

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y Climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 1

Análisis exploratorio de estrategias de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos en maquinaria móvil no de carretera en Colombia

Yoan Andrés Ocampo Olmos

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Bogotá, Colombia

2020

Análisis exploratorio de estrategias de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos en maquinaria móvil no de carretera en Colombia

Yoan Andrés Ocampo Olmos

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

Ing. Juan Felipe Méndez Espinosa, MSc

Línea de investigación:

Gestión y manejo ambiental y biotecnología

Semillero/Grupo de Investigación:

BioSIG/COBIDES

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Bogotá, Colombia

2020

Dedicatoria

Gracias a Dios por concederme la mejor de las familias

Dedico de manera muy especial este logro a mi madre Delia Consuelo Ocampo, a mis hermanas Jennifer Alejandra Silva, Laura Yazmin Ocampo y Talia Tatiana Bustos, pues ellas fueron quienes crearon en mi los principales cimientos para la construcción de mi vida profesional, en especial a mi madre quien sentó en mi las bases de responsabilidad y deseos de superación, en ella tengo el espejo en el cual me quiero reflejar, pues sus virtudes infinitas y su gran corazón me llevan a admirarla cada día más.

A Diana Milena Forero, Jessica Escobar, Fabian Sneider Cortes, Sindy Yulay Gómez, Jennifer Tunjasipa y a todos mis demás amigos y compañeros que sin nombrarlos sé que estuvieron en cada proceso educativo y personal en el que me he forjado y que cada día me construye. Sé que todos ustedes también lograrán sus objetivos y metas, las cuales celebrare con la mayor de las alegrías.

A todos en general, sepan que no hay palabras para expresar el aprecio, amor y cariño que les tengo.

Agradecimientos

A quien en primer lugar quiero agradecer es a Dios por la vida que me ha dado, se que sin el nada de lo que he logrado hubiera sido posible, a mi director de proyecto Juan Felipe Méndez y a la Universidad, pues sin su especial contribución de conocimientos no hubiera sido posible este logro.

A mi familia, por enseñarme a ser persona antes de ser profesional, sé que como ser humano debo aprender miles de cosas y con su ayuda estaré orientado a la realización de mis sueños. Agradezco en especial a mis amigos pues realmente Dios me ha dado los mejores, pues siempre estuvieron ahí dándome motivación, alegría y fuerza.

A mis trabajo, compañeros de trabajo y superiores, quienes me dieron el tiempo para dedicarme a construir esta meta que tanto anhele.

En general a todos aquellos que durante cinco años de carrera me regalaron desinteresadamente, sus conocimientos, alegrías y tristezas, para que lograra este sueño que hoy se hace realidad.

Gracias, infinitas gracias.

Resumen

La maquinaria móvil no de carretera (MMNC) utilizada para actividades de construcción, industria o agricultura contribuye en las emisiones atmosféricas asociadas a efectos negativos en salud pública y en el sistema climático. En Colombia se han reglamentado los niveles máximos permisibles de emisión para fuentes móviles de carretera (v.g., automóviles, buses) con el fin de reducir la contaminación atmosférica, sin embargo, no se han tenido en cuenta para fuentes móviles no de carretera. En la presente investigación se realizó un análisis de dos estrategias para la reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos asociados a MMNC. Estas estrategias estuvieron encaminadas a evaluar el porcentaje de cambio de emisiones atmosféricas por (1.) disminución en los niveles de azufre en el combustible diésel, y (2.) aplicando un cambio en los niveles tecnológicos (Tier). Este análisis se estableció para diferentes tipologías contempladas como MMNC, contemplando las guías metodológicas de la Agencia para la Protección Ambiental de los estados Unidos (EPA) y la agencia europea de medio ambiente (EEA) para estimación de HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC. Se concluye que el cambio en los niveles tecnológicos es la estrategia con mayor impacto positivo debido a reducciones de más de un 40% en contaminantes atmosféricos - climáticos.

Palabras clave: Fuentes móviles no de carretera, contaminación atmosférica, contaminantes climáticos de vida corta, mitigación de contaminantes climáticos.

Abstract

Non-road mobile machinery (NRMM) used for construction, industrial or agricultural activities contributes to atmospheric emissions associated with negative effects on public health and the climate system. In Colombia, the threshold emission levels for road-mobile sources (e.g., cars, buses) have been regulated to reduce air pollution, however, they have not been considered for NRMM. In this research, an analysis of two strategies was carried out to reduce emissions of atmospheric pollutants associated with NRMM. These strategies assess the percentage change in atmospheric emissions: (1.) decreasing sulfur levels in diesel fuel, and (2.) applying a change in technological levels (Tier). This analysis was established for different NRMM typologies. The methodological guides of the Environmental Protection Agency (EPA) and the European Environment Agency (EEA) were considered for the estimation of HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, and BC. It is concluded that the change in technological levels is the strategy with the greatest positive impact due to reductions of more than 40% in atmospheric and climatic pollutants.

Keywords: Non-road mobile sources, air pollution, short-lived climate pollutants, climate pollutant mitigation.

Lista de Símbolos y Abreviaturas	10
Introducción	12
Objetivos.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
Marco Teórico.....	16
Fuentes de emisión.....	16
Factores de emisión.....	17
Contaminantes Atmosféricos.....	17
Contaminantes Climáticos directos asociados a MMNC.....	20
Combustible.....	22
Maquinaria móvil no de carretera (MMNC).....	23
Cronología de estándares de regulación de emisiones.....	29
Metodología	30
Estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos por segmento de MMNC	30
Paso 1. Información inicial para el cálculo de emisiones.....	31
Paso 2. Estimación de factores de emisión para HC, CO y NO _x	34
Paso 3. Estimación de factores de emisión para PM ₁₀ , PM _{2,5} y BC	38
Paso 4. Estimación de factores de emisión para CO ₂	40
Paso 5. Estimación de factores de emisión para SO ₂	41
Conceptualización general para el cálculo de la variación porcentual asociado a dos estrategias de reducción de emisiones de MMNC.....	42
Discusión de resultados.....	49
Análisis del resultado de la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos - climáticos asociado a la disminución del nivel azufre en el combustible Diésel utilizado en diferentes tipologías de MMNC.....	49
Análisis del resultado de la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos - climáticos asociados a la variación en los niveles tecnológicos del motor en diferentes tipologías maquinaria móvil no de carretera (MMNC).....	54
Conclusiones	63
Recomendaciones	65
Bibliografía	67
ANEXOS	72
Muestras de cálculo.....	72
Detalle de maquinaria móvil no de carretera (MMNC).....	87
Variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos – climáticos asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.....	93
Variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos – climáticos asociados a la variación en los niveles tecnológicos de (Tier 2 a Tier 3 y Tier 4IA) y (Tier 3 a Tier4IA) del motor en diferentes tipologías de maquinaria móvil no de carretera (MMNC).....	99
Lista de figuras	

Figura 1. Estándar de emisiones de MMNC por año y rango de potencia (Pot) en países de mayor exportación a Colombia.	44
Figura 2. Variación porcentual (%) de SO ₂ para todas las tipologías de MMNC en función de la reducción de la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel.....	52
Figura 3. Incrementos y reducciones de la variación porcentual generada de los contaminantes HC, CO, NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , y BC para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel.	58
Figura 4. Reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de HC, CO, NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , y BC, para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel.	59
Figura 5. Reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de SO ₂ , para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel.	60
Figura 6. Incrementos, reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de HC, CO, NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , y BC, para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel.....	61

Lista de tablas

Tabla 1. Concentración de azufre máximo en combustible Diésel.....	31
Tabla 2. Características de actividad, carga y potencia para maquinaria de estudio.	33
Tabla 3. Factor de ajuste transitorio (FAT) para la maquinaria objeto de estudio.	35
Tabla 4. Factor de deterioro relativo A_c	37
Tabla 5. Estándar de emisiones (Tier) para Colombia respecto de USA con retraso tecnológico de 13 Años.	43
Tabla 6. Reducción de azufre establecido para combustible Diésel.	45
Tabla 7. Estándar de emisiones asumido y mejora tecnológica propuesta.	46
Tabla 8. Algunas variaciones porcentuales (disminución) más significativas de PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC y SO_2	53
Tabla 9. Variación del estándar de emisiones en función del retraso tecnológico y concentración de azufre para cálculo de la variación porcentual.	55
Tabla 10. Cantidad mínima y máxima de los contaminantes HC, CO, NO_x , PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO_2 , y BC en toneladas generadas para 1000 und de MMNC a partir de las primeras variaciones de estándar de emisiones y niveles de azufre en el combustible diésel.....	56
Tabla 11. Autohormigonera: MMNC objeto de estudio para la estimación de emisiones y variación porcentual de contaminantes atmosféricos y climáticos.	72
Tabla 13. Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NO_x , PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO_2 , y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.	93
Tabla 14. Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NO_x , PM_{10} , CO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.....	99
Tabla 15. Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NO_x , PM_{10} , CO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.....	105

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
g	Gramos
HP	Potencia (Horse Power)
hr	Hora
Ton	Tonelada
kW	Kilo Vatio
g/kW-hr	Gramos/Kilo Vatio por hora

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MMNC	Maquinaria Móvil No de Carretera
FEss	Factor de Emisión de Maquinaria MMNC en prueba estática
FAT	Factor de Ajuste Transitorio
FEc	Factor de emisión de un Contaminante específico
Spmadj	Ajuste por contenido de azufre comercial en el combustible
FD	Factor de Deterioro
Ac	Factor de Deterioro Relativo
BSFC	Consumo específico de combustible de MMNC en prueba estática
BSFCadj	Consumo específico de combustible ajustado
soxcnv	Gramos de azufre en PM/gramos de azufre en combustible consumido.
Soxbas	Contenido de azufre usado en el combustible para la determinación de factor de emisión para vehículo nuevo [%].
Soxdsl	Contenido de azufre en el combustible comercial [%].
PM	Material particulado según diámetro aerodinámico (PM ₁₀ , PM _{2.5})

HUg	Nivel de actividad
PNg	Potencia nominal promedio
Ec	Total de emisiones de un contaminantes especifico
Ng	Número de unidades de MMNC
EPA	Agencia de protección ambiental por sus siglas en ingles
EEA	Agencia europea del medio ambiente por sus siglas en ingles

Fórmulas químicas

Fórmula	Término
CO	Monóxido de carbono
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
SO ₂	Dióxido de azufre
HC	Hidrocarburo

Introducción

Los niveles de contaminación del aire son peligrosamente altos en muchas partes del mundo, de acuerdo con los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se muestra que 9 de cada 10 personas respiran aire que contiene altos niveles de contaminantes. Estas estimaciones muestran que cada año por la contaminación del aire externo y dentro de las viviendas mueren 7 millones de personas en el mundo (OMS, 2018). De acuerdo a estas estadísticas Colombia se sitúa en Latinoamérica como el segundo país con mayor contaminación del aire, en donde la tasa de mortalidad se posiciona en promedio en 19.000 muertes anuales en todo el territorio (Ministerio de Ambiente, 2012). Estos niveles han sido regulados bajo normativas que buscan reducir la contaminación atmosférica para fuentes fijas y móviles de carretera, sin tener en cuenta que para fuentes móviles no de carretera como MMNC en Colombia actualmente no existe.

Actualmente se establecen los objetivos de desarrollo sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el cual enumera 17 objetivos en donde 8 de ellos son un lazo entre el medio ambiente, bienestar y calidad de vida, siendo el objetivo 13 “Acción por el clima” un objetivo estrechamente relacionado con fuentes que emiten contaminantes atmosféricos y climáticos. Hoy los contaminantes climáticos son un 50% superior al nivel de 1990, en donde las pérdidas anuales mundiales causadas solo por catástrofes relacionadas con el desbalance climático y variabilidad climática alcanzan los cientos de miles de millones de dólares, sin mencionar el impacto humano de las

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y 13
climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

catástrofes geofísicas donde el 91% se relacionan con el clima (PNUD - ODS 13, 2015).

Un factor importante que también describe el objetivo 13 es que para que se fortalezca la reducción de carbono las emisiones mundiales de CO₂ deben disminuir un 45% entre 2010 y 2030 a fin de lograr este objetivo (PNUD - ODS 13, 2015). A nivel mundial se necesitarán diferentes estrategias como la que se presenta en el presente proyecto para disminuir la emisión de contaminantes climáticos y atmosféricos que se relacionan con lluvia acida, el derretimiento de los polos, la modificación de los hábitats, la disminución de la población de algunas especies, etc.

Establecer límites de emisión para contaminantes atmosféricos-climáticos (HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, BC) es necesario para promover la garantía de derechos fundamentales como la vida. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha elaborado varias normas para establecer los límites de control de la contaminación atmosférica, siendo la resolución 2254 de 2017 la más actual enfocada en la calidad del aire en el territorio nacional. Esta norma establece los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃, y CO), contaminantes tóxicos (incluyendo los HC), sin embargo, no establece límites para CO₂ y BC explícitamente, a pesar de que se menciona en el Art.2 Parágrafo 4, que las autoridades ambientales competentes podrán monitorear las concentraciones en la atmosfera de BC y otros contaminantes climáticos.

Teniendo en cuenta que actualmente no existen estrategias que contribuyan a la disminución de contaminantes atmosféricos asociados a la MMNC, y basados en el

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 14

impacto que tienen las altas concentraciones de estos contaminantes en el medio ambiente y la salud humana, la presente propuesta busca estimar el cambio porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos a partir de la implementación de dos propuestas de reducción: (1.) disminución en los niveles de azufre en el combustible diésel, y (2.) aplicando un cambio en los niveles tecnológicos (Tier). Así las cosas, se planteó una pregunta objeto de análisis: ¿Cuál es el porcentaje de cambio al implementar dos diferentes estrategias de reducción de contaminantes atmosféricos-climáticos en diferentes tipologías de MMNC?

Finalmente a partir de la realización del presente proyecto de investigación, es de destacar que los conocimientos adquiridos por el autor contribuyeron en gran manera a apreciar más el significado de protección y conservación del medio ambiente. Partiendo de la profundización de los temas más relevantes que pueden afectar el medio que rodea al ser humano, como lo es la contaminación atmosférica. Puesto que bajo este principio se obtuvo la motivación para dar como resultado el trabajo que será expuesto a continuación.

Objetivos

Objetivo general

Analizar dos estrategias de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

Objetivos específicos

1. Calcular la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos-climáticos asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel utilizado en diferentes tipologías de maquinaria móvil no de carretera
2. Calcular la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos-climáticos asociados a la variación en los niveles tecnológicos del motor en diferentes tipologías de maquinaria móvil no de carretera

Marco Teórico

Fuentes de emisión.

Los contaminantes atmosféricos pueden provenir de emisiones ya sea por actividades antropogénicas como la quema de combustibles para generación energética, transporte, industria, vivienda, quema de biomasa (J. Mendez; L. Belalcazar; R. Betancourt, 2019), agricultura, tratamiento de residuos, etcétera, o fuentes naturales como erupciones volcánicas, polvo del Sahara (Felipe Méndez et al., 2014), sal de mar, compuestos orgánicos volátiles de las plantas, entre otros (Andrés Guevara et al., 2018).

Emisión de Fuentes móviles.

Las emisiones por fuentes móviles se producen por la quema de combustibles fósiles utilizados por el parque automotor ya que los vehículos automotores son los principales emisores de contaminantes como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, dióxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (IDEAM, 2020). Las fuentes móviles pueden clasificarse en:

- **Fuentes móviles de carretera:** Estas se refieren a las emisiones de vehículos livianos y pesados que circulan dentro de carretera, con fuente de combustible diésel, gasolina y otros, entre los más representativos se encuentran, autobuses, vehículos de pasajeros, taxis, tracto camiones y vehículos de carga mayores de 3.8 toneladas, motocicletas, vehículos de transporte público, entre otros (L.A. Giraldo & E. Behrentz, 2016).

- **Fuentes móviles no de carretera:** Las fuentes móviles que no circulan por carreteras incluyen todo el equipo automotor o portátil cuya operación en caminos públicos está prohibida, o que su función principal no es el transporte de pasajeros en carretera (v.g., aviación nacional e internacional, transporte marítimo y fluvial, militar, maquinaria móvil no de carretera) (INEM, 1999). La maquinaria móvil no de carretera (MMNC) se ha limitado a equipos utilizados en actividades industriales, de construcción, y agrícolas.

Factores de emisión.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (EPA, 2018b), define el Factor de Emisión (FE) como un valor que relaciona la cantidad de contaminante liberado a la atmosfera con una cantidad asociada con la generación y liberación del contaminante (actividad). Pueden ser obtenidos de mediciones directas, bases de datos, censos, etcétera, y son expresados en términos de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante (EPA, 2018b).

Contaminantes Atmosféricos.

- **Material Particulado menor a 10 micras (PM₁₀) y menor a 2.5 micras (PM_{2.5}):** El PM son partículas sólidas o líquidas presentes en el aire que tienen la capacidad de penetrar las vías respiratorias. Existe plena evidencia científica de la relación entre la presencia de éstas con enfermedades respiratorias y cardíacas. Los más afectados son la población sensible (niños menores de 5 años y personas de la tercera edad) y su peligrosidad depende del tamaño y las sustancias que se adhieren a

su superficie. Se clasifican en PST (partículas suspendidas totales), partículas con diámetro menor a 10 μm (PM_{10}) y con diámetro menor a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). La inhalación de PM puede inflammar las partes más pequeñas del sistema respiratorio, provocando la exacerbación del asma o de bronquitis crónica. En el momento de una inflamación, se corre el riesgo de padecer hipercoagulabilidad transitoria (WHO, 2005). Las partículas con diámetro menor a 2.5 μm son aún más peligrosas pues pueden alcanzar las partes más pequeñas de los pulmones, de aquí que la acción natural de limpieza del cuerpo no pueda ser llevada a cabo y se necesite de intervención quirúrgica. Otros problemas a la salud incluyen muerte prematura en las personas con problemas cardíacos o pulmonares, ataques al corazón, arritmia cardíaca, asma, aumento en problemas respiratorios como irritación de las vías respiratorias, tos y dificultad para respirar (EPA, 2013b).

