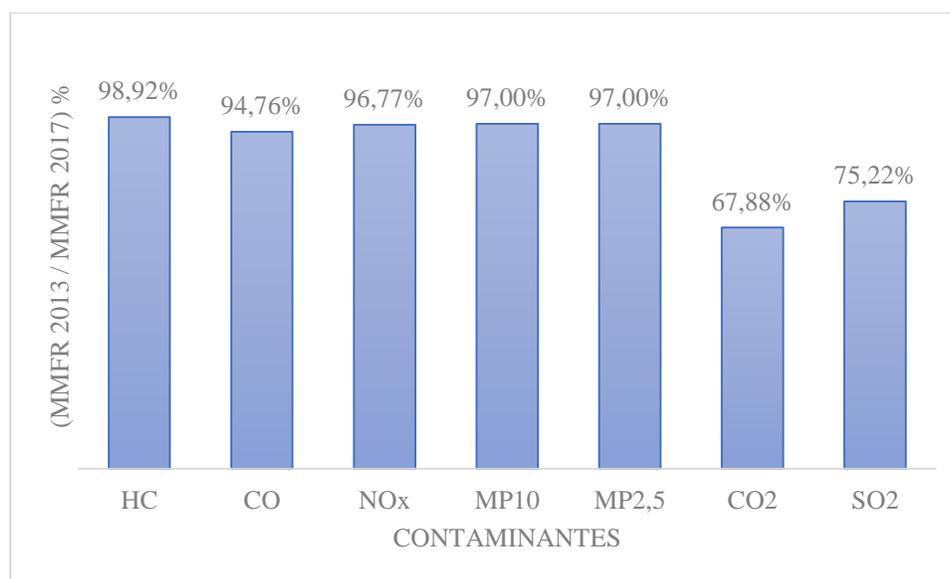


Figura 3-10. Comparación porcentual de emisiones por contaminantes entre MMFR 2013 y MMFR 2017, utilizando MMFR 2017 como referencia.

De la figura anterior, se observa que las emisiones de la mayoría de los contaminantes son muy similares, exceptuando los contaminantes CO₂ y SO₂. Lo anterior se debe a que a medida que se desarrollan nuevas tecnologías, estas no se preocupan de reducir las emisiones de CO₂ ni SO₂, ya que ningún estándar de emisión las fiscaliza, es más, las nuevas tecnologías reducen de manera significativa las emisiones de HC, las cuales influyen directamente en la emisión de los contaminantes nombrados anteriormente, ya que ambos se generan a partir de la quema de combustible y los HC a partir del combustible no quemado. Si bien, se adicionó casi un 28% de maquinarias entre los años 2014-2017 a la flota y solo se retiró un 12,36% de las emisiones generadas por la maquinaria que se encontraba anteriormente al año 2014, las maquinarias ingresadas al país entre los años 2014-2017 presentan tecnologías mucho más avanzadas, pudiendo mantener las emisiones de HC, CO, NO_x y MP relativamente constantes.

En segundo lugar, se comparan los resultados obtenidos con las emisiones mostradas en el informe CCVC 2013 [16]:

Tabla 3-8. Comparación MMFR 2017 con informe CCVC 2013. [16].

	Contaminantes [Ton/año]				
	HC	CO	NOx	MP2,5	CO2
MMFR 2017	5744	27740	38088	4388	5033808
Caminero en ruta	18353	241273	86309	2584	21349442
Aer-Ferr-Mar	2049	4295	30634	1677	3348951

Para contextualizar el impacto de las emisiones de MMFR 2017 a nivel país, se presentan los siguientes gráficos:

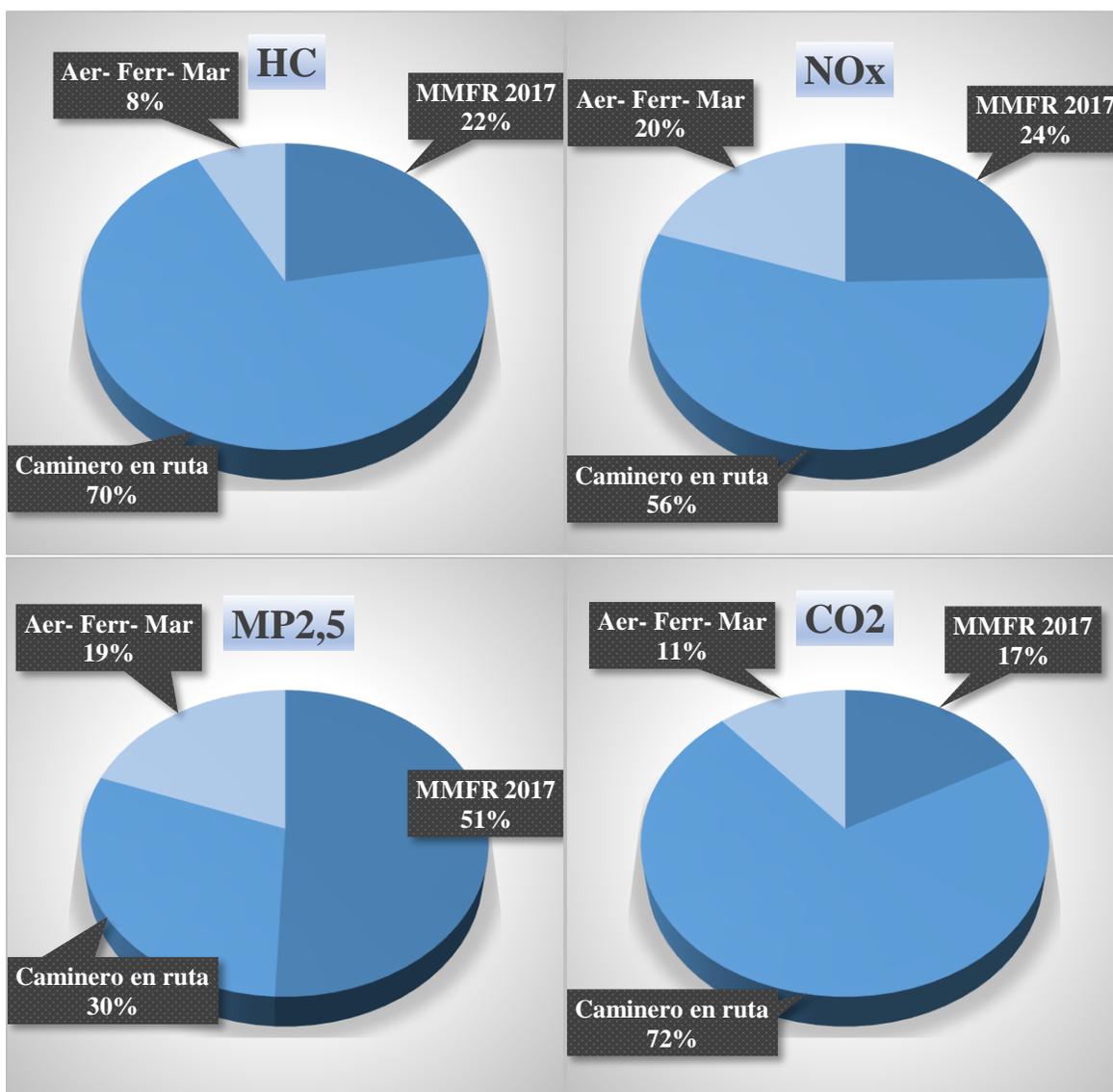


Figura 3-11. Comparación emisiones MMFR 2017 con vehículos de ruta y transporte aéreo, marítimo y ferrocarriles (Elaboración Propia).

De la figura anterior, se observa que las MMFR tienen mayor impacto que el transporte aéreo, marítimo y ferrocarriles en la totalidad de contaminantes analizados (no se presenta CO debido a que era el contaminante en el cual se tenía menor impacto de los 5 analizados). Si se observa el NO_x, las MMFR generan casi el 50% de lo que generan todos los vehículos de ruta, mientras que, para el MP_{2,5}, las MMFR generan más de la mitad de las emisiones totales a nivel país. Si se considera que el retiro de emisiones para aquellas máquinas anteriores al 2014 coincide con el retiro de maquinarias y sumamos las registradas en el periodo 2014-2017, la cantidad total de MMFR 2017 corresponde a 135.588 maquinarias, y si comparamos esta cantidad versus los 4.853.413 vehículos en circulación motorizados registrados por la INE en 2016 [17], obtenemos que las MMFR corresponden solo a un 2,79% de los vehículos, por lo cual los porcentajes de emisiones indicados previamente resultan bastante alarmantes.

En tercer lugar y final, se comparan los resultados obtenidos con las emisiones provenientes de maquinaria pesada en faenas mineras ubicadas en la cordillera de los Andes [5]. Dichos resultados están presentes en la **Tabla 1.7**. A continuación, se presenta la comparación porcentual entre ambos resultados, utilizando como referencia las emisiones de MMFR 2017:

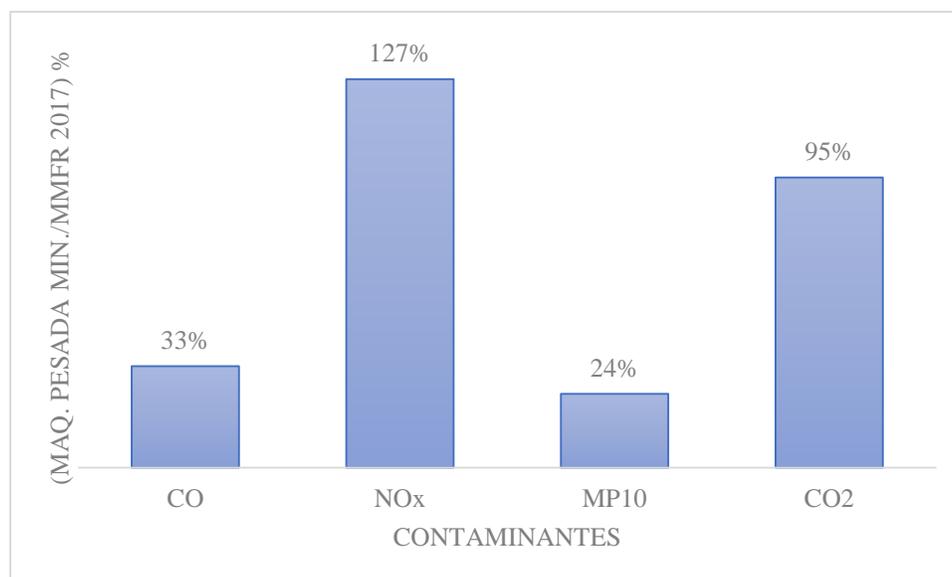


Figura 3-12. Comparación porcentual entre emisiones de MMFR 2017 y emisiones de maquinaria pesada de faenas mineras ubicadas en la cordillera de los Andes, con referencia MMFR 2017.