- **Monóxido de Carbono (CO):** El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro que a muy bajas dosis es uno de los contaminantes más peligrosos para la salud. En un centro urbano el 56% de las emisiones provienen del transporte. Está asociado a la formación de carboxi-hemoglobina (COHb), una condición en la que la hemoglobina es más afín con el CO que con el oxígeno. Al estar presente el CO en la sangre, la hemoglobina no puede transportar oxígeno para las condiciones vitales y por lo tanto creará un déficit de éste en la sangre. En niveles por debajo de 10% de COHb se producen mareos, dolor de cabeza y vómito. Para niveles con más del 40%

de COHb, el monóxido empieza a causar coma neurológico y colapso en el sistema nervioso y a más del 60% causa la muerte (EPA, 2013a).

- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** El dióxido de nitrógeno es un gas traza que se caracteriza por la absorción de la radiación solar visible que causa disminución de la visibilidad, contribuye al cambio climático al ser precursor de gases de efecto invernadero. En conjunto con el óxido nítrico se convierte en un regulador de la capacidad oxidativa de la troposfera e incide directamente en la concentración de ozono troposférico. Altas concentraciones de este contaminante generan alteraciones en los mecanismos de la función respiratoria, edemas y enfisemas pulmonares, así como vulnerabilidad a las infecciones bacterianas y virales (Orjuela, 2018).

- **Dióxido de Azufre (SO₂):** Es un gas estable que se produce por la quema de combustibles. En un centro urbano, el 67% de las emisiones vienen de las generadoras de energía y el 18% del sector industrial. La contribución del sector transporte a las emisiones mundiales de SO₂ se estiman entre 2% y 6% (Banco Mundial, 1997). Es un gas irritante, que afecta a las partes superiores de las vías respiratorias y está asociado con la disminución en el funcionamiento pulmonar. La OMS determinó que los efectos mortales están entre 500 µg/m³ por un tiempo de exposición de 24 horas y una morbilidad respiratoria en ambientes con exposiciones superiores a 250 µg/m³ (Ramírez et al., 2013).

- **Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs):** Comprenden una amplia gama de hidrocarburos (HC) que se originan por una combustión incompleta en

calderas, hornos o fuentes móviles o por fugas en los sistemas de transporte de combustibles líquidos o gaseosos, así como en los motores diésel de camiones y buses. Durante la combustión se produce la vaporización de los compuestos volátiles de bajo peso molecular por efecto de alta temperatura y el cracking térmico de los compuestos pesados. Estos últimos se transforman en hidrocarburos más livianos. Este proceso es beneficioso para obtener una buena combustión, pero si el tiempo de residencia, la relación aire combustible o la temperatura dentro del hogar no son adecuadas, parte de estos compuestos no se alcanza a quemar, emitiéndose a la atmósfera. Algunos compuestos orgánicos generados en la combustión son tóxicos y algunos como el benceno, son cancerígenos, al estar las personas expuestas a estos contaminantes durante largos períodos. Usualmente las emisiones de compuestos orgánicos peligrosos son muy pequeñas, por lo que su principal efecto es que son precursores del ozono (Metrogas, 2020)

Contaminantes Climáticos directos asociados a MMNC.

- **Dióxido de carbono (CO₂):** El dióxido de carbono es uno de los gases traza más comunes e importantes en el sistema atmósfera-océano-Tierra, es el más importante Gas Efecto Invernadero (GEI) asociado a actividades humanas y el segundo gas más importante en el calentamiento global después del vapor de agua. Este gas tiene fuentes antropogénicas y naturales. Dentro del ciclo natural del carbono, el CO₂ juega un rol principal en un gran número de procesos biológicos. En

relación con las actividades humanas el CO₂ se emite principalmente, por el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo y sus derivados y gas natural) y leña para generar energía, por la tala y quema de bosques (IDEAM, 2007). La exposición a corto plazo de CO₂ a niveles por debajo del 2% (20,000 partes por millón o ppm) no ha reportado provocar efectos nocivos. Concentraciones más altas pueden afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central (Gutiérrez et al., 2016). Altas concentraciones de CO₂ pueden desplazar oxígeno en el aire, resultando en concentraciones de oxígeno menores para la respiración. Por lo tanto, los efectos de la deficiencia de oxígeno pueden combinarse con efectos de toxicidad de CO₂, sin embargo, estos pueden ser reversibles (CDC - NIOSH, 1996).

- **Black Carbon o carbón negro (BC):** El Black Carbón es uno de los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), junto con el ozono troposférico, el metano y los hidrofluorocarbonos (HFC) (Ministerio de Ambiente, 2018) . Generado a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles o biomasa, se trata de un componente de material particulado fino (PM_{2.5}, por sus siglas en inglés) que permanece durante un periodo de tiempo relativamente corto en la atmósfera, a diferencia de gases como el CO₂ (Ministerio de Ambiente, 2018). El BC, presente en el aire que respiramos, provoca importantes efectos negativos sobre la salud, ya que por su pequeño tamaño estas partículas son inhaladas por el ser humano y pueden afectar directa o indirectamente al sistema pulmonar y los bronquiolos e

incrementar el riesgo de padecer infecciones respiratorias, contribuyendo a aumentar la tasa de muertes prematuras y de numerosas enfermedades respiratorias y cardiovasculares registradas a nivel mundial. Asimismo, estas partículas son consideradas por la Comisión Europea como la primera causa de muerte prematura en materia medioambiental. En lo que respecta al cambio climático, pese a su corta permanencia en la atmósfera, este elemento presenta un poder de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) muy alto (Rypdal et al., 2009), mediante la absorción de radiación solar, que vuelven a emitir en forma de calor (FactorCO₂, 2014).

Combustible.

- **Diésel:** Es un hidrocarburo líquido que tiene una densidad aproximada de 850 kg/m³ y está compuesto fundamentalmente de hidrocarburos saturados o parafinas en un 75%, por un 25% de hidrocarburos aromáticos. Dentro del primer grupo, tenemos las isoparafinas y cicloparafinas, mientras que, dentro del segundo grupo, tenemos los naftalenos y los alquilbencenos. Aproximadamente el 81% del gasoil es carbono. La fórmula química más común es C₁₂H₂₆ (12 átomos de carbono por 26 de hidrógeno) (Castillo Grupo, 2019).

- **Azufre en combustibles:** El azufre es un componente natural del petróleo crudo y en consecuencia se encuentra tanto en la gasolina como en el diésel. Cuando estos combustibles son quemados, el azufre se emite como bióxido de azufre (SO₂) o como partículas de sulfatos. Cualquier reducción en el contenido de azufre en los

combustibles disminuye las emisiones de estos compuestos y cuando este contenido disminuye más allá de cierto punto, el beneficio aumenta hasta una disminución importante de las emisiones totales de contaminantes (Dallmann & Menon, 2016).

Maquinaria móvil no de carretera (MMNC)

Este tipo de maquinaria posee diferentes denominaciones según el país de análisis o proyecto investigativo. Este proyecto usa el nombre de maquinaria móvil no de carretera (MMNC), que incluye equipos del sector industrial, agrícola y de construcción en Colombia según la Unión Europea (Diario Oficial De la Unión Europea, 2016; Felipe Mendéz Espinoza & Morales Betancourt, 2020).

Puesto así, es importante aclarar que en Colombia la resolución número 1111 de 2013, menciona la MMNC (Nonroad) como:

“Maquinaria o vehículos NONROAD: Se refiere a cualquier máquina móvil, equipo industrial transportable o cualquier vehículo con o sin carrocería, que no ha sido diseñado para el transporte de pasajeros o carga en carretera, en el cual se ha instalado una máquina de combustión interna. Esta definición incluye, pero no está limitada a las máquinas instaladas en: Plataformas industriales de perforación, compresores, entre otros, equipos de construcción, incluyendo motoniveladoras, tractores, excavadores hidráulicos, cargadores, entre otros, equipos agrícolas, trilladoras, entre otros. equipos para la silvicultura, vehículos agrícolas auto-propulsados, equipos para el manejo de materiales, camiones para cargar y levantar, equipos de mantenimiento de carretera, equipos para limpieza de nieve, equipos para el soporte terrestre en los aeropuertos,

Ascensores, Grúas móviles. Cuatrimotos. Los equipos que no están incluidos en esta definición son los barcos, las locomotoras, los aviones y los equipos de generación.”

(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013)

Las actividades de construcción, agrícolas e industriales generan emisiones ya sea por el movimiento en tierras y materiales (partículas suspendidas o polvo), o por la combustión de los motores de la maquinaria durante la excavación, perforación y movimientos de tierras, principalmente (Sneider Galindo Ruiz & Duван Silva Nuñez, 2016). A continuación, se expone una breve descripción del tipo de maquinaria diésel más utilizada para las tres industrias o actividades mencionadas:

- **Miniexcavadoras y excavadoras:** Se utilizan para el movimiento, cargue de tierra y extracción de material de suelo. Su denominación depende del tamaño del motor que puede ir de 13 HP a más de 600 HP. El sistema de desplazamiento es de oruga (cadena) o ruedas, teniendo la posibilidad de intercambiar accesorios como cucharas, martillos, pulverizadoras, trituradoras, pinzas, etcétera, dependiendo de la necesidad de la actividad (Orjuela, 2018).
- **Grúas:** Esta maquinaria puede ser móvil o fija, utilizadas para el transporte de material y actividades de perforación, la fuente energética puede ser diésel o electricidad. La potencia del motor oscila entre los 130 y 670 HP, dependiendo del modelo (Orjuela, 2018).
- **Motoniveladoras:** Son utilizadas para nivelación de superficies y movimiento de tierras, se desplazan sobre ruedas, cuenta con una cuchilla central

graduable que raspa el terreno, la potencia del motor oscila entre 50 y 938 HP

(Orjuela, 2018).

- **Camiones y volquetas:** Estos generalmente son usados en las canteras para el transporte de grandes volúmenes de material, cuentan con restricción para su movilización en carreteras, estando catalogados como vehículos pesados. La potencia del motor oscila entre los 350 y 670 HP (Orjuela, 2018).

- **Buldóceres:** Utilizados principalmente para demolición y movimiento de tierra, se desplazan sobre orugas (cadenas); la potencia del motor puede superar los 330 HP (Orjuela, 2018).

- **Tractores:** Se utilizan para el transporte en general de materiales de construcción o de carga pesada de material. La potencia del motor va desde los 33 HP hasta 200 HP (Orjuela, 2018).

- **Cargadores y minicargadores:** Estos pueden movilizarse sobre orugas o ruedas, la función principal es el transporte de material de excavación, aunque cuentan con accesorios o dispositivos intercambiables como cucharas, taladros, cortadores, pinzas, etcétera. Los minicargadores tienen una potencia de motor entre 20 y 55 HP, mientras que los medianos pueden tener motores de hasta 335 HP (Orjuela, 2018).

- **Retroexcavadoras:** Son una combinación entre excavadoras hidráulicas y cargadores, pudiendo desplazarse sobre orugas o ruedas, se componen de brazos

articulados y baldes de excavación. Cuentan con motores entre los 13 y 174 HP

(Orjuela, 2018).

- **Autohormigoneras:** Son camiones que llevan montada una cuba giratoria, por lo general de eje inclinado, y que se utilizan para transportar el hormigón fabricado en una central de hormigonado a largas distancias, a la vez que se mantiene el amasado de la mezcla, que en el caso de centrales dosificadoras se reserva a la autohormigonera. Sus capacidades son de varios metros cúbicos, siendo utilizadas las más pequeñas en aquellos puntos donde el acceso o la dificultad de maniobra las hace aconsejables. Descargan mediante canaletas directamente o a bombas de hormigón para su puesta en obra. (Diccionariodelaconstruccion.com, 2019)

- **Dumpers:** Los camiones con volquete o también conocidos como Dumpers, son vehículos autopropulsados con caja abierta, muy resistentes y potentes. Un dumper consta de un volquete, tolva o caja basculante, para su descarga, bien hacia delante o lateralmente, mediante gravedad o de forma hidráulica. Además, posee una tracción delantera o de doble eje, siendo las traseras direccionales. Se adaptan a ciclos de trabajo largos y se utilizan para realizar grandes movimientos de tierra en canteras, túneles y obras. (maximdomenech.es, 2020).

- **Manipuladores o montacargas:** Se llama manipulador o montacargas a todas las carretillas elevadoras o máquinas que se desplazan por el suelo, de tracción motorizada, destinadas fundamentalmente a levantar, transportar y ubicar cargas.

Estas máquinas generalmente se utilizan en los campos agrícolas, industriales y hasta en el sector de construcción. Algunas están provisionadas por un brazo telescópico el cual le permite elevar o recoger la carga deseada, para moverla a un punto escogido. (Desarrolloing.com.co, 2020).

- **Perforadoras:** Las perforadoras o máquinas de perforación son herramientas que se utilizan en las obras para abrir agujeros en una superficie, de diámetro y profundidad variables. Según el tipo de perforación que se vaya a realizar, existen máquinas de diferentes características que se adaptan a sus funcionalidades. Así, las perforadoras de pozos suelen ser perforadoras hidráulicas y se caracterizan por su alto potencial de avance. Pueden tener diferentes tipos de mecanismos de percusión, pues han de estar preparadas para los diferentes tipos de materiales que se encuentran en la tierra a medida que se profundiza. Las perforadoras de hormigón suelen ser de pequeño tamaño, pues su uso se suele limitar a la realización de agujeros en paredes, suelos, techos y anclajes de hormigón. (Logismarket.com.ar, 2020a)

- **Piloteadora:** Las piloteadoras o pilas de cimentación son elementos constructivos de tipo puntual, usados para la cimentación profunda en obras de construcción, que permiten transmitir las cargas de la estructura hasta capas de suelo más profundas que tengan la capacidad de carga suficiente para soportarlas. Son máquinas diseñadas y construidas para el montaje o instalación de pilotes en terrenos donde la capacidad del suelo es insuficiente para soportar estructuras, su uso se limita

única y exclusivamente a la tarea para la cual fue diseñada: perforar o hincar pilotes, ya sean de concreto prefabricado, de tubos de acero o de madera. (Alfo.com.mx, 2020)

- **Plataforma telescópica:** Las plataformas telescópicas son elevadores con un habitáculo para el operario, que permiten trabajar a gran altura en condiciones de seguridad. Los más habituales son los modelos de elevador telescópico, una máquina totalmente móvil que lleva un brazo telescópico con una plataforma que sube hasta la altura deseada. La longitud del brazo es la que determina hasta dónde puede trabajar, de modo que hay modelos de diferentes longitudes. Los elevadores telescópicos llevan elementos de seguridad para el trabajador, y también sistemas de sujeción para evitar que se mueva la plataforma. (Logismarket.com.ar, 2020b)

- **Trituradoras:** Una trituradora de mandíbula es una trituradora de tipo de compresión, que consta de una mandíbula fija y una móvil ubicada en forma de (V). La mandíbula móvil comprime el material contra la mandíbula fija para triturarlo hasta lograr el tamaño deseado. Las trituradoras de mandíbula se usan principalmente en la primera etapa del proceso de reducción del material en varias aplicaciones, incluidas canteras de rocas, arena y gravilla, minería, reciclaje de demolición y construcción, agregados para la construcción, metalurgia y la industria química. (Es.telsmith.com, 2020)

- **Zanjadoras:** Son máquinas utilizadas para la apertura rápida de zanjas continuas a campo abierto, el ensanche de carreteras y caminos, y las cimentaciones.

Son palas mecánicas que arrancan la tierra de manera regular, abriendo zanjas del tamaño deseado y con buen acabado en el fondo y los laterales. Esto facilita que puedan instalarse dentro tuberías para diversos usos. Actúan en todo tipo de terreno excepto la roca.(Construmatica.com, 2020)

El detalle de este tipo de maquinaria y otros equipos se detalla en el **ANEXO B**.

Cronología de estándares de regulación de emisiones

Con el propósito de controlar las emisiones de contaminantes de MMNC, la EPA estableció estándares de emisión para los motores en Estados Unidos. Dependiendo del tipo de tecnología implementada se categoriza en un nivel tecnológico Tier (EPA, 2017).

- **Tier 1:** Adoptado en el año 1994, contiene los estándares para control de emisiones de equipos de más de 50 HP.
- **Tier 2:** Adoptado en el año 1998, contiene adicionalmente información sobre equipos marinos por encima de 30 litros por cilindro y equipos recreacionales de más de 50HP.
- **Tier 3:** Adoptado en el año 1998 con modificación en el 2007. Esta reglamentación incluye correcciones técnicas para motores diésel y asistencia técnica para producción de equipos de tecnología Tier 3.
- **Tier 4:** Esta regulación fue adoptada en el año 2004, incluye estándares para todos los tamaños de motor diésel fuera de carretera y contenido de azufre en el combustible.

Metodología

Se evaluó el cambio porcentual de las emisiones atmosféricas usando 2 estrategias generales: (1.) disminución en los niveles de azufre en el combustible diésel, y (2.) aplicando un cambio en los niveles tecnológicos (Tier). Este análisis se realizó para diferentes tipologías de MMNC, contemplando las guías metodológicas de la agencia ambiental de los estados Unidos (EPA, 2018b) y la agencia europea de medio ambiente (EEA) para estimación de HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC.

Con base en las dos estrategias mencionadas, se cuantificaron las emisiones por tipología de MMNC, evaluando los dos escenarios de reducción de las emisiones generadas por MMNC clasificadas en el **ANEXO B**, para Colombia.

Estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos por segmento de MMNC

A partir de los documentos técnicos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) se calculan las emisiones de (HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y CO₂ asociadas a maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia. BC se calcula a partir del documento “Air pollutant emission inventory guidebook 2019” de la Agencia Ambiental Europea (EEA, por sus siglas en inglés). Esta metodología permite calcular las emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos de forma detallada para el inventario de MMNC.

No obstante, cabe señalar que el estándar de emisiones (Tier) especifica la tecnología de control de emisiones y las tasas de emisión de los contaminantes, bajo un

nivel de azufre máximo en el diésel. Así, las limitaciones en cuanto a la concentración de azufre del combustible diésel utilizado para el funcionamiento del motor se fundamenta como muestra la Tabla 1. El alcance de la metodología abarca maquinaria con motores diésel (ignición por compresión).

Tabla 1.

Concentración de azufre máximo en combustible Diésel.

TIER	Equivalencia (%)	Equivalencia (ppm)
Tier 0 a 1	0,33	3300
Tier 2 a 3	0,2	2000
Tier 4IA	0,05	500
Tier 4F	0,0015	15

Nota: 1% = 10.000 ppm Concentración de azufre máximo en combustible Diésel (SOx_{bas}) – Default Certification Sulfur Level. (EPA, 2018b)

Teniendo en cuenta que la importación de maquinaria en Colombia es de origen diverso (principalmente de Estados Unidos) (Felipe Mendéz Espinoza & Morales Betancourt, 2020), y no se cuenta con una base de datos unificada con características detalladas de MMNC, se optó por complementar la información disponible con información de catálogos (por ejemplo: <https://dev-ui.ritchiespecs.io/>).

A partir de esta información base para el cálculo de emisiones, a continuación, se describe el paso a paso de los cálculos realizados con el fin de estimar la cantidad de emisiones generadas por tipología de MMNC para su posterior análisis y evaluación de resultados.

Paso 1. Información inicial para el cálculo de emisiones.

Para el cálculo de emisiones se utilizó la ecuación 1. (EPA, 2018b)

$$E_c = \sum N_g * HU_g * PN_g * FC_g * FE_{c,g} \quad (\text{Ecuación.1})$$

Donde,

- E_c (g/año): Total de emisiones de cada contaminante criterio c (HC, PM₁₀, NO_x, SO₂, CO, CO₂). PM_{2.5} se define como el 97% del PM₁₀ (EPA, 2018a). BC es una fracción del PM₁₀ en función del estándar de emisiones utilizado y potencial del motor (European Environment Agency, 2019).
- N_g (maquinaria): Número de unidades (1000 Unidades como base de cálculo) de MMNC agrupada por segmento en función de características técnicas similares como retroexcavadoras.
- HU_g (horas/año): Nivel de actividad. Horas de uso promedio anual de MMNC agrupada g. Para ello se tuvo en cuenta la información de la (EPA, 2018b).
- PN_g (kW): Potencia nominal promedio de la maquinaria seleccionada. Información obtenida de catálogos de fabricante y otras fuentes de información de aceptación científica. Se utilizó la mediana de los datos obtenidos.
- FC_g (adimensional): Factor de carga asociado al segmento de MMNC agrupada g. Representa la fracción del potencial del motor a la que opera usualmente la maquinaria. Para ello se tuvo en cuenta la información de la (EPA, 2018b).

El tipo de maquinaria, pertenece a las tipologías estandarizadas en las metodológicas del inventario de emisiones de la Unión Europea (European Environment Agency, 2013) y el documento “User’s Guide for the Final NONROAD2005 Model” (EPA, 2005b). Por ejemplo, Retroexcavadora, Autohormigonera, Asfaltadora, etc. Dichas tipologías establecen un nivel de actividad, factor de carga y potencia nominal promedio que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características de actividad, carga y potencia para maquinaria de estudio.

Tipo de maquinaria/ equipo	Nivel de Actividad [hora/año]	Factor de Carga [adimensional]	Potencia considerada (kW)
Autohormigonera	580	0,59	84,3
Bulldozer	899	0,59	104,4
Camión fuera de carretera	1641	0,59	1468,3
Cargador Frontal	761	0,59	136
Dúmper	566	0,21	202,1
Excavadora	1092	0,59	106,7
Grúa Horquilla	1700	0,59	44
Grúa telescópica	990	0,43	239
Manipulador	878	0,43	74,55
Minicargador	818	0,21	49,2
Miniexcavadora	818	0,21	20,4
Motoniveladora	962	0,59	111,2
Perforador	466	0,43	105,1
Piloteadora	466	0,4	127,55
Retroexcavadora	1135	0,21	67
Tractor	1135	0,21	72,3
Volqueta	1641	0,59	76,45
Zanjadora	593	0,59	44,7

Nota: Nivel de actividad (HUG), factor de carga (FCg) y potencia nominal (PNg) por tipo de MMNC. (EPA, 2010; European Environment Agency, 2019; Felipe Mendéz Espinoza & Morales Betancourt, 2020).

- $FE_{c,g}$ (g/kW* hora): Factor de emisión para el contaminante c y la maquinaria agrupada g. Se calcula a partir de la metodología de la EPA (EPA, 2018b). Paso 2 y paso 3.

Paso 2. Estimación de factores de emisión para HC, CO y NOx

Con el fin de establecer el FE_g correspondiente a HC, CO y NOx, se utilizó la Ecuación 2. Para motores diésel con ventilación de cárter (Andrew Uni, 2013) el FE_{HC} puede ser aumentado en hasta un 2% y ser aplicado en los niveles tecnológicos Tier 0, 1, 2 y 3 (European Environment Agency, 2019) (European Environment Agency, 2013). Para efectos de esta investigación se aumentó en un 1,02%.

$$FE_{HC,CO,NOx} = FE_{SS} * FAT * FD \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde,

- $FE_{c,g}$ (HC,CO,NOx) = Factor de emisión para el contaminante c y la maquinaria agrupada g. Se expresa en (g/kW* hora).
- FE_{SS} = Factor de emisión de la maquinaria nueva (prueba estática). Se expresa en (g/kW* hora). Este factor por contaminante se encuentra en función de la potencia del motor, estándar de emisiones o nivel tecnológico del motor. En esta investigación se asume para Colombia tecnología A, en la que no se incluye filtro de partículas Diésel (DPF), y reducción catalítica selectiva (SRC) por su alto costo. Los FE_{SS} se obtuvieron del documento “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad

Tabla 3.

Factor de ajuste transitorio (FAT) para la maquinaria objeto de estudio.

Minicargador	1,05	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18	1	1
Miniexcavadora	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18	1	1
Motoniveladora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01	1	1
Perforador	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Piloteadora	1	1	1	1	1,23	1,47	1,01	1	1
Retroexcavadora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01	1	1
Tractor	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01	1	1
Volqueta	1,05	1,53	1,1	1,21	1,23	1,47	1,01	1	1
Zanjadora	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01	1	1

Nota: Factor de Ajuste transitorio establecido por la EPA, para cada tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) (EPA, 2018b).

- FD = el factor de deterioro de la maquinaria permite ajustar el FEss teniendo en cuenta el desgaste del motor. Está asociado al tipo de tecnología y la edad del motor (EPA, 2018b). Así pues, para su cálculo se utiliza la Ecuación 3 o 4 según sea el factor de edad de la maquinaria. El factor de edad en esta investigación se define como el cociente entre las horas de uso de la MMNC durante 15 años según tipología y la vida media teórica de esta (EPA, 2018b).

Si $Factor\ de\ edad_g \leq 1$ Entonces $FD = 1 + A_c * (Factor\ de\ edad_g)^b$
(Ecuación 3.)

Si $Factor\ de\ edad_g > 1$ Entonces $FD = 1 + A_c$
(Ecuación 4.)

Donde,

- b = para motores diésel el valor es 1 (EPA, 2018b).
- A_c = Factor de deterioro relativo. Es una constante para un contaminante (c) y estándar de emisiones determinado. Representa el

porcentaje máximo de incremento de emisiones por deterioro a partir de la vida útil del motor. (adimensional)

Tabla 4.

Factor de deterioro relativo A_c .

Estándar de emisiones	Contaminante			
	HC	CO	NOx	PM
Tier 0	0,047	0,185	0,024	0,473
Tier 1	0,036	0,101	0,024	0,473
Tier 2	0,034	0,101	0,009	0,473
Tier 3 y 4	0,027	0,151	0,008	0,473

Nota: Factor de deterioro relativo A_c establecido por la EPA, para maquinaria móvil no de carretera (MMNC). (EPA, 2018b).

- *Factor de edad e* = Fracción de vida media gastada en la que se encuentra el segmento de maquinaria (g). Se calcula por medio de la Ecuación 5. (EPA, 2005a)

$$\text{Factor de edad} = \frac{\text{tiempo de vida acumulado} \cdot FC_g}{\text{tiempo de vida media}} \quad (\text{Ecuación 5.})$$

Donde,

- *Tiempo de vida acumulado* = horas de uso de la MMNC durante 15 años según tipología. El valor debe darse en horas
- FC_g = Factor de carga previamente explicado
- *tiempo de vida media* = Según potencia del motor (kW): 19 a 37 kW = 2500 horas, >37 a 225 kW = 4667 horas, >225 kW = 7000 horas y motores con potencia menor a 19 kW (2500 horas) (EPA, 2010).

Paso 3. Estimación de factores de emisión para PM₁₀, PM_{2.5} y BC

Para realizar el cálculo del factor de emisión (FE_c) asociado a PM₁₀ se utiliza la Ecuación 7. Teniendo presente el contenido de azufre en el combustible.

$$FE_{PM_{10}} = FE_{SS} * FAT * FD - S_{PMadj} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde,

- FE_{SS} = Factor de emisión de la maquinaria nueva. Dado en (g/kW* hora). Los FE_{SS} se obtuvieron del documento “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b” Tabla A4, página 57 (EPA, 2018b).

- FAT = el factor de ajuste transitorio permite ajustar el FE según prueba estática a condiciones más reales de funcionamiento. Los valores FAT se obtuvieron del documento “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b” Tabla A5, página 69 (EPA, 2018b).

- FD = el factor de deterioro de la maquinaria permite ajustar el FE_{SS} teniendo en cuenta el desgaste del motor. Está asociado al tipo de tecnología y la edad del motor (EPA, 2018b).

- S_{PMadj} = Ajuste por contenido de azufre en el diésel. Se calcula a partir de la ecuación.

$$S_{PMadj} = BSFC_{adj} * 7,0 * soxcnv * 0,01 * (soxbas - soxdsl) \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde,

- $7,0$ = gramos de sulfato de PM/gramos de azufre en PM

- $soxcnv$ = gramos de azufre en PM/gramos de azufre en combustible consumido. El valor es de $0,022247$ (Tier 0 a Tier 4F) (EPA, 2018b)

- $0,01$ = conversión de porcentaje a fracción

- $soxbas$ = Contenido de azufre usado en el combustible certificado. El valor es de $0,33\%$ (Tier 0 a Tier 1); $0,2$ (Tier 2 a Tier 3); $0,05$ (Tier 4 Interim), $0,0015$ (Tier 4 Final).

- $soxdsl$ = Contenido de azufre en el combustible de Colombia. Se asume una concentración de 50 ppm hasta 2019, y en función del CONPES 3943 posteriormente.

- $BSFC_{adj}$ = Dado en (g/kW-hr). Para determinar este valor se utiliza la ecuación 9.

$$BSFC_{adj} = BSFC * FAT_{BSFC} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde,

- BSFC: Consumo de combustible para maquinaria con cero horas de uso. Dado en (g/kW-hr). El consumo de combustible (BSFC) se establece por potencia. Potencia >0 a 75 kW = 248 (g/kW-hr). Potencia >75 a 560 kW = 223 (g/kW-hr) (EPA, 2018b).

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 40

- FAT_{BSFC} = Los valores FAT se obtuvieron del documento

“Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b” Tabla A5, página 69 (EPA, 2018b).

PM_{2.5}: se define como el 97% del PM₁₀ (EPA, 2018b).

BC: se define como una fracción del PM₁₀ en función de su nivel tecnológico. Los datos se obtuvieron del documento “1.A.4 Non-road mobile sources and machinery” Tabla D.1, página 72 (enlace: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road-mobile-sources/view>) (European Environment Agency, 2019) .

Paso 4. Estimación de factores de emisión para CO₂

El cálculo de FE asociado a CO₂ se obtiene a partir de la ecuación 10. (EPA, 2018b)

$$FE_{CO_2} = (BSFC_{adj} - FE_{HC}) * 0,87 * \left(\frac{44}{12}\right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde,

- FE_{CO_2} = Factor de emisión de CO₂ en g/kW-hr
- $BSFC_{adj}$ = Consumo específico de combustible ajustado en g/kW-

hr. Se determina por medio de la Ecuación 8

- FE_{HC} = Factor de emisión de HC en g/kW-hr Se determina por medio de la Ecuación 2.

- 0,87 = Fracción másica carbono/Diésel (constante)
- 44/12 = Relación del peso atómico del CO₂ y del carbono

Paso 5. Estimación de factores de emisión para SO₂

Para la estimación del cálculo de FE_c asociado a SO₂ se utiliza la Ecuación 10. (EPA, 2018b).

$$FE_{SO_2} = (BSFC_{adj} * (1 - soxcnv) * FE_{HC}) * 0,01 * soxds1 * 2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde,

- FE_{SO_2} = Factor de emisión del SO₂ en g/kW-hr
- $BSFC_{adj}$ = Consumo de combustible ajustado en g/kW-hr. Se determina por medio de la Ecuación 8
- FE_{HC} = Factor de emisión de hidrocarburos en g/kW-hr. Se determina por medio de la Ecuación 8
- $soxcnv$ = gramos de azufre en PM/gramos de azufre en combustible consumido. El valor es de 0,022247 (Tier 0 a Tier 4F) (EPA, 2018b)
- 0,01 = Conversión de porcentaje a fracción
- $soxds1$ = Contenido de azufre en el combustible de Colombia. Se asume una concentración de 50 ppm hasta 2019, y en función del CONPES 3943 posteriormente.
- 2 = gramos de SO₂ formados por un gramo de azufre

Conceptualización general para el cálculo de la variación porcentual asociado a dos estrategias de reducción de emisiones de MMNC.

Se evaluaron los cambios porcentuales de las dos estrategias de reducción presentadas en la sección posterior para lo cual se consideraron los siguientes aspectos:

- La estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos se realizó para los contaminantes HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC.
- Para todas las tipologías de MMNC la base de cálculo de unidades de MMNC es de $N_g = 1000$. Se asume una edad promedio de 15 años al año 2020 de acuerdo a la recomendación de fabricante (según tiempo de vida del motor), teniendo en cuenta lo recomendado en (Felipe Méndez Espinoza & Morales Betancourt, 2020).

- El cálculo se realizó por tipología de MMNC descrita en el

ANEXO B.

- Se consideraron los niveles de actividad (HUG), potencia nominal promedio (PNg), factor de carga (FC) referenciados en la Tabla 2.
- Los datos estimados en función de la potencia determinada para cada tipología de MMNC son: Rango de potencia, Factores de emisión (FEss), consumo de combustible (BSFC) de maquinaria nueva y tiempo de vida media.

- El estándar de emisiones o nivel tecnológico de la MMNC (Tabla 5) se atribuye considerando un retraso tecnológico de 13 años respecto al nivel tecnológico de Estados Unidos (Dallmann & Menon, 2016).

Tabla 5.

Estándar de emisiones (Tier) para Colombia respecto de USA con retraso tecnológico de 13 Años.

Potencia del motor kW	Estándar de emisiones base en Colombia según retraso tecnológico
>0 a 8	Tier 2
>8 a 19	Tier 2
>19 a 37	Tier 2
>37 a 56	Tier 2
>56 a 75	Tier 2
>75 a 130	Tier 3
>130 a 225	Tier 3
>225 a 450	Tier 3
>450 a 560	Tier 3
>560	Tier 2

Nota: Estándar de emisiones de MMNC determinado para Colombia con base en un retraso tecnológico de 13 años respecto de Estados Unidos.(Dallmann & Menon, 2016).

- La ecuación utilizada para el cálculo de la variación o cambio porcentual de las emisiones de contaminantes climáticos asociado a la reducción de azufre en el combustible y al mejoramiento en el nivel tecnológico se estableció como:

$$Variación\ porcentual_{c,g} = \left(\frac{Tecnología\ propuesta_{c,g} - Tecnología\ actual_{c,g}}{Tecnología\ actual_{c,g}} \right) * 100$$

(Ecuación 11)

Donde,

- *Variación porcentual* $_{c,g}$: es el cambio en porcentaje de emisiones de un contaminante c para un segmento de MMNC g base, y una mejora propuesta en esta. Está dado en [%]
- *Tecnología actual* $_{c,g}$: emisiones generadas de un contaminante c por un segmento de MMNC con tecnología y/o nivel de azufre inicial. Puede estar dado en [Ton]
- *Tecnología propuesta* $_{c,g}$: emisiones generadas de un contaminante c por un segmento de MMNC con tecnología mejorada y/o nivel de azufre reducido. Puede estar dado en [Ton]
- 100 = Factor de conversión de decimal a porcentaje (%)
- Resultado con un valor negativo se asocia a una reducción y positivo a un incremento en las emisiones de un contaminante específico.

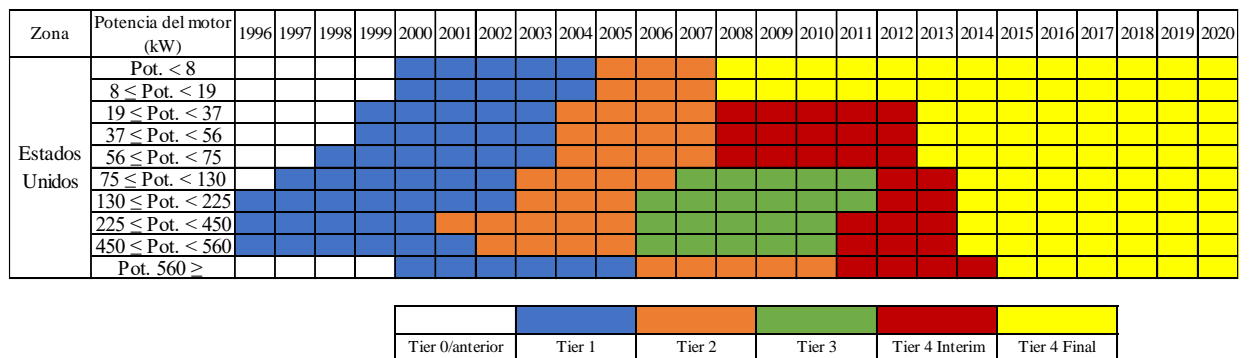


Figura 1. Estándar de emisiones de MMNC por año y rango de potencia (Pot) en países de mayor exportación a Colombia. Nota: adaptado de (Dallmann & Menon, 2016)

A continuación, se profundiza en las estrategias de reducción de emisiones de contaminantes climáticos-atmosféricos:

Estrategia de reducción 1: disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel utilizado en diferentes tipologías de MMNC.