De la figura anterior, se observa que las emisiones de NO_x son aquellas que más destacan, y al ser mayores que las emisiones provenientes de MMFR resultan ser sumamente preocupantes debido a que las emisiones de NO_x de MMFR a nivel país representaban casi un 50% de las provenientes de vehículos camineros de ruta. Cabe destacar que, dentro de las maquinarias consideradas en el trabajo de título utilizado [5], hay varias maquinarias que también están incluidas en los resultados de MMFR 2017.

Para notar de mejor manera el efecto de la maquinaria pesada en faenas mineras que operan en la cordillera de los Andes, es necesario diferenciar entre aquellas maquinarias con potencia nominal inferior a 560 kW (es decir, aquellas que son consideradas MMFR por el MMA, y que en un futuro serán fiscalizadas), y aquellas con potencia nominal mayor a 560 kW (es decir, las que no son ni serán normadas por el momento). A continuación, se presenta dicha diferenciación:

Tabla 3-9. Emisiones de maquinaria minera en faenas mineras en la cordillera de los Andes (Elaboración propia a partir de [5]).

	Contaminantes [Ton/año]			
	CO	NOx	MP	CO2
P < 560 kW	915	3310	144	344334
P > 560 kW	8336	45245	952	4446475
	9251	48555	1096	4790809

Con estos valores, es posible observar el impacto a nivel país [16] de esta fuente contaminante:

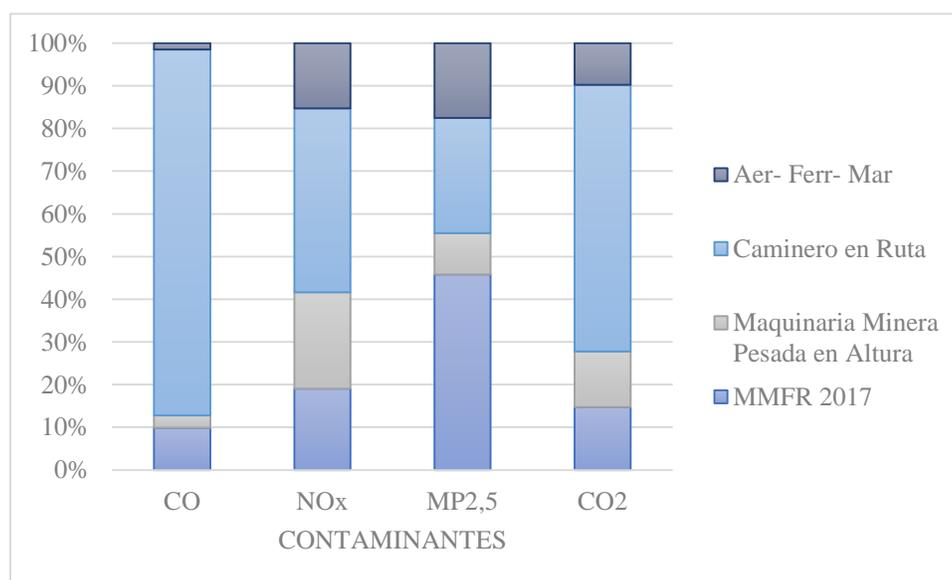


Figura 3-13. Aporte en emisiones contaminantes de las distintas fuentes consideradas.

Resulta bastante preocupante que estas máquinas no sean normadas, considerando el hecho de que las faenas mineras ubicadas en la cordillera de los Andes que se consideran en dicho trabajo de título, tienen una relevancia en la producción de cobre a nivel nacional de un 78,4%, es decir, existen maquinarias pesadas de minas de cobre que generan el restante 21,6% que no están siendo consideradas, además de maquinarias pesadas que pueden usarse en otros rubros (por ejemplo: industria, agrícola, construcción, etc), y aun así llegan

a generar más de un 20% de emisiones de NO_x y sobre un 10% de emisiones de $\text{MP}_{2,5}$ y CO_2 .

4 Capítulo 4 – Conclusiones

Este capítulo se divide en tres subcapítulos: conclusiones generales (que responden al objetivo general), conclusiones específicas (que responden a los objetivos específicos) y recomendaciones (que indican lo que se podría haber hecho para profundizar más en el tema, y aquello que no está dentro de los objetivos de este trabajo, pero se sugiere hacer como continuidad).