La aplicación de la primera estrategia de reducción consiste en calcular las emisiones generadas de contaminantes atmosféricos y climáticos a partir de las reducciones en el contenido de azufre nacional en combustible diésel, según el documento CONPES 3943 de 2018 “Política para el mejoramiento de la calidad del aire” Colombia, (Tabla 6.) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018):

Tabla 6.

Reducción de azufre establecido para combustible Diésel.

Año de aplicación	Concentración (ppm)	Equivalencia (%)
Hasta 2019	50	0,005
Desde 2020	20	0,002
Desde 2021	15	0,0015
Desde 2026	10	0,001

Nota: 1% = 10.000 ppm, ppm y % de reducción de azufre establecido para combustible diésel (SO_xdsl) de acuerdo al Pág. 61 CONPES 3943. Adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Estrategia de reducción 2: mejora en el nivel tecnológico (estándar de emisión) en diferentes tipologías de MMNC.

Se asumió que Colombia cuenta con un retraso tecnológico de 13 años en MMNC respecto al nivel tecnológico (Tier) de Estados Unidos (Figura 1) (EPA, 2018b; Felipe Mendéz Espinoza & Morales Betancourt, 2020). Se estimaron las emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos para esta segunda estrategia de reducción, bajo las siguientes especificaciones:

- Tomando la información general del apartado 2.2
- Realizando la variación correspondiente a cambios de tecnología (Tier) desde el estándar establecido por retraso tecnológico hasta el estándar de emisión Tier 4IA. Su variación se presenta en la Tabla 7 (teniendo en cuenta el máximo nivel de azufre permisible por nivel tecnológico según Tabla 1).

Tabla 7.

Estándar de emisiones asumido y mejora tecnológica propuesta.

Potencia del motor kW	Estándar de emisiones base en Colombia	Mejora tecnológica propuesta
>0 a 8	Tier 2	
>8 a 19	Tier 2	
>19 a 37	Tier 2	Tier 3, Tier 4IA
>37 a 56	Tier 2	
>56 a 75	Tier 2	
>75 a 130	Tier 3	
>130 a 225	Tier 3	
>225 a 450	Tier 3	Tier 4IA
>450 a 560	Tier 3	
>560	Tier 2	

Nota: Estándar de emisiones (Tier) asumido en este proyecto y mejora tecnológica propuesta a partir del estándar de Estados Unidos. (Dallmann & Menon, 2016).

Discusión de resultados.

En esta sección se muestra la variación porcentual de las emisiones de los contaminantes HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC, para un segmento muestra de estudio de 1000 unidades por tipología de MMNC.

La primera parte (Sección 3.1 y 3.2) muestra un análisis general de la aplicación de la primera y segunda estrategia de reducción frente a las emisiones generadas (Ton) para cada contaminante objeto de estudio; mientras que la segunda parte (capítulo 3.3 y 3.4) muestra un análisis del escenario total de la variación porcentual asociada a la aplicación de dichas estrategias de reducción.

Análisis del resultado de la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos - climáticos asociado a la disminución del nivel azufre en el combustible Diésel utilizado en diferentes tipologías de MMNC.

A partir del segmento de 1000 unidades de MMNC por tipología, se estimaron las emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos, con base en los documentos técnicos de la agencia de protección ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) se calculan las emisiones de HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y CO₂ asociadas a maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia. BC se calculó a partir del documento “Air pollutant emission inventory guidebook 2019” de la agencia ambiental europea (EEA, por sus siglas en inglés). Se tuvo en cuenta equipos entre 16 y 1468kW para el análisis. Así, aplicando los cambios en la concentración de azufre de 50, 20, 15 y 10 ppm, sus

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 50

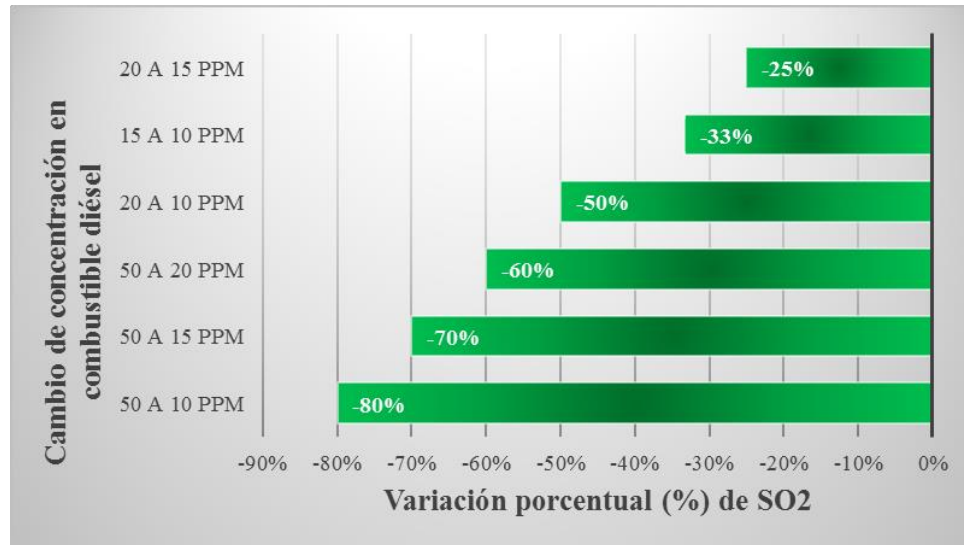
emisiones generadas (Ton) posicionadas en un estándar de emisiones Tier 2 se presentan en la Tabla 10 (Nivel tecnológico evaluado Tier 2 a Tier 4IA), teniendo en cuenta que todas las emisiones de los contaminantes HC, CO, NO_x y CO₂, con los respectivos cambios en la concentración de azufre fueron exactamente iguales (ver **ANEXO C**), esto debido a que el cálculo de emisiones depende directamente del factor de emisión de dicho contaminante, el factor de carga, potencia nominal, horas anuales de trabajo y segmento del equipo a evaluar y no de los cambios en la concentración de azufre en el combustible *soxcnv*. PM₁₀, PM_{2.5} y BC presentan reducción en las emisiones generadas por debajo de 0.0 Ton (ver **ANEXO C**) lo que no es muy significativo esto debido a que el cálculo de emisiones del PM₁₀ se realiza con su factor de emisión FE_{PM10} que depende del ajuste por contenido comercial en el combustible SPM_{adj} que cambia en un 0.001 debido a que su cálculo está relacionado directamente con el nivel de concentración de azufre en el combustible diésel *soxcnv*, finalmente solo el SO₂ cambio significativamente en sus emisiones (ver **ANEXO C**) pues su cálculo depende de su factor de emisión ($FE-SO_2$) y este a su vez depende directamente con el nivel de concentración de azufre en el combustible diésel *soxcnv*.

Por otro lado, las emisiones generadas para el mismo segmento de MMNC posicionadas en un estándar de emisiones Tier 3 se presentan en la Tabla 10 (Nivel tecnológico evaluado Tier 3 a Tier 4IA). Se puede analizar en este resultado que con respecto de las emisiones generadas de los contaminantes en Tier 2 las emisiones resultado del Tier 3 son por mucho menores (ver **ANEXO C**), esto debido a que los

factores de emisión de todos los contaminantes son menores en función del nivel tecnológico, y el cálculo de emisiones se realiza con el factor de emisión de cada contaminante. Cabe destacar que en cualquiera de los dos niveles tecnológicos el CO₂ es el resultado más relevante y altamente preocupante (ver **ANEXO C**).

Dado lo anterior, una vez implementada la disminución del nivel azufre en el combustible diésel se procede a realizar el cálculo de la variación porcentual, la cual es tomada para efectos de la presente investigación como el porcentaje de reducción o incremento de emisiones contaminantes teniendo en cuenta que los resultados negativos son considerados reducción, mientras que los positivos son incrementos. Para el cálculo de la variación porcentual se tuvo en cuenta el estándar de emisiones asociado al retraso tecnológico en función de la potencia kW que como resultado genero Tier 2 y Tier 3 y las reducciones de azufre relacionadas en la Tabla 6. de acuerdo con el CONPES 3943.

Obteniendo una variación porcentual para cada emisión de los contaminantes HC, CO, NO_x y CO₂ nula (mantiene el 100% de sus emisiones generadas) para todas las tipologías de MMNC. En el caso del SO₂ se generaron resultados favorables (Figura 2), donde la mayor disminución de este contaminante se presentó por el cambio de azufre de 50 a 10ppm, y la menor disminución por el cambio de 20 a 15ppm.



Nota: Porcentajes negativos indican reducción y positivos (Incremento)

Figura 2. Variación porcentual (%) de SO₂ para todas las tipologías de MMNC en función de la reducción de la concentración de azufre (ppm) en el combustible diésel. Realizado por el autor.

Las variaciones porcentuales de PM₁₀, PM_{2.5}, y BC, presenta variación porcentual (reducción) a nivel general desde -0,02 hasta -1%. Siendo este resultado poco alentador debido a que una reducción del 1% aunque es buena, no genera un impacto positivo realmente considerable, pues el 99% de las emisiones de estos contaminantes se mantiene independientemente de las reducciones en la concentración de azufre del combustible diésel y el estándar de emisiones generado por retraso tecnológico Tier 2 y Tier3.

La Tabla 8 presenta las variaciones porcentuales de mayor impacto de PM₁₀, PM_{2.5}, y BC al cambio o reducción en los niveles de azufre y su relación con la variación porcentual de SO₂.

Tabla 8.

Algunas variaciones porcentuales (disminución) más significativas de PM₁₀, PM_{2.5}, BC y SO₂.

Equipo	Horas anuales de trabajo (NA)	Potencia nominal promedio (KW)	Tecnología	Variación porcentual (%)	
				PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂
50 a 10 ppm					
Camión fuera de carretera	1641	1468,3	Tier 2	-0,6%	-80%
Cargador Frontal	761	136	Tier 3	-0,4%	-80%
Camión Grúa: Grúa telescópica	990	239	Tier 3	-0,4%	-80%
Manipulador: Telescópico	878	74,55	Tier 2	-0,4%	-80%
Otro equipo de construcción:					
Fresadora	606	275,9	Tier 3	-0,4%	-80%
Perforador	466	105,1	Tier 3	-0,4%	-80%
Camión fuera de carretera	1641	1468,3	Tier 2	-0,6%	-80%
Cargador Frontal	761	136	Tier 3	-0,4%	-80%
Camión Grúa: Grúa telescópica	990	239	Tier 3	-0,4%	-80%
Perforador: Taladro petrolero	466	402,7	Tier 3	-0,8%	-80%
50 a 15 ppm					
Camión fuera de carretera	1641	1468,3	Tier 2	-0,5%	-70%
Perforador	466	105,1	Tier 3	-0,4%	-70%
Camión fuera de carretera	1641	1468,3	Tier 2	-0,5%	-70%
Perforador: Taladro petrolero	466	402,7	Tier 3	-0,7%	-70%
50 a 20					
Camión fuera de carretera	1641	1468,3	Tier 2	-0,4%	-60%
Perforador: Taladro petrolero	466	402,7	Tier 3	-0,6%	-60%

Nota: Variaciones porcentuales (disminución) más significativas de PM₁₀, PM_{2.5}, y BC y su relación con la vari

Por otro lado, se logra analizar que las variaciones porcentuales se reducen por la relación: si la potencia PNg es mayor a las horas anuales de trabajo HUg hay variación porcentual negativa es decir una disminución de los contaminantes. Sin embargo, si el estándar de emisiones mejora por ejemplo al pasar de Tier 2 a Tier 4IA, y este se asocia a la relación anterior, se tendría una disminución mayor. Este análisis se vio reflejado en los resultados obtenidos en la aplicación de la segunda estrategia de reducción.

No obstante, también se analizó que la variación porcentual generada de contaminantes derivados de PM_{10} como son $PM_{2.5}$ y BC, en varias tipologías de MMNC, reduce independientemente del estándar de emisiones del motor, pues solo con la aplicación de las reducciones en la concentración de azufre del combustible diésel se lograría una disminución de emisiones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, y BC. Esto se puede observar en los resultados de la aplicación de las dos estrategias de reducción donde existen MMNC con horas de uso HUg , menores y mayores a la potencia PNg , y estándar de emisión Tier 2 y Tier 3, con reducciones los niveles de dichos contaminantes. Sin embargo, cabe aclarar que si aumenta el estándar de emisiones por normativa debe disminuir la concentración de azufre (EPA, 2018b), lo que contribuiría positivamente a obtener una variación porcentual negativa es decir reducciones mayores en los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$, y BC.

Análisis del resultado de la variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos - climáticos asociados a la variación en los niveles tecnológicos del motor en diferentes tipologías maquinaria móvil no de carretera (MMNC).

Asumiendo que Colombia cuenta con un retraso tecnológico de 13 años respecto al nivel tecnológico (Tier) de Estados Unidos (Figura 1) para MMNC (EPA, 2018b; Felipe Mendéz Espinoza & Morales Betancourt, 2020), para la determinación del retraso tecnológico (Tier 2) se tuvieron en cuenta equipos con potencias (PNg) entre 20 y 1468

kW y horas de trabajo anual (HUG) entre 593 y 1700. Del mismo modo para la determinación del retraso tecnológico (Tier 3) se tuvieron en cuenta equipos con potencias (PNg) entre 466 y 1641 kW, y horas de trabajo anual (HUG) entre 76 y 239. Así pues, se calcularon las variaciones porcentuales para la segunda estrategia de reducción (Variación en el estándar de emisión de cada tipología de MMNC), aplicando la variación en los niveles de azufre en combustible diésel determinados para la primera estrategia de reducción (Variación en los niveles de azufre en el combustible diésel de MMNC) Esta información se referencia en la Tabla 9. acción porcentual de SO₂. Los resultados totales en el ANEXO C. Realizado por el autor.

Tabla 9.

Variación del estándar de emisiones en función del retraso tecnológico y concentración de azufre para cálculo de la variación porcentual.

Cambio en los niveles azufre en combustible diésel	Variación de los estándar de emisión desde el retraso Tecnológico (Tier 2 y Tier 3)
50 a 50 ppm	
50 a 20 ppm	
50 a 15 ppm	
50 a 10 ppm	Equipos con base Tier 2 evaluados en Tier 3 y Tier 4IA
20 a 20 ppm	
20 a 15 ppm	Equipos con base Tier 3 evaluados en Tier 4IA
20 a 10 ppm	
15 a 15 ppm	
15 a 10 ppm	
10 a 10 ppm	

Nota: Variación del estándar de emisiones en función del retraso tecnológico y niveles de concentración de azufre a evaluar para cálculo de la variación porcentual. Realizado por el autor.

Las emisiones generadas (Ton) para un segmento de 1000 unidades de la MMNC evaluada (Tabla 2) aplicando las variaciones en la concentración de azufre de 50, 20, 15 y

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y 56 climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

10 ppm, posicionadas en un estándar de emisiones Tier 2 y Tier 3 que fueron calculadas hasta Tier 4IA, se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Cantidad mínima y máxima de los contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC en toneladas generadas para 1000 und de MMNC a partir de las primeras variaciones de estándar de emisiones y niveles de azufre en el combustible diésel

Contaminante	Nivel tecnológico evaluado de Tier 2 a Tier 4IA						Nivel tecnológico evaluado de Tier 3 a Tier 4IA			
	Tier 2		Tier 3		Tier 4IA		Tier 3		Tier 4IA	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
HC (Ton)	3	353	3	350	2	196	5	21	1	12
CO (Ton)	20	2453	21	2565	7	810	27	162	6	189
Nox (Ton)	25	7492	27	8194	18	4243	71	303	56	268
PM₁₀ (Ton)	4	358	5	448	1	101	7	45	1	13
CO₂ (Ton)	3261	1020267	2762	1010162	2766	1010654	14964	57343	14978	57363
SO₂ (Ton)	0	31	0	31	0	31	0	2	0	2
PM_{2.5} (Ton)	4	347	5	434	1	98	6	44	1	12
BC (Ton)	3	250	4	313	1	71	5	36	1	9

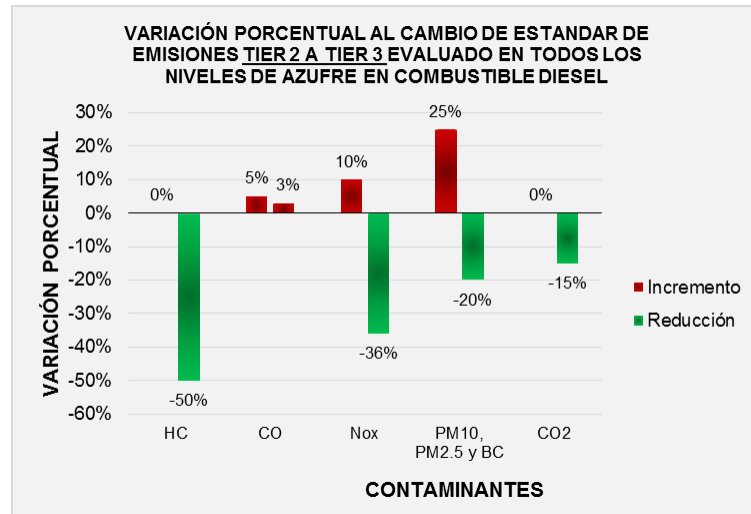
Nota: Cantidades mínimas y máximas de toneladas generadas para un segmento de 1000 und de MMNC de los contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC a partir de la variación del estándar de emisiones Tier 2 hasta Tier 4IA y Tier 3 a Tier 4IA y la variación en los niveles de azufre en el combustible diésel (50, 20, 15 y 10 ppm). Realizado por el autor.

De las cantidades generadas (ton) presentadas en la tabla anterior, se puede analizar que al pasar los equipos evaluados de MMNC del estándar de emisiones Tier 2 a Tier 3, solo se reducen las emisiones de HC y CO₂, sin un impacto considerable, por el contrario, las emisiones de CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5} y BC aumentan, siendo el PM₁₀, PM_{2.5}, NOx, y BC los contaminantes que mayor incremento tuvieron, no obstante, el SO₂ mantiene las emisiones sin cambio alguno. Por otro lado, al pasar de Tier 2 a Tier 4IA, las emisiones de HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, y BC si generaron una reducción del alto

impacto pues las toneladas máximas están extremadamente por debajo del Tier 2, excepto el CO₂ pues su disminución no fue considerable, y el SO₂ que al igual que la evaluación anterior mantiene las emisiones exactamente iguales a Tier 2 y Tier 3.

En el segundo tramo evaluado al pasar de Tier 3 a Tier 4IA existe una reducción de HC, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, y BC con un alto impacto, un incremento de CO y CO₂ mínimo, y el SO₂ no presenta variaciones. No obstante, al comparar las emisiones generadas del primer tramo (Tier 2 a Tier 3 y Tier 2 a Tier 4IA) y el segundo tramo (Tier 3 a Tier 4IA), se puede observar que las reducciones más amplias y emisiones más bajas se observan en el segundo tramo. En cualquiera de los casos anteriormente analizados, las reducciones son evidenciables.

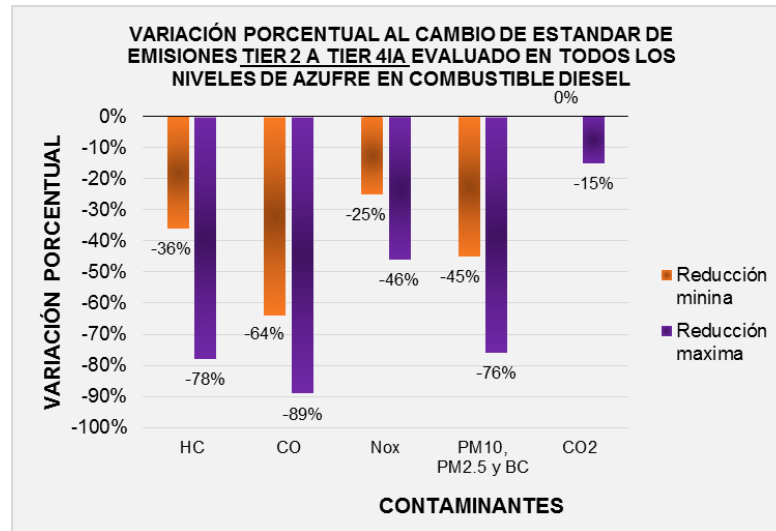
El cálculo de variaciones porcentuales realizado a partir de las emisiones generadas se realizó como se menciona anteriormente en dos tramos. El primero, al realizar el aumento o variación del estándar de emisiones Tier 2 a Tier 3 y Tier 2 a Tier 4IA, en función de la variación o cambio del nivel de concentración de azufre en el combustible diésel (Tabla 6. para las tipologías de MMNC de la Tabla 2. . Donde para la variación del estándar Tier 2 a Tier 3 presenta variaciones porcentuales en incremento o reducción de los contaminantes HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, y BC como se muestra en la Figura 3, observando que el CO solo genera aumento, la variación porcentual más alta (reducción del -50%) se observa en el contaminante HC, y la variación más baja (Incremento 25%) se observa para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, y BC, teniendo en cuenta que también se genera reducción del -20% en estos mismos contaminantes.



Nota: Porcentajes negativos indican (reducción), positivos (Incremento) y valores en 0% nulos.

Figura 3. Incrementos y reducciones de la variación porcentual generada de los contaminantes HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, y BC para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel. Realizado por el autor.

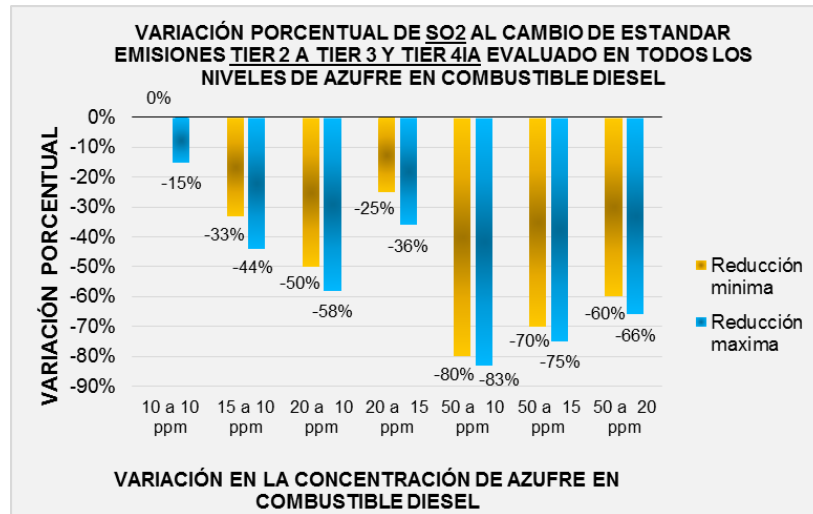
Las variaciones porcentuales al pasar del estándar de emisiones Tier 2 a Tier 4IA son más significativas, en comparación del cambio de estándar de emisiones Tier 2 a Tier 3, como se muestra en la Figura 4, donde se observan en su mayoría variaciones porcentuales de reducción para HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, y BC, analizando que únicamente el CO₂ presenta una variación porcentual (Reducción mínima nula del 0% y máxima del -15%), y las variaciones porcentuales (reducción) más significativas son los contaminantes CO con un -89%, HC con un -78% y PM₁₀, PM_{2.5}, y BC con un -76%.



Nota: Porcentajes negativos indican (reducción), positivos (Incremento) y valores en 0% nulos.

Figura 4. Reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, y BC, para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diésel, realizado por el autor.

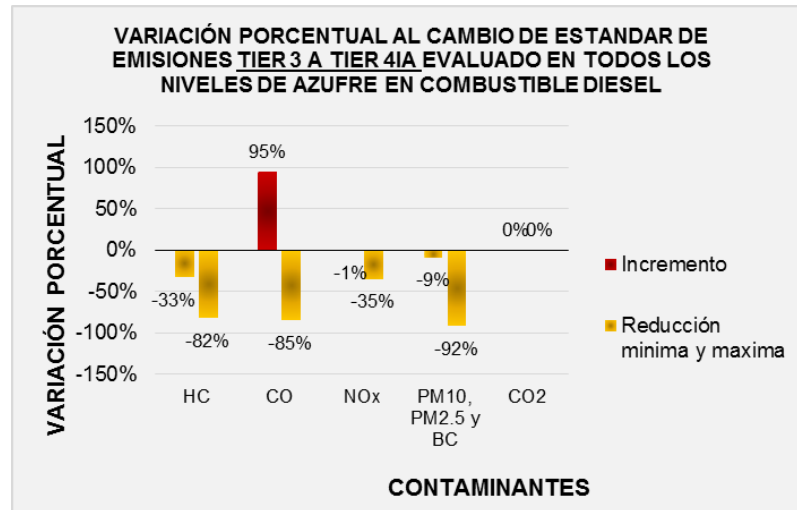
Por último, para este primer tramo (Tier 2 a Tier 3 y Tier2 a Tier 4IA) se analizó que el SO₂ presentó una variación porcentual variable en la totalidad del tramo; no en función del cambio de estándar de emisiones (Tier) si no en función de los cambios en los niveles de concentración de azufre en el combustible diésel, debido a que el cálculo de las emisiones (Ton) de SO₂ depende directamente de la concentración de azufre en el combustible diésel. Las variaciones porcentuales de este tramo en función de los cambios en los niveles de azufre de 15 a 15, 20 a 20 y 50 a 50 ppm son iguales a los presentados en la Figura 5, de 10 a 10 ppm. **ANEXO D** (Tabla 14) que las variaciones porcentuales de este tramo en función de los cambios en los niveles de azufre de 15 a 15, 20 a 20 y 50 a 50 ppm son iguales a los presentados en la Figura 5, de 10 a 10 ppm.



Nota: Porcentajes negativos indican (reducción), positivos (Incremento) y valores en 0% nulos.

Figura 5. Reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de SO₂, para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel. Realizado por el autor.

En cuanto al segundo tramo donde los equipos ubicados en retraso tecnológico Tier 3 pasaron a Tier 4IA, se observa solo un incremento en la variación porcentual de CO del 95%, y los contaminantes HC, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} y BC presentan variación porcentual (Reducción), donde PM₁₀, PM_{2.5}, y BC encabezan con reducciones máximas de un -92%, seguido de CO con un máximo de -85% y HC con un máximo de -82%, CO₂ no presenta variación porcentual. Dichos resultados se muestran en la Figura 6.



Nota: Porcentajes negativos indican (reducción), positivos (Incremento) y valores en 0% nulos.

Figura 6. Incrementos, reducciones mínimas y máximas de la variación porcentual generada de HC, CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂, y BC, para todas las tipologías de MMNC en función de todas las variaciones en la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel. Realizado por el autor.

Por otro lado, dentro de este mismo tramo se analizó que las variaciones porcentuales de SO₂ son iguales que las determinadas en el tramo anterior (Tier 2 a Tier 3 y Tier 2 a Tier4IA), tal y como se muestran en la Figura 5, destacando que este resultado es exactamente igual que el generado en la primera estrategia de reducción Figura 2. Esto se debe a que el cálculo de emisiones de SO₂ depende directamente de la concentración de azufre en el combustible diésel (Sox_{dsl}), así como se explicó para SO₂ de análisis anterior (primer tramo). Los resultados generales a partir del segmento y tipologías de MMNC se pueden visualizar en el **ANEXO D** (Tabla 15).

Como un análisis adicional, es de enfatizar que las variaciones porcentuales calculadas a partir de las emisiones generadas en cada estándar de emisiones Tier 2, Tier 3 y Tier 4IA, fueron iguales en las cuatro concentraciones de azufre en el combustible

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 62

diésel (50, 20, 15 y 10 ppm) para los contaminantes HC, CO, NO_x y CO₂, debido a que las variaciones o cambios de los niveles de azufre (ppm de azufre) no forman parte del cálculo de emisiones de dichos contaminantes. Sin embargo, para las variaciones porcentuales del PM₁₀, PM_{2.5}, BC y SO₂ la concentración de azufre está relacionada directamente en el cálculo de emisiones, donde para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5} y BC las variaciones de azufre no tienen un impacto significativo en su cálculo. No obstante, para el cálculo de emisiones y variación porcentual de SO₂ los niveles de azufre generan cambios positivos considerables. Por otro lado, aunque algunas de las emisiones fueron iguales, estas difieren al compararse entre estándar de emisiones, por ejemplo, una tipología de MMNC llamada Bulldozer en Tier 3 generó emisiones de HC en cada variación de nivel de azufre en el combustible diésel de 15 Ton en (50, 20, 15 y 10 ppm) y en Tier 4 de 3 Ton en (50, 20, 15 y 10 ppm). Ver **ANEXO D** (Tabla 15).

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la primera y segunda estrategia, se concluye que la segunda estrategia de reducción es la más efectiva frente a la disminución de las emisiones contaminantes, debido a que en ella es donde existe una mayor variación porcentual (disminución) en todos los contaminantes, resaltando que aunque en el primer tramo (Tier 2 a Tier 3 y Tier 2 a Tier 4IA) se presentaron incrementos en la variación porcentual de CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, y BC, y en el segundo tramo (Tier 3 a Tier 4IA) para CO incrementó y CO₂ no hubo variación, precisamente lo que se buscaba con la aplicación de esta estrategia era analizar los impactos en las variaciones porcentuales (reducción) de cada contaminante por la variación en los estándar de emisión asociado a las variaciones en los niveles de concentración de azufre en el combustible diésel en diferentes tipologías de MMNC en Colombia.

También, se concluye que la variación o cambio en los niveles de azufre (Sox_{dsl}) para las dos estrategias de reducción solo influye en los cálculos de emisiones y variación porcentual de los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, BC y SO₂ debido a que dichos cálculos dependen directamente de la concentración de azufre en el combustible diésel. Para los demás contaminantes solo se logran reducciones, de acuerdo con las características del equipo y el estándar de emisiones. No influye la concentración de azufre, pero si se aclara que cada estándar de emisiones exige por normativa una menor

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 64

concentración de azufre en el combustible para su funcionamiento pues el contenido de azufre usado en el combustible es el que determina el uso de tecnología disponible.

Recomendaciones

A partir del presente proyecto realizado, fue complejo investigar información externa a Colombia, dado que nuestro país no posee los registros totales o actualizados acerca de la maquinaria móvil no de carretera MMNC que ingresa desde el extranjero, para actividades agrícolas, de construcción e industrial, en materia de tecnología o estándar de emisiones TIER. Tampoco los inventarios de MMNC por departamento, y del mismo modo la normativa colombiana no ha adoptado las emisiones de esta maquinaria a través de los mecanismos jurídicos y legales a los que se confiere dicha carga contaminante. Pues, si bien es cierto que el Ministerio de Ambiente ha regulado las emisiones de fuentes fijas, hace falta en las fuentes móviles abarcar las de MMNC.

Es por lo anterior, que fue difícil referenciar esta información en esta investigación, debido a la falta de componentes científicos asociados a Colombia en materia de emisiones por MMNC. Teniendo en cuenta que no es posible realizar cálculos aproximados, con bajos índices de error, para estimar las emisiones de contaminantes de esta maquinaria, y solo se puede optar por analizar los proyectos en donde estos equipos se encuentran activos, por lo que para referenciar un alto espectro de información se deben considerar los 32 departamentos del país y sus proyectos agrícolas, industriales y de construcción activos e inactivos, así como todas las tipologías de MMNC utilizadas a nivel general en cada departamento.

Por ello, es necesario y se recomienda que Colombia profundice en la investigación de la contaminación atmosférica por MMNC, a partir de los documentos de la EPA y EEA, que son insumo para las estimaciones de dicha contaminación. No obstante, es primordial iniciar con el control y registro de las características necesarias de los equipos que ingresan al país con el fin de realizar un inventario general y establecer el cálculo aproximado de la estimación de la contaminación de esa maquinaria. Teniendo en cuenta que en el futuro esperando que sea cercano, se impida el ingreso de MMNC con estándares de emisiones Tier 0, 1, 2 y 3 que con el tiempo serán obsoletos, optando por maquinaria menos contaminante y más actualizada, que como en la actualidad de estados unidos son los equipos contruidos con motores con estándar de emisiones Tier 4 en adelante.

Así mismo, se recomienda que Colombia se acerque a la realidad en los temas de contaminación atmosférica por MMNC. Esto pudiendo ser posible a través de reportes de contaminación atmosférica de todos los proyectos, obras o actividades que utilicen MMNC, que bien pueden ser integrados dentro de los Planes de Manejo Ambiental (PMA) en los estudios de impacto ambiental (EIA), con el fin de crear una base de información nacional real, acogiendo esta carga contaminante que, sumada a todos los estudios generales de contaminación, impactan drásticamente a la calidad del aire.

Bibliografía

- Alfo.com.mx. (2020). *Piloteadoras*. <https://alfo.com.mx/piloteadoras/>
- Andrés Guevara, M., Alejandro Guevara Luna, F., Felipe Mendez Espinosa, J., & Alejandro Belcázar Cerón, L. (2018). *Spatial and Temporal Assessment of Particulate Matter Using AOD Data from MODIS and Surface Measurements in the Ambient Air of Colombia*. <http://asianjae.org/xml/15651/15651.pdf>
- Andrew Uni, J. (2013). *Sistema de ventilación del cárter*. <https://es.slideshare.net/jimpalomares/sistema-de-ventilacin-del-crter>
- AUSA. (2013). *Autohormigonera X1100 RH*. <https://www.suministrosparedes.com/catalogos/autohormigoneras-AUSA/X1100RH.pdf>
- Banco Mundial. (1997). *Contaminación atmosférica por vehículos automotores*. <http://documents1.worldbank.org/curated/en/136631468263934974/pdf/WTP37310SPANISH.pdf>
- Castillo Grupo. (2019). *Composición y características del gasóleo*. <https://castillogrupo.com/blog/composicion-y-caracteristicas-del-gasoleo/>
- CDC - NIOSH. (1996). *Prevención de envenenamiento con monóxido de carbono producido por herramientas y equipos con motores pequeños de gasolina (96-118)*. https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/96-118_sp/default.html
- Construmatica.com. (2020). *Zanjadora*. <https://www.construmatica.com/construpedia/Zanjadora>
- Dallmann & Menon. (2016). *Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment*. www.theicct.org
- Desarrolloing.com.co. (2020). *¿Qué es un montacargas o manipuladores?* <https://www.desarrolloing.com.co/montacargas/>
- Diario Oficial De la Unión Europea. (2016). *REGLAMENTO (UE) 2016/1628 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*. http://publications.europa.eu/resource/cellar/5d1d6ef7-7bd1-11e6-b076-01aa75ed71a1.0023.03/DOC_1
- Diccionariodelaconstruccion.com. (2019). *Autohormigonera*. <http://www.diccionariodelaconstruccion.com/procesos-productivos-obra-civil/plantas-de->

hormigon-y-de-aridos/autohormigonera

EPA. (2005a). *Calculation of Age Distributions in the Nonroad Model: Growth and Scrappage*. <https://epa.gov>

EPA. (2005b). “*User’s Guide for the Final NONROAD2005 Model*.” <https://epa.gov>

EPA. (2010). *Median Life , Annual Activity , and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling*. <https://epa.gov>

EPA. (2013a). *Monóxido de carbono*. <https://espanol.epa.gov/cai/monoxido-de-carbono>

EPA. (2013b). *Particulate Matter (PM) Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>

EPA. (2017). *Regulations for Emissions from Nonroad Vehicles and Engines*. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-nonroad-vehicles-and-engines>

EPA. (2018a). *Emission Standards for Nonroad Engines and Vehicles*. <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-nonroad-engines-and-vehicles>

EPA. (2018b). *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b*. <https://www.epa.gov/nscep>

Es.telsmith.com. (2020). *¿Qué es una trituradora de mandíbula?* <https://es.telsmith.com/blog/what-is-a-jaw-crusher/>

European Environment Agency. (2013). *Pollutant Inventory Guidebook - 1.A.4 Non-road mobile sources and machinery*. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road-mobile-sources/view>

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>

FactorCO2. (2014). *Black Carbon y sus efectos en el clima*. https://www.factorco2.com/comun/docs/131-Series_CO2_Black_Carbon_Factor_CO2_20140613.pdf

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 69

Felipe Mendez Espinosa, J., & Morales Betancourt, R. (2020). *ESTRATEGIA DE LUCHA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMATIVA DE EMISIONES EN MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA*.