4.1 Conclusiones Generales

La estimación de emisiones contaminantes producidas por maquinaria móvil fuera de ruta en Chile (para la flota importada entre los años 2014 al 2017), se realiza utilizando la metodología de la EPA, ya que: los valores de deterioro de la EEA pierden sentido al crecer indefinidamente (no tienen cota superior); el retiro de maquinaria modelado por la EEA indica que las maquinarias se dejan de usar cuando ellas cumplen su vida útil, lo que se aleja de la realidad en la industria chilena; y el modelo norteamericano tiene mayor flexibilidad, al poder calcular los factores de emisión de MP utilizando el contenido de azufre en el combustible comercial chileno. Además, el método es compatible con la información entregada por las bases de datos de Aduanas.

Para el cálculo de emisiones, se utiliza un ponderado entre los factores de emisión europeos y los norteamericanos, debido a la gran variedad en los orígenes de las importaciones. Las cotas para las emisiones corresponden a emisiones calculadas solo con FE europeos y, por otro lado, solo con FE norteamericanos. Lo anterior resulta bastante útil, ya que se pueden observar escenarios críticos.

Los valores utilizados para nivel de actividad y factor de carga son valores internacionales reportados por la EPA, lo cual se debe a que en el informe MMA 2014, se realizaron varias encuestas a importadores y los valores entregados eran sumamente dispersos, y al promediarlos se obtenían valores similares a los entregados en los documentos de la EPA.

La estimación de emisiones contaminantes producidas por maquinaria móvil fuera de ruta en Chile (para la flota anterior al año 2014), se realiza utilizando los resultados presentados en el informe MMA 2014, a los cuales se les realiza un proceso de deterioro por envejecimiento de los motores y un proceso de retiro por antigüedad de las maquinarias. Dichos resultados actualizados son aceptables, debido a que las emisiones utilizadas se estimaron con la misma metodología que la MMFR importada entre los años 2014 y 2017, y los años en los cuales se aplica el deterioro y retiro son solamente 4, lo cual es muy inferior a la vida útil de la mayoría de la maquinaria considerada, por lo que se puede asumir que todas se comportan de manera similar (misma zona de la curva de retiro e incremento lineal del deterioro).

Las emisiones totales obtenidas para el año base 2017, en toneladas por año, son las siguientes: HC: 5744; CO: 27740; NO_x: 38088; MP₁₀: 4523; MP_{2,5}: 4388; CO₂: 5033808; y

SO₂: 139. Estos resultados resultan coherentes si se comparan con los resultados de MMA 2014.

4.2 Conclusiones Específicas

A partir de los distintos capítulos, se obtienen las siguientes conclusiones.

4.2.1 Estado del Arte

En un principio, se revisó la literatura científica relacionado con MMFR. Existen 2 metodologías principales para el cálculo de emisiones contaminantes provenientes de MMFR: la de la EPA y la de la EEA. La EEA presenta 3 metodologías denominadas Tier 1, Tier 2 y Tier 3, las cuales dependen del nivel de información que se tenga sobre las MMFR, siendo Tier 3 la que presenta mayor información y puede ser comparada con la metodología norteamericana.

Posteriormente, se revisan los únicos reportes oficiales realizados en Chile, ambos generados para el MMA. Estos documentos resultan sumamente interesantes, debido a que muestran como calcular las emisiones contaminantes provenientes de MMFR desde cero, en un país donde aún es un área poco estudiada. Además, se presenta un trabajo de título en el cual se estiman las emisiones provenientes de maquinaria pesada que opera en minería, las cuales, a pesar de estar funcionando fuera de carretera, no están siendo consideradas por el MMA al poseer potencia nominal mayor a 560 kW.

Finalmente, en cuanto a la normativa nacional, se revisa un acuerdo y un anteproyecto destinados a controlar las emisiones de MMFR en Chile. Estos documentos se hicieron en efecto a los reportes solicitados por el Ministerio del Medio Ambiente. Estas futuras normas son bastante interesantes debido a que se busca comenzar a fiscalizar directamente con Tier 3 en 2019 y al cabo de tres años pasar a la norma Tier 4 (dos niveles tecnológicos más).

4.2.2 Metodología

Hay mucha información internacional que resulta indispensable para poder estimar las emisiones contaminantes, para lo cual es necesario homologar las descripciones obtenidas en las bases de datos de aduanas con las internacionales. Lo anterior, resulta bastante sencillo debido a que las bases de datos de Aduanas entregan descripciones muy completas de las máquinas y son fácilmente identificables en los documentos internacionales.

El consumo de combustible es constante para un mismo rango de potencia, por lo cual, si una misma maquinaria (importada entre los años 2014 y 2017) aumenta su nivel tecnológico de un año a otro y disminuye su factor de emisión de HC, las emisiones de CO₂ y SO₂ se verán aumentadas, es decir estos 2 contaminantes dependen inversamente de los HC o del combustible no quemado.

Los factores de emisión ajustados de HC, CO, NO_x y MP, dependen del año del modelo de la maquinaria y de la potencia nominal del motor, mientras que los factores de emisión ajustados del CO₂ y SO₂ dependen del consumo de combustible y los HC (o combustible no quemado). Además, el ajuste realizado al MP por el contenido de azufre en el combustible comercial, depende del consumo de combustible.

El factor de deterioro de la EPA, muestra un crecimiento lineal en un principio y posteriormente se comporta de forma constante, lo cual indica un comportamiento bastante más preciso que el crecimiento indefinido del deterioro de la EPA, ya que los motores pueden empeorar hasta cierto punto, luego dejarían de ser útiles.