Mendez-Espinosa, J.F, Catalina Pinto Herrera, L., & Carlos Belalcázar Cerón, L. (2014). Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* |, 17, 17–34. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a1>

Gutiérrez, J. R., García, M. A. M., Tapia, C. H. M., Escobedo, J. J. M., & Mayorga, E. A. G. (2016). El Cambio Climático y la Salud Humana. *Biocenosis*, 31(1–2), 72–79. <http://201.196.149.98/revistas/index.php/biocenosis/article/view/1750>

IDEAM. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*.

IDEAM. (2020). *EMISIONES POR FUENTES MOVILES - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-moviles>

INEM. (1999). *INVENTARIO DE EMISIONES DE LOS ESTADOS DE LA FRONTERA NORTE DE MÉXICO*. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2204a-inventario-de-emisiones-de-los-estados-de-la-frontera-norte-de-mexico-1999-summary-es.pdf>

J.F. Mendez-Espinosa; L. Belalcazar; R. Betancourt. (2019). *Impacto regional en la calidad del aire de las emisiones de quema de biomasa en el norte de Sudamérica*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135223101930072X>

L.A. Giraldo & E. Behrentz. (2016). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/inventario_de_emisiones_fuentes_moviles.pdf

Logismarket.com.ar. (2020a). *Perforadoras*. <https://www.logismarket.com.ar/perforadoras/1449391170-cp.html>

Logismarket.com.ar. (2020b). *Plataformas telescópicas*. <https://www.logismarket.com.ar/plataformas-elevadoras-telescopicas/1179608898-cp.html>

maximdomenech.es. (2020). *Dumper*. <https://maximdomenech.es/maquinaria-tv/que-es-un-dumper-y-tipos/>

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 70

Metrogas. (2020). *Contaminación por uso de combustibles | GNL Movil | Metrogas*. http://www.metrogas.cl/gnl_movil/asesoria_ambiental_1

Ministerio de Ambiente. (2012). *Diagnostico Nacional de Salud Ambiental*. [https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico de salud Ambiental compilado.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf)

Ministerio de Ambiente. (2018). *Contenido Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC)*. https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/CCVC/Subproducto_1.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Resolución 1111*. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527825/Resolución+1111+de+2013+Modifica+parcialmente+Resolución+910+de+2008.pdf/17e33a3b-fbdb-4e99-a7aa-6c6930dd139f>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *CONPES 3943 - Política para el mejoramiento de la Calidad del Aire - Colombia*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3943.pdf>

OMS. (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Orjuela, A. U. (2018). *Inventario de emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones en el área urbana de la ciudad de Bogotá*. http://bdigital.unal.edu.co/71928/1/Trabajo_de_grado_jaubaqueo_23032019%281%29.pdf

PNUD - ODS 13. (2015). *Objetivo 13: Acción por el clima | PNUD*. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>

Ramírez, C., Acevedo Bohórquez, J., Pablo, J., Suescún, B., & Miguel Velásquez, J. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterización-de-la-contaminación-atmosférica-en-Colombia.pdf>

Rypdal, K., Rive, N., Berntsen, T. K., Klimont, Z., Mideksa, T. K., Myhre, G., & Skeie, R. B. (2009). Costs and global impacts of black carbon abatement strategies. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 61(4), 625–641. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2009.00430.x>

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y 71
climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

Sneider Galindo Ruiz, S., & Duvan Silva Nuñez, H. (2016). *IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR EL USO DE MAQUINARIA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN*.

[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/12566/4/IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR EL USO DE MAQUINARIA EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/12566/4/IMPACTOS%20AMBIENTALES%20PRODUCIDOS%20POR%20EL%20USO%20DE%20MAQUINARIA%20EN%20EL%20SECTOR%20DE%20LA%20CONSTRUCCI%C3%93N.pdf)

WHO. (2005). *Air Quality Guidelines Global Update*. www.euro.who.int


ANEXOS

Anexo A. Muestras de cálculo

Con el objeto de validar los cálculos realizados y los resultados obtenidos de los anexos C, D y E a partir de la metodología de esta investigación, para la estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos y variaciones porcentuales, se seleccionó un equipo de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) con las características utilizadas dentro de este documento y las establecidas por el fabricante: Autohormigonera (AUSA, 2013) , como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Autohormigonera: MMNC objeto de estudio para la estimación de emisiones y variación porcentual de contaminantes atmosféricos y climáticos.

Maquinaria objeto de estudio Autohormigonera	Especificaciones		
	Modelo de ejemplo	AUSA X1100 RH	
	Tipología de MMNC	Autohormigonera	
	Definición	Es un equipo diseñado para fabricar, transportar y descargar el hormigón	
	Potencia (kW)	84,3 (Tabla 2)	
	Factor de Carga FCg	0,59 (Tabla 2)	
	Año de fabricación o modelo	2005	
	Tecnología en función de la potencia	Tier 3	
	Combustible	Diésel	

Nota: Atributos y especificaciones técnicas de una tipología de MMNC objeto de estudio para la estimación de emisiones y variación porcentual de contaminantes atmosféricos y climáticos, para muestra de cálculo. Realizado por el autor. Datos obtenidos de la ficha del fabricante (AUSA, 2013)

- **Cálculo 1. Estimación de HUg , FCg y PNg**

Estime el Nivel de actividad (HUg), factor de Carga (FCg) y potencia nominal (PNg) para una tipología de MMNC del rubro Construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisiones Tier 3.

Respuesta: La Tabla 2. Establece independientemente del número de unidades de MMNC y estándar de emisiones, para Autohormigonera un nivel de actividad horas anuales de uso (HUg) = 580 - Factor de carga (FCg) = 0,59 y Potencia nominal (PNg) 84,3 kW.

- **Cálculo 2. Estimación del FE_{SS} y $BSFC$**

Estime el factor de emisión para maquinaria nueva (FE_{SS}) de HC, CO, NO_x, PM₁₀ y consumo de combustible ($BSFC$) para una tipología de MMNC del sector de Construcción (Autohormigonera) con estándar de emisiones Tier 3 y potencia nominal para Autohormigonera establecida en la Tabla 2.

Respuesta: La Tabla 7 Independientemente del número de unidades de MMNC, ubica la maquinaria con potencia nominal (PNg) de 84,3 kW y estándar de emisiones Tier 3, en un rango de potencia nominal (PNg) entre >75 a 130 kW, Factor de emisión de maquinaria nueva (FE_{SS}) de HC = 0,25 - CO = 1,16 - NO_x = 3,35 - PM₁₀ = 0,30 y $BSFC$ = 223 [g/kW-hr] respectivamente.

- Cálculo 3. Estimación de FAT

Estime el factor de ajuste transitorio FAT de HC, CO, NO_x, PM₁₀ y BSFC para una tipología de MMNC del sector de Construcción (Autohormigonera), con estándar de emisiones Tier 3.

Respuesta: La Tabla 3.

Establece para el sector de construcción la Autohormigonera, con un estándar de emisiones de Tier 3, un FAT para HC = 1,05 – CO = 1,53 – NO_x = 1,04 - PM₁₀ = 1,47 – BSFC = 1

- Cálculo 4. Estimación del *FD*

Estime el factor de deterioro *FD* de HC, CO y NO_x, para una tipología de MMNC del sector de Construcción (Autohormigonera modelo 2005), con estándar de emisiones Tier 3 determinando la edad del equipo a 2020.

Respuesta: Teniendo en cuenta que para calcular el factor de deterioro *FD* se requiere de una serie de datos que deben ser calculados, en este caso se iniciara calculando el tiempo acumulado y tomando los datos correspondientes al tipo de maquinaria (Autohormigonera) así: horas anuales de uso (HU_g) = 580 (horas/año), quedaría:

$$\text{Tiempo acumulado} = HU_g * \text{edad del equipo (años)}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo acumulado} &= 580 \text{ (horas/año)} * (\text{Año 2020} - \text{Año modelo 2005}) \\ &= 8700 \text{ (horas/año)} \end{aligned}$$

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 75

Posteriormente se calcula el factor de edad con la Ecuación 5 y se trasladan los datos requeridos para el equipo (Autohormigonera): Potencia nominal del motor que para Autohormigonera es de (PNg) = 84,3 kW, Factor de carga (FCg) = 0,59, y el tiempo de vida media según potencia del motor. Dicha potencia se encuentra en el rango de entre >37 a 225 por lo que el tiempo de vida media HU_{media} es de 4667 horas. Así, se procede a aplicar la Ecuación 5 de la siguiente forma:

$$Factor\ de\ edad = \frac{tiempo\ de\ vida\ acumulado \cdot FC_g}{tiempo\ de\ vida\ media\ HU_g\ (horas) \mathbf{Tabla\ 2}}$$

$$Factor\ de\ edad = \frac{8700\ (horas/año) \cdot 0,59}{4667\ (horas) \mathbf{Tabla\ 2}} = 1,09\ años$$

Habiendo realizado los cálculos correspondientes se procede a calcular el factor de deterioro FD teniendo en cuenta el condicional dado en el concepto FD, el factor de edad es mayor a 1 se utilizará la (Ecuación 4.), y el factor de deterioro relativo Ac (Tabla 4.

siendo el estándar de emisiones propuesto Tier 3, quedaría:

$$Si\ Factor\ de\ edad_g > 1\ Entonces\ FD = 1 + A_c$$

$$FD_{HC} = 1 + 0,027 = 1,027$$

$$FD_{CO} = 1 + 0,151 = 1,151$$

$$FD_{NOx} = 1 + 0,008 = 1,008$$

$$FD_{PM_{10}} = 1 + 0,473 = 1,473$$

- **Cálculo 5. Estimación de FE_{HC} - FE_{CO} - FE_{NOx}**

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir del estándar de emisión Tier 3 de las muestras de **cálculo 2** (rango de potencia nominal (PNg) entre >75 a 130 kW, Factor

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y 76 climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

de emisión de maquinaria nueva (FE_{SS}) de HC = 0,25 - CO = 1,16 - NOx = 3,35 - PM₁₀ = 0,30 y BSFC = 223 [g/kW-hr] respectivamente), **cálculo 3** (FAT para HC = 1,05 – CO = 1,53 – NOx = 1,04 - PM₁₀ = 1,47) y **cálculo 4** ($FD_{HC} = 1,027 - FD_{CO} = 1,151 - FD_{NOx} = 1,008 - FD_{PM_{10}} = 1,473$) estime el factor de emisión FE para HC, CO, NOx.

Respuesta: para estimar el FE se utiliza la Ecuación 2, y de acuerdo con el estándar de emisiones propuesto Tier 3 se tiene:

$$FE_{HC} = FE_{SS} * FAT * FD = 0,25 \text{ g/kW} - \text{hr} * 1,05 * 1,027 * 1,02 = 0,274 \text{ g/kW} - \text{hr}$$

$$FE_{CO} = FE_{SS} * FAT * FD = 1,16 \text{ g/kW} - \text{hr} * 1,53 * 1,151 = 2,042 \text{ g/kW} - \text{hr}$$

$$FE_{NOx} = FE_{SS} * FAT * FD = 3,35 \text{ g/kW} - \text{hr} * 1,04 * 1,008 = 3,511 \text{ g/kW} - \text{hr}$$

- **Cálculo 6. Estimación de $FE_{PM_{10}}$**

Estime el factor de emisión FE de PM₁₀, para una tipología de MMNC del sector de construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisión Tier 3, ajuste por azufre en el combustible Diésel (soxds) de 20 ppm Tabla 6. y los datos necesarios para el cálculo de $FE_{PM_{10}}$ extraídos de los resultados las muestras de **Cálculo 1**, **cálculo 2**, **cálculo 3** y **cálculo 4**, presentadas anteriormente.

Respuesta: A partir del enunciado para estimar el factor de emisión FE de PM₁₀ se tomaran los datos requeridos de la muestra de **Cálculo 1**, **cálculo 2**, **cálculo 3** y **cálculo 4**.

Así pues, para hallar $FE_{PM_{10}}$ se requiere calcular:

$BSFC_{adj}$ = Consumo específico de combustible ajustado en (g/kW-hr). Para determinar este valor se utiliza la (Ecuación 8)

$$BSFC_{adj} = BSFC * FAT_{BSFC} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$BSFC_{adj} = 223 * 1 = 223$$

S_{PMadj} = Ajuste por contenido de azufre comercial en el combustible. Los valores soxcnv y soxbas se encuentran en función del estándar de emisiones y soxdsl el enunciado lo expresa en 20ppm = 0,002%, Ecuación 7

$$S_{PMadj} = BSFC_{adj} * 7,0 * soxcnv * 0,01 * (soxbas - soxdsl) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$S_{PMadj} = 223 * 7,0 * 0,02247 * 0,01 * (0,2 - 0,002) = 0,0694$$

Finalmente para el cálculo del factor de emisión (FE_c) asociado a PM_{10} y una concentración en el combustible utilizado de 20 ppm se utiliza la Ecuación 6.

$$FE_{PM_{10}(soxdsl = 20ppm)} = FE_{SS} * FAT * FD - S_{PMadj} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Ajustada la ecuación de acuerdo con los datos:

$$FE_{PM_{10}(soxdsl = 20ppm)} = FE_{SS} * FAT_{PM_{10}} * FD_{PM_{10}} - S_{PMadj}$$

$$FE_{PM_{10}(soxdsl = 20ppm)} = (0,30 \text{ (g/kW - hr)} * 1,47 * 1,473) - 0,0694 = 0,580 \text{ g/kW - hr}$$

- Cálculo 7. Estimación de $FE_{PM_{2.5}}$ y FE_{BC}

Estime el factor de emisión FE de $PM_{2.5}$, y BC para una tipología de MMNC del sector de construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisión Tier 3, potencia establecida de acuerdo con la Tabla 2. , y ajuste por azufre en el combustible Diésel

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y 78 climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia.

(soxdsl) de 20 ppm a partir del valor obtenido de FE para PM₁₀ de la muestra de **Cálculo**

6.

Respuesta: PM_{2.5} equivale al 97% de PM₁₀ entonces se adapta la Ecuación 6, así:

$$FE_{PM_{2.5}(soxdsl = 20ppm)} = 97\% * 0,01 * FE_{PM_{10}}$$

$$FE_{PM_{2.5}(soxdsl = 20ppm)} = 97\% * 0,01 * 0,580g/kW - hr = 0,562g/kW - hr$$

BC se determina en función de la potencia (Tabla 3.

) PNG = 84.3. La potencia dada es menor a < 130 kW y de acuerdo con el estándar de emisiones Tier 3 la fracción BC es 0,8, quedaría.

$$FE_{BC(soxdsl = 20ppm)} = Fracción_{BC} * FE_{PM_{10}}$$

$$FE_{BC(soxdsl = 20ppm)} = 0,8 * 0,580 = 0,464g/kW - hr$$

- **Cálculo 8. Estimación de FE_{CO₂}**

Estime el factor de emisión FE de CO₂, para una tipología de MMNC del sector de construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisión Tier 3, potencia establecida de acuerdo con la Tabla 2. , valor obtenido de BSFC_{adj} de la muestra de **Cálculo 6** y el valor obtenido de FE_{HC} de la muestra de **cálculo 5**.

Respuesta: En la muestra de **Cálculo 6** BSFC_{adj} = 223 (g/kW-hr), teniendo en cuenta que para su cálculo el valor de ajuste por azufre en el combustible Diésel (soxdsl) es de 20 ppm y en la muestra de **Cálculo 5** FE_{HC} = 0,274 g/kW - hr. Así pues Para estimar el FE_{CO₂} se utiliza la Ecuación 9.

$$FE_{CO_2} = (BSFC_{adj} - FE_{HC}) * 0,87 * \left(\frac{44}{12}\right) \text{ Ecuación 9}$$

$$FE_{CO_2} = (223 - 0,274) * 0,87 * (3,6666) = 710,483 g/kW - hr$$

- **Cálculo 9. Estimación de FE_{SO_2}**

Estime el factor de emisión FE de CO₂, para una tipología de MMNC del sector de construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisión Tier 3, potencia establecida de acuerdo con la Tabla 2. , valor obtenido de BSFC_{adj} de la muestra de **Cálculo 6** y el valor obtenido de FE_{HC} de la muestra de **cálculo 5**.

Respuesta: En la muestra de **Cálculo 6** BSFC_{adj} = 223 (g/kW-hr), teniendo en cuenta que para su cálculo el valor de ajuste por azufre en el combustible Diésel (soxdsl) es de 20 ppm (0,002%) y en la muestra de **cálculo 5** FE_{HC} = 0,274 g/kW – hr. Así pues Para estimar el FE_{SO_2} se utiliza la Ecuación 10

$$FE_{SO_2} = (BSFC_{adj} * (1 - soxcnv) * FE_{HC}) * 0,01 * soxdsl * 2 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$FE_{SO_2} = (223 * (1 - 0,02247) * 0,274) * 0,01 * 0,002 * 2 = 0,0023 \text{ (g/kW – hr)}$$

- **Cálculo 10. Estimación de emisiones HC , CO , NO_x ,**

PM_{10} , CO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ y BC

Con la información obtenida en las muestras de **Cálculo 1**, **cálculo 5**, **Cálculo 6**, **Cálculo 7**, **Cálculo 8** y **cálculo 9**, estime las emisiones anuales (Toneladas) de los contaminantes HC , CO , NO_x , PM_{10} , CO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ y BC , para 1000 unidades (Ng) de una tipología de MMNC del sector de construcción (Autohormigonera) con un estándar de emisión Tier 3.

Datos: Tomando los datos de la muestra de:

Cálculo 1 para Autohormigonera

- Un nivel de actividad horas anuales de uso (HUg) = 580
- Factor de carga (FCg) = 0,59
- Potencia nominal (PNg) 84,3 kW,

Cálculo 5

- $FE_{HC} = 0,274 \text{ g/kW} - \text{hr}$,
- $FE_{CO} = 2,042 \text{ g/kW} - \text{hr}$,
- $FE_{NOx} = 3,511 \text{ g/kW} - \text{hr}$,

Cálculo 6

- $FE_{PM_{10}(sodxl = 20ppm)} = 0,580 \text{ g/kW} - \text{hr}$,

Cálculo 7

- $FE_{PM_{2.5}(sodxl = 20ppm)} = 0,562 \text{ g/kW} - \text{hr}$,
- $FE_{BC(sodxl = 20ppm)} = 0,464 \text{ g/kW} - \text{hr}$,

Cálculo 8

- $FE_{CO_2} = 710,483 \text{ g/kW} - \text{hr}$ y

Cálculo 9

- $FE_{SO_2} = 0,0023 \text{ (g/kW} - \text{hr)}$.

Respuesta: Para la estimación de las emisiones generadas por los contaminantes *HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5} y BC*, se calcula con la Ecuación.1, y teniendo en

cuenta que lo requerido son toneladas se dividen el resultado (gramos) en 1000000g =

1Ton

$$E_c = \sum N_g * HU_g * PN_g * FC_g * FE_{c.g} \text{ Ecuación.1}$$

$$E_{c(HC)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 0,274 = \frac{7904204g}{1000000g} = 7,9 \text{ Ton}$$

$$E_{c(CO)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 2,042 = \frac{58906513g}{1000000g} = 58 \text{ Ton}$$

$$E_{c(NOx)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 3,511 = \frac{101283432g}{1000000g} = 101,2 \text{ Ton}$$

$$E_{c(PM_{10})} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 0,580 = \frac{16731526g}{1000000g} = 16,7 \text{ Ton}$$

$$E_{c(CO_2)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 710,483 = \frac{20495622923g}{1000000g} = 20495 \text{ Ton}$$

$$E_{c(SO_2)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 0,0023 = \frac{66349g}{1000000g} = 0,066 \text{ Ton}$$

$$E_{c(PM_{2.5})} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 0,562 = \frac{16212272g}{1000000g} = 16,2 \text{ Ton}$$

$$E_{c(BC)} = 1000 * 580 * 84,3 * 0,59 * 0,464 = \frac{13385221g}{1000000g} = 13,3 \text{ Ton}$$

Nota: Los resultados pueden variar según sea el número de decimales utilizados en el cálculo.

- Cálculo 11. Variación porcentual primer estrategia

(Variación en los niveles de azufre en el combustible diésel)

A partir de las emisiones generadas del equipo Autohormigonera que se encuentran en el ANEXO C (Tabla 13), calcule la variación porcentual, utilizando la Ecuación 11.

Respuesta:

$$\text{Variación porcentual}_{c,g} = \left(\frac{\text{Tecnología propuesta}_{c,g} - \text{Tecnología actual}_{c,g}}{\text{Tecnología actual}_{c,g}} \right) * 100$$

Donde,

- *Variación porcentual*_{c,g}: es el cambio en porcentaje de emisiones de un contaminante c para un segmento de MMNC g base, y una mejora propuesta en esta. Esta dado en [%]
- *Tecnología actual*_{c,g}: emisiones generadas de un contaminante c para un segmento de 1000 und de MMNC con tecnología y/o nivel de azufre inicial (Tier 3 generado por retraso tecnológico y nivel de azufre inicial 50ppm). Las emisiones por variación en los niveles de azufre se encuentran en el **ANEXO C** (Tabla 13).
- *Tecnología propuesta*_{c,g}: emisiones generadas de un contaminante c por un segmento de MMNC con tecnología mejorada y/o nivel de azufre reducido (nivel de azufre reducido (20ppm).
- 100 = Factor de conversión de decimal a porcentaje (%)
- Resultado con un valor negativo se asocia a una reducción y positivo a un incremento en las emisiones de un contaminante específico.

Nota aclaratoria: Para este ejemplo, solo se tomarán las toneladas emitidas con las variaciones en el contenido de azufre de 50ppm y 20ppm del estándar de emisiones Tier 3 generado por retraso tecnológico. Todas las variaciones porcentuales se encuentran en el **ANEXO C** (Tabla 13).

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(HC)} &= \left(\frac{(20ppm = 8 \text{ Ton}) - (50ppm = 8 \text{ Ton})}{(50ppm = 8 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{8 - 8}{8} \right) * 100 = 0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(CO)} &= \left(\frac{(20ppm = 59 \text{ Ton}) - (50ppm = 59 \text{ Ton})}{(50ppm = 59 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{59 - 59}{59} \right) * 100 = 0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(NOx)} &= \left(\frac{(20ppm = 101 \text{ Ton}) - (50ppm = 101 \text{ Ton})}{(50ppm = 101 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{101 - 101}{101} \right) * 100 = 0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(PM10)} &= \left(\frac{(20ppm = 16,42 \text{ Ton}) - (50ppm = 16,46 \text{ Ton})}{(50ppm = 16,46 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{16,42 - 16,46}{16,46} \right) * 100 = -0,2\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(CO2)} &= \left(\frac{(20ppm = 20496 \text{ Ton}) - (50ppm = 20496 \text{ Ton})}{(50ppm = 20496 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{20496 - 20496}{20496} \right) * 100 = 0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(SO2)} &= \left(\frac{(20ppm = 0,25 \text{ Ton}) - (50ppm = 0,63 \text{ Ton})}{(50ppm = 0,63 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{0,25 - 0,63}{0,63} \right) * 100 = -60\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(PM2.5)} &= \left(\frac{(20ppm = 15,93 \text{ Ton}) - (50ppm = 15,96 \text{ Ton})}{(50ppm = 15,93 \text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{15,93 - 15,96}{15,93} \right) * 100 = -0,2\% \end{aligned}$$

$$\text{Variación porcentual}_{(BC)} = \left(\frac{(20ppm = 13,16 \text{ Ton}) - (50ppm = 13,14 \text{ Ton})}{(50ppm = 13,14 \text{ Ton})} \right) * 100$$

$$= \left(\frac{13,16 - 13,14}{13,14} \right) * 100 = -0,2\%$$

- Cálculo 12. Variación porcentual segunda estrategia (Variación en el estándar de emisión a partir del retraso tecnológico USA, asociado a la variación en los niveles de azufre en el combustible diésel).

A partir de las emisiones generadas del equipo Autohormigonera que se encuentran en el **ANEXO D** (Tabla 15.), calcule la variación porcentual, utilizando la Ecuación 11.

Respuesta:

$$Variación\ porcentual_{c,g} = \left(\frac{Tecnología\ propuesta_{c,g} - Tecnología\ actual_{c,g}}{Tecnología\ actual_{c,g}} \right) * 100$$

Donde,

- *Variación porcentual_{c,g}*: es el cambio en porcentaje de emisiones de un contaminante c para un segmento de MMNC g base, y una mejora propuesta en esta. Está dado en [%].
- *Tecnología actual_{c,g}*: emisiones generadas de un contaminante c para un segmento de 1000 und de MMNC con tecnología y/o nivel de azufre inicial (Tier 3 generado por retraso tecnológico y nivel de azufre inicial 50ppm).

- *Tecnología propuesta*_{c,g}: emisiones generadas de un contaminante c por un segmento de MMNC con tecnología mejorada y/o nivel de azufre reducido (Estándar de emisiones mejorado a Tier 4IA) y nivel de azufre (10ppm).

- 100 = Factor de conversión de decimal a porcentaje (%)

- Resultado con un valor negativo se asocia a una reducción y positivo a un incremento en las emisiones de un contaminante específico.

Nota aclaratoria: Para este ejemplo, solo se tomarán las toneladas emitidas en el estándar Tier 3 generado por retraso tecnológico con concentración de azufre en 50 ppm, y las toneladas emitidas en el estándar Tier 4IA (estándar mejorado) con concentración de azufre en 10 ppm. Todas las variaciones porcentuales se encuentran en el **ANEXO D** (Tabla 14 y Tabla 15.).

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(HC)} &= \left(\frac{(10ppm=1\text{ Ton})-(50ppm=8\text{ Ton})}{(50ppm=8\text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{1,4 - 8}{8} \right) * 100 = -82\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(CO)} &= \left(\frac{(10ppm=9\text{ Ton})-(50ppm=59\text{ Ton})}{(50ppm=59\text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{9 - 59}{59} \right) * 100 = -85\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Variación porcentual}_{(NOx)} &= \left(\frac{(10ppm=77\text{ Ton})-(50ppm=101\text{ Ton})}{(50ppm=101\text{ Ton})} \right) * 100 \\ &= \left(\frac{77 - 101}{101} \right) * 100 = -24\% \end{aligned}$$

$$\text{Variación porcentual}_{(PM10)} = \left(\frac{(10ppm=1,4\text{ Ton})-(50ppm=16,46\text{ Ton})}{(50ppm=16,46\text{ Ton})} \right) * 100$$

Análisis de estrategias para reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos asociados a maquinaria móvil no de carretera en Colombia. 86

$$= \left(\frac{1,4 - 16,46}{16,46} \right) * 100 = -92\%$$

$$\text{Variación porcentual}_{(CO_2)} = \left(\frac{(10ppm = 20517 \text{ Ton}) - (50ppm = 20496 \text{ Ton})}{(50ppm = 20496 \text{ Ton})} \right) * 100$$

$$= \left(\frac{20517 - 20496}{20496} \right) * 100 = 0\%$$

$$\text{Variación porcentual}_{(SO_2)} = \left(\frac{(10ppm = 0,1 \text{ Ton}) - (50ppm = 0,63 \text{ Ton})}{(50ppm = 0,63 \text{ Ton})} \right) * 100$$

$$= \left(\frac{0,1 - 0,63}{0,63} \right) * 100 = -80\%$$

$$\text{Variación porcentual}_{(PM_{2.5})} = \left(\frac{(10ppm = 1,4 \text{ Ton}) - (50ppm = 15,96 \text{ Ton})}{(50ppm = 15,93 \text{ Ton})} \right) * 100$$

$$= \left(\frac{1,4 - 15,96}{15,93} \right) * 100 = -92\%$$

$$\text{Variación porcentual}_{(BC)} = \left(\frac{(10ppm = 1,1 \text{ Ton}) - (50ppm = 13,14 \text{ Ton})}{(50ppm = 13,14 \text{ Ton})} \right) * 100$$

$$= \left(\frac{1,1 - 13,14}{13,14} \right) * 100 = -92\%$$

Anexo B. Detalle de maquinaria móvil no de carretera (MMNC)

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
Autohormigonera	Es un camión que lleva montada una cuba giratoria, por lo general de eje inclinado, y que se utiliza para transportar el hormigón fabricado en una central de hormigonado a largas distancias, a la vez que se mantiene el amasado de la mezcla, que en el caso de centrales dosificadoras se reserva a la autohormigonera. Su capacidad es de varios metros cúbicos, siendo utilizadas las más pequeñas en aquellos puntos donde el acceso o la dificultad de maniobra las hace aconsejables. Descargan mediante canaletas directamente o a bombas de hormigón para su puesta en obra. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/procesos-productivos-obra-civil/plantas-de-hormigon-y-de-aridos/autohormigonera)	X	X	-
Bulldozer	Es un tractor sobre orugas, que se mueve a baja velocidad y que lleva acoplado una cuchilla de acero perpendicular a la dirección de su avance, aunque en algunos casos puede formar esta cuchilla un ángulo con la dirección de avance. Esto le permite empujar el material hacia delante o hacia un lado, utilizándose para la limpieza de terrenos, movimiento de materiales a corta distancia, efectuando cortes en laderas, limpiando escombros, nivelando el terreno, empujando cargas o tirando de ellas. Suele llevar un escarificador en su parte posterior, de varios dientes de gran resistencia, para romper materiales de gran dureza. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/acondicionamiento-del-terreno-y-cimentaciones/bulldozer)	X	X	X
Camión fuera de carretera	Equipo autopulsado no de carretera usado para volteo. Su potencia tiende a ser mayor a 50kw o autopulsado diseñado como plataforma de perforación o Equipo subterráneo diseñado para volteo. Es el equipo de trabajo que se utiliza para el transporte de material. (https://www.construmatica.com/construpedia/Cami%C3%B3n_de_Obra_y_Carretera)	X	X	-

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
Cargador Frontal	Es un equipo tractor, que tiene una cuchara en su extremo frontal, utilizado específicamente en la construcción de edificios, minería, carreteras, autopistas, túneles, presas hidráulicas para cargar camiones con materiales (piedra, arena, tierra, y otros.) (https://www.ecured.cu/Cargador frontal)	X	X	X
Dúmper	Camión basculante de gran maniobrabilidad y apto para todo terreno, especialmente en pistas de obra en mal estado, destinado al transporte de cargas de hasta 75 t. En obra civil puede ser rígido, articulado, para circular o no (extraviales, más grandes) por carretera. Es de gran robustez, con componentes de alta durabilidad, neumáticos tipo todo-terreno y su peso es 3 o 4 veces mayor que el de un camión normal, consiguiendo una gran producción en la carga de material. Suele estar provisto de un mecanismo que permite levantar o girar la caja, para realizar la descarga lateral, frontal o trasera. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/acondicionamiento-del-terreno-y-cimentaciones/dumper)	X	-	-
Excavadora	Vehículo especialmente diseñado para la excavación o desmonte del terreno, mediante una cuchara de ataque frontal, acoplada a superestructura giratoria en plano horizontal. Puede estar acoplada sobre neumáticos u oruga: - Sobre neumáticos: Consta de un bastidor sobre neumáticos, un motor principal para la propulsión y accionamiento del sistema hidráulico o eléctrico, pluma y elemento de excavación (frontal, retro, almeja y dragalina, etc.) situado en la parte delantera de la máquina. Es característica esencial, el giro de la pluma alrededor de un eje vertical. - Sobre oruga: Se diferencia del anterior, en que va en calzada con oruga. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/acondicionamiento-del-terreno-y-cimentaciones/excavadora)	X	X	X
Grúa telescópica		X	X	-

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
	<p>Son el equipo especial que facilita el izaje de cargas pesadas y el movimiento de toneladas de materiales de un lugar a otro. Las grúas telescópicas son un tipo de grúas pesadas que se emplean para transportar objetos. Se utilizan por lo regular en las operaciones de transporte del día a día pero también hay que señalar que estas pesadas grúas son muy importantes a la hora de realizar maniobras en puertos marítimos. (https://www.gruasyequiposgarcia.com/que-son-las-gruas-telescopicas/)</p>			
Manipulador	<p>Es una máquina autopropulsada y conducida por un operario cualificado. Por lo general se desplaza sobre ruedas y está concebida para transportar material y levantarlo para situarlo en posiciones elevadas, gracias a su brazo telescópico. El brazo permite el acoplamiento de distintos accesorios o útiles, transformando la máquina, con una pala en una cargadora, con unas pinzas en una carretilla mecánica, con un plumín en una autogrúa, etc. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/instalaciones-cerramientos-y-acabados/acabados/manipulador-telescopico)</p>	X	X	-
Minicargador	<p>La minicargadora compacta es una maquina usada en construcción. La misma consta de chasis rígido, cubierta desmontable donde se monta una cuchara frontal de poco tamaño. El motor suele ir en la parte trasera, tiene un sistema hidráulico para elevación de la cuchara o montaje aditamentos. Puede desplazarse sobre un sistema de oruga o 4 neumáticos. (https://www.euroinnova.co/blog/que-es-una-minicargadora-y-cuales-son-sus-partes)</p>	X	X	X
Miniexcavadora	<p>Son máquinas autopropulsadas sobre ruedas, cadenas o apoyos con una estructura superior capaz de efectuar una rotación de 360° que excava, carga, eleva, gira y descarga materiales por la acción de una cuchara fijada a un conjunto de pluma y balancín o brazo, sin movimiento del chasis portante, y cuya masa en orden de trabajo (véase ISO 6016) es ≤ 6.000 kg (https://www.lineapreencion.com/ProjectMiniSites/IS41/html/cap-1/cap23.htm)</p>	X	X	X
Motoniveladora	<p>Máquina automotriz, sobre ruedas con una hoja regulable situada entre los ejes delantero y trasero, que corta, desplaza y extiende material, generalmente para la nivelación de superficies. Se emplea para remover, extender y conformar materiales, refinar bases y taludes, perfilar zanjas y cunetas, reparto de los materiales procedentes de la</p>	X	X	X