La curva de retiro de maquinarias por envejecimiento o chatarrización de la EPA, resulta bastante apegado a la realidad, debido a que considera que las maquinarias más nuevas se retiran en menor proporción que las más antiguas.

4.2.3 Resultados

Al comparar los factores de emisión de la EPA con los de la EEA, resulta que, a pesar de ser homologados, estos difieren mucho en ciertos casos. El caso más alarmante resulta ser el del CO, debido a que a medida que la tecnología aumenta, los factores de emisión de la EPA disminuyen drásticamente y los de la EEA permanecen constantes, llegando a ser los de la EPA un 7% de los de la EEA. Por lo cual, no pueden ser utilizados homológamente, si no que tienen que ser complementados, y utilizados como límites inferior y superior.

El porcentaje de azufre en el combustible comercial se calcula como una ponderación entre el usado en la RM y en el resto del país, por lo cual para realizar un cálculo más preciso para los factores de emisión del MP y del SO₂, sería necesario ubicar geográficamente toda la flota importada.

El porcentaje de chatarrización para la flota importada entre los años 2014 y 2017, corresponde a un 1,59%, lo cual indica que para las MMFR tener entre 0 a 4 años de antigüedad es prácticamente estar nueva.

Al comparar los resultados de MMFR 2017 con MMFR 2013, se observa que, a pesar de haber aumentado en gran cantidad las maquinarias presentes en el país, las emisiones de HC, CO, NO_x y MP siguen prácticamente constantes, mientras que las emisiones de CO₂ y SO₂ aumentan de manera considerable. Lo anterior se debe a que el CO₂ y SO₂ siguen un patrón de ventas, es decir, mientras más máquinas se importen, mayor serán las emisiones. Por otro lado, las emisiones de HC, CO, NO_x y MP son muy sensibles a cambios de tecnología, por ejemplo, para potencias entre 75 y 130 kW el cambio de tecnología de Tier 3 a Tier 4i disminuye el factor de emisión de MP en 24 veces. Por lo tanto, se puede concluir que, para las maquinarias nuevas, el aumento de emisiones de HC, CO, NO_x y MP por aumento en la flota de maquinarias, se ve compensado por una mejora tecnológica.

Si se comparan las emisiones del año base 2017 con las emisiones de todas las fuentes del país (tablas CCVC 2013), se observa que las emisiones de NO_x provenientes de MMFR corresponden a un 24% de las emisiones totales del país y a un 44% de las emisiones correspondientes a vehículos camineros de ruta, mientras que las emisiones de MP_{2,5} corresponden a un 51% de las emisiones totales del país y a un 170% de las emisiones correspondientes a vehículos camineros de ruta. Lo anterior resulta sumamente preocupante, debido a que la cantidad total de MMFR 2017 corresponde a 135.588 equipos, y si comparamos esta cantidad versus los 4.853.413 vehículos en circulación motorizados registrados por la INE en 2016, obtenemos que las MMFR corresponden solo a un 2,79% de los vehículos, por lo cual los porcentajes de emisiones indicados previamente resultan sumamente alarmantes.

Por último, al comparar las emisiones del año base 2017 con las emisiones de maquinaria pesada en faenas mineras ubicadas en la cordillera de los andes, se obtiene un valor aún más alarmante para las emisiones de NO_x, ya que corresponden a un 127% de las generadas por MMFR, y estas ya resultaban sumamente elevadas al compararlas con las tablas CCVC 2013, además las maquinarias mineras utilizadas en el trabajo de Natalia Saldaña son menor cantidad que las MMFR utilizadas en este trabajo. Cabe destacar que ciertas maquinarias destinadas a la minería están consideradas en este trabajo (entre 19 y 560 kW), y que las maquinarias que se utilizan fuera de ruta con potencia mayor a 560 kW que utiliza Natalia, no están consideradas en las tablas CCVC 2013 ni en este trabajo.

4.3 Recomendaciones

- Es necesario realizar una investigación detallada para determinar si los valores atípicos extraídos de este trabajo son realmente datos mal ingresados a las bases de datos.
- Para estimar con mayor detalle las emisiones, es necesario obtener información específica sobre las potencias nominales de las máquinas, debido a que hay ciertos tipos de equipos que se utilizan en distintos rubros y/o con distintas potencias, y en este trabajo todas aquellas maquinarias que no presentaban distinción de potencias en las bases de datos fueron englobadas en una potencia única.
- Para obtener mayor detalle sobre las tecnologías de las MMFR, pueden utilizarse todos los países de donde provienen las importaciones. En este trabajo solo se usaron 6 orígenes que abarcaban el 97% de las importaciones, pero existen más de 20 orígenes extras que corresponden al restante 3%.
- Si se quiere mayor detalle en la edad de las máquinas, las bases de datos de aduanas también indican el mes del año en el cual estas fueron importadas.
- Para trabajos futuros, se recomienda separar las maquinarias por rubro, para determinar qué área productiva es aquella que tiene mayor impacto en las emisiones contaminantes.
- Para aportar de mejor manera al mapa actualizado de emisiones, se recomienda identificar la ubicación en el país de estas maquinarias, es decir, donde operan.

Lo anterior, también serviría para poder indicar de manera más precisa el porcentaje de azufre en el combustible, debido a que las maquinarias utilizadas en la RM no utilizan el mismo combustible que aquellas que operan en el resto del país.

- Finalmente, sería interesante realizar una proyección de estos resultados a futuro, para poder ver cómo afectan las emisiones contaminantes de MMFR de Chile en el calentamiento global y el deshielo de los glaciares.

REFERENCIAS

- [1] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016:
“<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>”
- [2] NONROAD2005 User’s Guide (EPA): “<https://www.epa.gov/moves/nonroad-model-nonroad-engines-equipment-and-vehicles>”
- [3] Elaboración de Diagnóstico e inventario de Emisión para Maquinaria Fuera de Ruta, GEASUR 2013: “<http://www.geasur.cl/offroad2013.html>”
- [4] Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país, GEASUR 2014:
“<http://www.geasur.cl/offroad2014.html>”
- [5] Emisiones de contaminantes provenientes de maquinaria pesada en faenas mineras ubicadas en la cordillera de los Andes, Natalia Saldaña 2017. Memoria Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- [6] Resumen de materias sometidas al pronunciamiento del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad: “<http://portal.mma.gob.cl/consejo-de-ministros-para-la-sustentabilidad/>”
- [7] Arancel Aduanero Chileno:
“http://www.aduana.cl/aduana/site/artic/20161230/asocfile/20161230090118/pdf_introduccion.pdf”
- [8] NONROAD 2008a Technical Reports: “<https://www.epa.gov/moves/nonroad-technical-reports>”
- [9] EPA Emission Standards for Nonroad Engines and Vehicles:
“<https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-nonroad-engines-and-vehicles>”
- [10] EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013:
“<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>”
- [11] Registro de Comercio Exterior: “<http://www.aduana.cl/registros-de-comercio-exterior-datos-agregados/aduana/2017-07-21/113048.html>”
- [12] CAT (Maquinaria minera y de construcción):
“https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment.html”
- [13] John Deere (Maquinaria agrícola): “<https://www.deere.es/es/agricultura/>”
- [14] Dieselnets (Emission Standards): “<https://www.dieselnets.com/standards/>”
- [15] COPEC S.A. (Especificaciones del combustible Diésel en Chile):
<https://ww2.copec.cl/combustibles/products/diesel-ultra>

[16] *Apoyo en la iniciativa para el plan de mitigación de los contaminantes climáticos de vida corta en Chile, Estudio solicitado por la subsecretaría del medio ambiente (Chile, 2017).*

[17] INE (*Parque de Vehículos en circulación 2016*): “<http://www.ine.cl/docs/default-source/publicaciones/2017/parque-vehiculos-circulaci%C3%B3n-2016.xlsx?sfvrsn=10>”

ANEXOS

ANEXO I. Homologación Tipologías Nacionales con Internacionales (Elaboración propia).

MMFR (Descripción Aduanas)		Homologación EPA	
Grúas Autopropulsadas	Sobre Neumáticos	Grúa	
	Las demás		
Grúa Horquilla	Con motor diésel, con capacidad de levante inferior o igual a 2.000 kilos	Grúa Horquilla	
	Con motor diésel, con capacidad de levante superior a 2.000 kilos		
Bulldóceres y Angledozeres	Bulldóceres de orugas	Bulldozer	
	Angledozeres de orugas		
	Bulldóceres y Angledozeres de ruedas		
	Las demás		
Niveladoras	Motoniveladoras	Motoniveladora	
Scrapers		Scrapers	
Compactadoras y aplanadoras	Rodillos compactadores	Compactador de Rodillo	
Palas mecánicas, excavadoras, cargadoras y palas cargadoras	Cargadoras frontales	Cargador Frontal	
	Palas cargadoras de carga frontal	Minicargador	
	Excavadoras cuya superestructura puede girar en 360°	Excavadora	
	Las demás máquinas cuya superestructura puede girar en 360°	Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	
	Palas mecánicas		
	Excavadoras continuas de cuchara, garras o cangilones excavadores	Zanjadora	
	Las demás	Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	
Quitanieves		Quitanieve	
Las demás máquinas y aparatos para explanar, nivelar, traillar, excavar, compactar, aplanar, extraer o perforar tierra o minerales.	Cortadoras y arrancadoras, de carbón o rocas, y máquinas para hacer túneles o galerías	Autopropulsadas	Otros Equipos Mineros Subterráneos
		Autopropulsadas de oruga	Perforadora
	Las demás máquinas de sondeo o perforación	Las demás autopropulsadas	
	Las demás máquinas y aparatos, autopropulsados		Otros Equipos Mineros Subterráneos
Cosechadoras-trilladoras		Combinada	
Máquinas de cosechar raíces o tubérculos		Otros Equipos Agrícolas	
Máquinas para vendimiar			

MMFR (Descripción Aduanas)		Homologación EPA
Tractores	De oruga	Tractor de Oruga
	Agrícolas con motor de potencia superior a 18kW e inferior a 37kW	Tractores Agrícolas
	Los demás con motor de potencia superior a 18kW e inferior a 37kW	Tractores Fuera de Carretera
	Agrícolas con motor de potencia superior a 37kW e inferior a 75kW	Tractores Agrícolas
	Los demás con motor de potencia superior a 37kW e inferior a 75kW	Tractores Fuera de Carretera
	Agrícolas con motor de potencia superior a 75kW e inferior a 130kW	Tractores Agrícolas
	Los demás con motor de potencia superior a 75kW e inferior a 130kW	Tractores Fuera de Carretera
	Agrícolas con motor de potencia superior a 130kW	Tractores Agrícolas
	Los demás con motor de potencia superior a 130kW	Tractores Fuera de Carretera
Volquetes automotores concebidos para utilizarlos fuera de la red de carreteras	Con capacidad de carga útil inferior o igual a 30 t	Dumper
	Los demás	Dumper
Los demás vehículos para transporte de mercancías, con motor de encendido por compresión ⁶	Vehículos para el transporte fuera de carretera (de peso total con carga máxima inferior o igual a 5 t)	Camiones Fuera de Carretera
	Vehículos para el transporte fuera de carretera (de peso total con carga máxima mayor a 20 t)	Los demás (no considera camiones mineros)
		Camiones Fuera de Carretera

⁶ No se incluyen los Camiones Fuera de Carretera con carga entre 5 y 20 toneladas debido a que se registran cero importaciones de ese tipo de maquinaria en los años 2013-2017.

ANEXO II. Factores de ajuste transitorio por tipo de equipo (Fuente: NONROAD2008a Technical Reports).

Maquinaria	HC	CO	NO _x		MP		BSFC
	hasta Tier 3	hasta Tier 3	hasta Tier 2	Tier 3	hasta Tier 2	Tier 3	hasta Tier 3
Bulldozer	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Camión Fuera de Carretera	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Cargador Frontal	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Compactador de Rodillo	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Cosechadora-Trilladora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Dumper	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
Excavadora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Grúa	1	1	1	1	1	1	1
Grúa horquilla	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Minicargador	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
Motoniveladora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Otros Equipos Agrícolas	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Otros Equipos Mineros Subterráneos	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
Perforadora	1	1	1	1	1	1	1
Quitanieve	1	1	1	1	1	1	1
Scrapers	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Tractor de Oruga	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Tractor Agrícola	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Tractor Fuera de Carretera	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
Tractores/Cargadores/Retroexcavadoras	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
Zanjadora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01

ANEXO III. Retiro de maquinaria de la flota (Fuente: NONROAD2008a Technical Reports).

Edad / Vida Útil	Retiro Acumulado (%)
0,0000	0
0,0588	1
0,1694	3
0,2710	5
0,3639	7
0,4486	9
0,5254	11
0,5948	13
0,6570	15
0,7125	17
0,7617	19
0,8049	21
0,8425	23
0,8750	25
0,9027	27
0,9259	29
0,9451	31
0,9607	33
0,9730	35
0,9824	37
0,9894	39
0,9942	41
0,9973	43
0,9990	45
1,0000	50

Edad / Vida Útil	Retiro Acumulado (%)
Continuación	
1,0010	55
1,0027	57
1,0058	59
1,0106	61
1,0176	63
1,0270	65
1,0393	67
1,0549	69
1,0741	71
1,0973	73
1,1250	75
1,1575	77
1,1951	79
1,2383	81
1,2875	83
1,3430	85
1,4052	87
1,4746	89
1,5514	91
1,6361	93
1,7290	95
1,8306	97
1,9412	99
2,0000	100

ANEXO IV. Estándares de Emisión.

En este anexo se recopilan los estándares de emisión internacionales relacionados con los orígenes de las importaciones, extraídas de las bases de datos de aduanas entre los años 2014 y 2017.

EUROPA

Las normas de emisión europeas para los motores utilizados en la MMFR nueva, se han estructurado como niveles gradualmente más estrictos conocidos como estándares Stage I, II, IIIA, IIIB, IV y V.

A continuación, se presentan los estándares de emisión europeos en función de la potencia nominal de la máquina en kW y el año del modelo.

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo	Stage
$19 \leq P < 37$	2001 - 2006	II
	2007 - 2018	IIIA
	2019 +	V
$37 \leq P < 56$	1999 - 2003	I
	2004 - 2007	II
	2008 - 2012	IIIA
	2013 - 2018	IIIB
	2019 +	V
$56 \leq P < 75$	1999 - 2003	I
	2004 - 2007	II
	2008 - 2011	IIIA
	2012 - 2013	IIIB
	2014 - 2019	IV
	2020 +	V

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo	Stage
$75 \leq P < 130$	1999 - 2002	I
	2003 - 2006	II
	2007 - 2011	IIIA
	2012 - 2013	IIIB
	2014 - 2019	IV
$130 \leq P < 560$	2020 +	V
	1999 - 2001	I
	2002 - 2005	II
	2006 - 2010	IIIA
	2011 - 2013	IIIB
	2014 - 2018	IV
	2019 +	V

USA

Al igual que la normativa europea, la norma de la EPA se encuentra estructurada de forma gradualmente estricta en niveles conocidos como Tier 1, 2, 3, 4 intermedia (o de transición) y 4 final.

A continuación, se presentan los estándares de emisión norteamericanos en función de la potencia nominal de la máquina en kW y el año del modelo.

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo	Tier
$19 \leq P < 37$	1999 - 2003	1
	2004 - 2007	2
	2008 - 2012	4A
	2013 +	4
$37 \leq P < 56$	1998 - 2003	1
	2004 - 2007	2
	2008 - 2011	3
	2008 - 2012	4A
	2013 +	4
$56 \leq P < 75$	1998 - 2003	1
	2004 - 2007	2
	2008 - 2011	3B
	2012 - 2013	4A
	2014 +	4N
$75 \leq P < 130$	1997 - 2002	1
	2003 - 2006	2
	2007 - 2011	3
	2012 - 2013	4A
	2014 +	4N

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo	Tier
$130 \leq P < 225$	1996 - 2002	1
	2003 - 2005	2
	2006 - 2010	3
	2011 - 2013	4A
	2014 +	4N
$225 \leq P < 450$	1996 - 2000	1
	2001 - 2005	2
	2006 - 2010	3
	2011 - 2013	4A
	2014 +	4N
$450 \leq P < 560$	1996 - 2001	1
	2002 - 2005	2
	2006 - 2010	3
	2011 - 2013	4A
	2014 +	4N

JAPÓN

Los estándares de emisión de MMFR han sido responsabilidad de dos ministerios: MOE y MLIT. Las regulaciones de los motores fuera de carretera adoptados por estas agencias reemplazaron los estándares de emisión fuera de carretera por los antiguos ministerios MOT y MOC.

El 28 de marzo de 2006, se promulgaron regulaciones que introdujeron límites de emisión basados en los estándares Tier 3 de la EPA de USA, dichos cambios fueron implementados entre los años 2006 y 2008 para modelos nuevos. Estas regulaciones reemplazan los antiguos estándares del MOC.

En 2008, el CEC recomendó un mayor endurecimiento de las regulaciones de emisiones fuera de carretera:

- Estándares de emisión basados en las regulaciones Tier 4i de los Estados Unidos / Stage IIIB de la UE, implementadas entre los años 2011 y 2013 para equipos nuevos. Estas regulaciones fueron promulgadas en marzo de 2010.
- Estándares de emisión basados en las regulaciones Tier 4 de los Estados Unidos / Stage IV de la UE, implementados entre los años 2015 y 2016 para equipos nuevos.

Los estándares japoneses para la maquinaria nueva se resumen a continuación:

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo	Tier
$19 \leq P < 37$	2007.10 - 2013.09	3
	2013.10 +	4i
$37 \leq P < 56$	2008.10-2013.09	3
	2013.10 +	4i
$56 \leq P < 75$	2008.10 - 2012.09	3
	2012.10 - 2015	4i
	2016 +	4
$75 \leq P < 130$	2007.10 - 2012.09	3
	2012.10 - 2015	4i
	2016 +	4
$130 \leq P < 560$	2006.10 - 2011.09	3
	2011.10 - 2014	4i
	2015 +	4

CHINA

China adopta estándares de emisión para MMFR que se basan en las regulaciones europeas. Algunos de los pasos reglamentarios importantes incluyen:

- Stage I / II: las primeras normas de emisión (Stage I) se adoptaron en 2007, mientras que las normas de emisión Stage II se adoptaron en 2009.
- Stage III / IV: los estándares Stage III fueron efectivos desde octubre de 2014 para maquinaria nueva y desde octubre de 2015 para todos los motores. Las fechas de vigencia para los estándares Stage IV aún no se han establecido.

COREA DEL SUR

Los estándares coreanos de emisiones para la MMFR nueva, se basan en las regulaciones de USA. Los motores utilizados en equipos de construcción se han regulado desde 2004. Las emisiones de los motores utilizados en maquinaria agrícola están reguladas desde 2013.

Los primeros estándares de emisión fuera de carretera entraron en vigencia en 2004/2005, con base en los estándares Tier 1 / Tier 2 de USA, respectivamente.

Los estándares de emisión basados en Tier 3 de USA, entraron en vigor en 2009 para maquinaria de construcción y en 2013 para equipos agrícolas.

Los estándares basados en Tier 4 entran en vigencia a partir de 2015. Estos límites de emisión se basan en Tier 4 final: se saltó el nivel intermedio de Tier 4 de USA.

BRASIL

En julio de 2011, CONAMA adoptó la Resolución 433/2011 que limita las emisiones de escape y el ruido de la maquinaria nueva de construcción y de la agrícola. Conocido como PROCONVE MAR-I, es la primera legislación que regula las emisiones de maquinaria móvil fuera de carretera en Brasil. Establece límites equivalentes a Tier 3 USA y Stage IIIA EU para emisiones de motores diésel fuera de carretera.

Los límites de emisión MAR-I se introducen gradualmente entre 2015 y 2019. Las fechas de implementación dependen de la categoría de potencia y el tipo de maquinaria (construcción o agrícola), como se muestra a continuación:

Potencia Nominal (kW)	Año Modelo		Tier
	Construcción	Agrícola	
$19 \leq P < 37$	2017.01	2019.01	3
$37 \leq P < 56$	2015.01	2019.01	3
$75 \leq P < 130$	2015.01	2017.01	3
$130 \leq P < 560$	2015.01	2017.01	3