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
	disgregación del firme, etc. A veces efectúa trabajos de escarificado de terrenos, por lo que lleva un escarificador en su parte posterior, consistente en tres o más dientes que oscilan ligeramente, de forma recta o curvada, de gran resistencia, que permite romper materiales de gran dureza. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/acondicionamiento-del-terreno-y-cimentaciones/motoniveladora)			
Perforador	Es la máquina utilizada para hincar el suelo y abrir hoyos de diámetro y profundidad variable. Puede transportarse fácilmente. En caso de encontrarse en el transcurso de la excavación con piedras grandes, actúa el embrague centrífugo de seguridad, que desconecta la barrena, mediante lo cual se evitan daños a la maquinaria. (https://www.construmatica.com/construpedia/Perforadora)	X	X	-
Piloteadora	Son elementos constructivos de tipo puntual, usados para la cimentación profunda en obras de construcción, que permiten transmitir las cargas de la estructura hasta capas de suelo más profundas que tengan la capacidad de carga suficiente para soportarlas. (https://alfo.com.mx/piloteadoras/)	X	-	-
Plataforma telescópica	Son un tipo de maquinaria de trabajo para altura, caracterizadas por su facilidad para alcanzar grandes distancias de trabajos requeridas a las que otro tipo de plataformas no pueden llegar. (https://cgbsas.com/hablemos-de-las-plataformas-telescopicas/)	X	X	-
Retroexcavadora		X	X	X

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
	Máquina automotriz, con una estructura diseñada para la excavación o desmonte del terreno, mediante cuchara de ataque hacia la máquina, acoplada a superestructura giratoria en plano horizontal. Cava por debajo del nivel del suelo, de forma que el cangilón se desplaza hacia la máquina, levantando, balanceando y descargando materiales mientras permanece estacionaria. Consta de un bastidor, sobre neumáticos, orugas, raíles o plataforma; un brazo articulado, un cangilón de excavación y un motor para la propulsión y accionamiento del sistema hidráulico. Puede llevar una cuchara de carga situada en la parte delantera, que carga o excava mediante un movimiento de avance. (http://www.diccionariodelaconstruccion.com/acondicionamiento-del-terreno-y-cimentaciones/retroexcavadora)			
Tractor	Un tractor es un vehículo especial autopropulsado que se usa para arrastrar o empujar remolques, aperos u otra maquinaria o cargas pesadas. Hay tractores destinados a diferentes tareas, como la agricultura, la construcción, el movimiento de tierras o el mantenimientos de espacios verdes profesionales (tractores compactos). Se caracterizan principalmente por su buena capacidad adherencia al terreno. (https://boletinagrario.com/ap-6,tractor,735.html)	X	X	X
Trituradora	Las trituradoras pueden utilizarse como trituradoras primarias, secundarias o terciarias en función del tamaño del producto final que necesite el productor. Están disponibles en las configuraciones estacionaria, con oruga y portátil para satisfacer las demandas de cualquiera de estas industrias. (https://es.telsmith.com/blog/what-is-an-impact-crusher/)	X	X	-
Volqueta	Son vehículos automóviles que poseen un dispositivo mecánico para volcar la carga que transportan en un cajón que reposa sobre el chasis del vehículo. La composición mecánica de la volqueta depende precisamente del volumen de material que pueda transportar el cajón. Por tal razón, este tipo de maquinaria de carga cumple una función netamente de transporte. (https://aplicaciones2.ecuadorencifras.gob.ec/SIN/co_metal.php?id=44428.00.00)	X	-	-
Zanjadora		X	-	X

Tabla 12.

Tipología de maquinaria móvil no de carretera (MMNC) en Colombia y clasificación dentro del sector económico en el cual funciona.

TIPOLOGIA DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA (MMNC) EN COLOMBIA		SECTOR ECONOMICO		
TIPOLOGIA GENERAL MMNC	DEFINICIÓN	CONSTRUCCIÓN	INDUSTRIAL	AGRICOLA
	Es una máquina utilizada para la apertura rápida de zanjas continuas a campo abierto, el ensanche de carreteras y caminos, y las cimentaciones. Son palas mecánicas que arrancan la tierra de manera regular, abriendo zanjas del tamaño deseado y con buen acabado en el fondo y los laterales. Esto facilita que puedan instalarse dentro tuberías para diversos usos. Actúan en todo tipo de terreno excepto la roca.(https://www.construmatica.com/construpedia/Zanjadora)			

Nota: Clasificación y definición de la MMNC para la base de datos de LegisComex.
Realizado por el autor.

Anexo C. Variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos – climáticos asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual			
			HC	CO	NOx	PM10	CO2	SO2	PM 2.5	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO2	PM10, PM2.5 y BC	SO2
Autohormigonera	Tier 3	50 ppm	8	59	101	16,5	20496	0,63	16,0	13,2	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Autohormigonera	Tier 3	20 ppm	8	59	101	16,4	20496	0,25	15,9	13,1	50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Autohormigonera	Tier 3	15 ppm	8	59	101	16,4	20496	0,19	15,9	13,1	50 a 10 ppm	0,0%	-0,2%	-80%
Autohormigonera	Tier 3	10 ppm	8	59	101	16,4	20496	0,13	15,9	13,1	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Bulldozer	Tier 3	50 ppm	15	113	195	31,6	39344	1,21	30,6	25,3	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Bulldozer	Tier 3	20 ppm	15	113	195	31,5	39344	0,48	30,6	25,2	50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Bulldozer	Tier 3	15 ppm	15	113	195	31,5	39344	0,36	30,6	25,2	50 a 10 ppm	0,0%	-0,2%	-80%
Bulldozer	Tier 3	10 ppm	15	113	195	31,5	39344	0,24	30,6	25,2	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Camión fuera de carretera	Tier 2	50 ppm	353	2453	7492	357,7	1020267	31,26	347,0	250,4	50 a 20 ppm	0,0%	-0,4%	-60%
Camión fuera de carretera	Tier 2	20 ppm	353	2453	7492	356,2	1020267	12,51	345,5	249,3	50 a 15 ppm	0,0%	-0,5%	-70%
Camión fuera de carretera	Tier 2	15 ppm	353	2453	7492	356,0	1020267	9,38	345,3	249,2	50 a 10 ppm	0,0%	-0,6%	-80%
Camión fuera de carretera	Tier 2	10 ppm	353	2453	7492	355,7	1020267	6,25	345,0	249,0	20 a 15 ppm	0,0%	-0,1%	-25%

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual				
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO ₂	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂	
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-33%
Dúmpер	Tier 3	50 ppm	14	65	98	11,9	17044	0,52	11,5	8,3		50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Dúmpер	Tier 3	20 ppm	14	65	98	11,9	17044	0,21	11,5	8,3		50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Dúmpер	Tier 3	15 ppm	14	65	98	11,8	17044	0,16	11,5	8,3		50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Dúmpер	Tier 3	10 ppm	14	65	98	11,8	17044	0,10	11,5	8,3		20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Excavadora	Tier 3	50 ppm	19	141	242	39,2	48843	1,50	38,0	31,4		50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Excavadora	Tier 3	20 ppm	19	141	242	39,1	48843	0,60	38,0	31,3		50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Excavadora	Tier 3	15 ppm	19	141	242	39,1	48843	0,45	38,0	31,3		50 a 10 ppm	0,0%	-0,2%	-80%
Excavadora	Tier 3	10 ppm	19	141	242	39,1	48843	0,30	37,9	31,3		20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	50 ppm	34	278	491	51,3	99197	3,04	49,7	35,9		50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	20 ppm	34	278	491	51,1	99197	1,22	49,6	35,8		50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	15 ppm	34	278	491	51,1	99197	0,91	49,6	35,8		50 a 10 ppm	0,0%	-0,4%	-80%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	10 ppm	34	278	491	51,1	99197	0,61	49,5	35,7		20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual				
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO ₂	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂	
												15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Manipulador: Telescópico	Tier 2	50 ppm	15	98	179	11,2	22220	0,68	10,9	9,0		50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Manipulador: Telescópico	Tier 2	20 ppm	15	98	179	11,2	22220	0,27	10,8	8,9		50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Manipulador: Telescópico	Tier 2	15 ppm	15	98	179	11,2	22220	0,20	10,8	8,9		50 a 10 ppm	0,0%	-0,4%	-80%
Manipulador: Telescópico	Tier 2	10 ppm	15	98	179	11,2	22220	0,14	10,8	8,9		20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Miniexcavadora	Tier 2	50 ppm	3	20	25	4,3	3261	0,10	4,2	3,4		50 a 20 ppm	0,0%	-0,1%	-60%
Miniexcavadora	Tier 2	20 ppm	3	20	25	4,3	3261	0,04	4,2	3,4		50 a 15 ppm	0,0%	-0,1%	-70%
Miniexcavadora	Tier 2	15 ppm	3	20	25	4,3	3261	0,03	4,2	3,4		50 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-80%
Miniexcavadora	Tier 2	10 ppm	3	20	25	4,3	3261	0,02	4,2	3,4		20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Perforador	Tier 3	50 ppm	5	27	71	6,7	14964	0,46	6,5	5,3		50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Perforador	Tier 3	20 ppm	5	27	71	6,6	14964	0,18	6,4	5,3		50 a 15 ppm	0,0%	-0,4%	-70%
Perforador	Tier 3	15 ppm	5	27	71	6,6	14964	0,14	6,4	5,3		50 a 10 ppm	0,0%	-0,4%	-80%
Perforador	Tier 3	10 ppm	5	27	71	6,6	14964	0,09	6,4	5,3		20 a 15 ppm	0,0%	-0,1%	-25%
												20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
												15 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-33%
Piloteadora	Tier 3	50 ppm	6	30	80	11,6	16894	0,52	11,3	9,3		50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Piloteadora	Tier 3	20 ppm	6	30	80	11,6	16894	0,21	11,2	9,3		50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Piloteadora	Tier 3	15 ppm	6	30	80	11,6	16894	0,16	11,2	9,3		50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual			
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO ₂	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂
Piloteadora	Tier 3	10 ppm	6	30	80	11,6	16894	0,10	11,2	9,3	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Retroexcavadora	Tier 2	50 ppm	9	84	96	7,4	12733	0,39	7,2	5,9	50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Retroexcavadora	Tier 2	20 ppm	9	84	96	7,4	12733	0,16	7,1	5,9	50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Retroexcavadora	Tier 2	15 ppm	9	84	96	7,4	12733	0,12	7,1	5,9	50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Retroexcavadora	Tier 2	10 ppm	9	84	96	7,4	12733	0,08	7,1	5,9	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Volqueta	Tier 3	50 ppm	20	152	303	42,2	52590	1,61	41,0	33,8	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Volqueta	Tier 3	20 ppm	20	152	303	42,1	52590	0,64	40,9	33,7	50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Volqueta	Tier 3	15 ppm	20	152	303	42,1	52590	0,48	40,9	33,7	50 a 10 ppm	0,0%	-0,2%	-80%
Volqueta	Tier 3	10 ppm	20	152	303	42,1	52590	0,32	40,9	33,7	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Cargador Frontal	Tier 3	50 ppm	17	108	215	22,4	43385	1,33	21,7	15,7	50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Cargador Frontal	Tier 3	20 ppm	17	108	215	22,4	43385	0,53	21,7	15,6	50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Cargador Frontal	Tier 3	15 ppm	17	108	215	22,3	43385	0,40	21,7	15,6	50 a 10 ppm	0,0%	-0,4%	-80%
Cargador Frontal	Tier 3	10 ppm	17	108	215	22,3	43385	0,27	21,7	15,6	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Grúa Horquilla	Tier 2	50 ppm	24	236	267	22,3	35186	1,08	21,7	17,9	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual			
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO ₂	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂
Grúa Horquilla	Tier 2	20 ppm	24	236	267	22,3	35186	0,43	21,6	17,8	50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Grúa Horquilla	Tier 2	15 ppm	24	236	267	22,3	35186	0,32	21,6	17,8	50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Grúa Horquilla	Tier 2	10 ppm	24	236	267	22,3	35186	0,22	21,6	17,8	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Minicargador	Tier 2	50 ppm	10	73	59	6,0	7858	0,24	5,8	4,8	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Minicargador	Tier 2	20 ppm	10	73	59	6,0	7858	0,10	5,8	4,8	50 a 15 ppm	0,0%	-0,2%	-70%
Minicargador	Tier 2	15 ppm	10	73	59	6,0	7858	0,07	5,8	4,8	50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Minicargador	Tier 2	10 ppm	10	73	59	6,0	7858	0,05	5,8	4,8	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	50 ppm	19	97	271	14,0	57343	1,76	13,6	9,8	50 a 20 ppm	0,0%	-0,6%	-60%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	20 ppm	19	97	271	13,9	57343	0,70	13,5	9,7	50 a 15 ppm	0,0%	-0,7%	-70%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	15 ppm	19	97	271	13,9	57343	0,53	13,5	9,7	50 a 10 ppm	0,0%	-0,8%	-80%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	10 ppm	19	97	271	13,9	57343	0,35	13,5	9,7	20 a 15 ppm	0,0%	-0,1%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,2%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-33%
Tractor	Tier 2	50 ppm	9	90	104	8,0	13740	0,42	7,7	6,4	50 a 20 ppm	0,0%	-0,3%	-60%
Tractor	Tier 2	20 ppm	9	90	104	7,9	13740	0,17	7,7	6,4	50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%

Tabla 13.

Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel.

Tipología de MMNC	Nivel tecnológico	Contenido de azufre	Toneladas generadas 1000 unidades de MMNC								Variación Porcentual			
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Reducción de azufre (ppm)	HC, CO, NOx y CO ₂	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	SO ₂
Tractor	Tier 2	15 ppm	9	90	104	7,9	13740	0,13	7,7	6,4	50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Tractor	Tier 2	10 ppm	9	90	104	7,9	13740	0,08	7,7	6,4	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%
Zanjadora	Tier 2	50 ppm	9	84	94	7,9	12469	0,38	7,7	6,3	50 a 20 ppm	0,0%	-0,2%	-60%
Zanjadora	Tier 2	20 ppm	9	84	94	7,9	12469	0,15	7,7	6,3	50 a 15 ppm	0,0%	-0,3%	-70%
Zanjadora	Tier 2	15 ppm	9	84	94	7,9	12469	0,11	7,7	6,3	50 a 10 ppm	0,0%	-0,3%	-80%
Zanjadora	Tier 2	10 ppm	9	84	94	7,9	12469	0,08	7,7	6,3	20 a 15 ppm	0,0%	0,0%	-25%
											20 a 10 ppm	0,0%	-0,1%	-50%
											15 a 10 ppm	0,0%	0,0%	-33%

Nota: Toneladas de emisiones y sus variaciones porcentuales de contaminantes HC, CO, NOx, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO₂, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC, asociado a la disminución en el nivel de azufre en el combustible diésel. Realizado por el autor.

Anexo D. Variación porcentual de emisiones de contaminantes atmosféricos – climáticos asociados a la variación en los niveles tecnológicos de (Tier 2 a Tier 3 y Tier 4IA) y (Tier 3 a Tier4IA) del motor en diferentes tipologías de maquinaria móvil no de carretera (MMNC).

Tabla 14.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC							Variación porcentual de Tier 2 a Tier 3						Variación porcentual de Tier 2 a Tier 4IA							
			HC	CO	NOx	PM 10	CO2	SO2	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2
Camión fuera de carretera	Tier 2	50	353	2453	7492	358	1020267	31,3	347	250	50 a 50 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-1%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-1%
Camión fuera de carretera	Tier 2	20	353	2453	7492	356	1020267	12,5	346	249	20 a 20 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-1%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-1%
Camión fuera de carretera	Tier 2	15	353	2453	7492	356	1020267	9,4	345	249	15 a 15 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-1%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-1%
Camión fuera de carretera	Tier 2	10	353	2453	7492	356	1020267	6,3	345	249	10 a 10 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-1%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-1%
Camión fuera de carretera	Tier 3	50	350	2565	8194	448	1010162	31,0	434	313	50 a 20 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-60%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-60%
Camión fuera de carretera	Tier 3	20	350	2565	8194	446	1010162	12,4	433	312	50 a 15 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-70%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-70%
Camión fuera de carretera	Tier 3	15	350	2565	8194	446	1010162	9,3	433	312	50 a 10 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-80%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-80%
Camión fuera de carretera	Tier 3	10	350	2565	8194	446	1010162	6,2	432	312	20 a 15 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-26%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-26%
Camión fuera de carretera	Tier 4IA	50	196	810	4243	101	1010654	31,0	98	71	20 a 10 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-50%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-50%
Camión fuera de carretera	Tier 4IA	20	196	810	4243	100	1010654	12,4	97	70	15 a 10 ppm	-1%	5%	9%	25%	-1%	-34%	-44%	-67%	-43%	-72%	-1%	-34%

Tabla 14.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 2 a Tier 3						Variación porcentual de Tier 2 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Minicargador	Tier 2	50	5	73	59	6	7875	0,2	6	5	50 a 50 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-15%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-15%
Minicargador	Tier 2	20	5	73	59	6	7875	0,1	6	5	20 a 20 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-15%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-15%
Minicargador	Tier 2	15	5	73	59	6	7875	0,1	6	5	15 a 15 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-15%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-15%
Minicargador	Tier 2	10	5	73	59	6	7875	0,0	6	5	10 a 10 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-15%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-15%
Minicargador	Tier 3	50	5	75	65	7	6672	0,2	7	6	50 a 20 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-66%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-66%
Minicargador	Tier 3	20	5	75	65	7	6672	0,1	7	6	50 a 15 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-75%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-75%
Minicargador	Tier 3	15	5	75	65	7	6672	0,1	7	6	50 a 10 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-83%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-83%
Minicargador	Tier 3	10	5	75	65	7	6672	0,0	7	6	20 a 15 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-36%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-36%
Minicargador	Tier 4IA	50	2	12	34	2	6680	0,2	2	2	20 a 10 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-58%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-58%
Minicargador	Tier 4IA	20	2	12	34	2	6680	0,1	2	2	15 a 10 ppm	0%	3%	10%	25%	-15%	-44%	-55%	-83%	-41%	-67%	-15%	-43%
Minicargador	Tier 4IA	15	2	12	34	2	6680	0,1	2	2													
Minicargador	Tier 4IA	10	2	12	34	2	6680	0,0	2	2													
Miniexcavadora	Tier 2	50	3	20	25	4	3261	0,1	4	3	50 a 50 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-15%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-15%
Miniexcavadora	Tier 2	20	3	20	25	4	3261	0,0	4	3	20 a 20 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-15%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-15%
Miniexcavadora	Tier 2	15	3	20	25	4	3261	0,0	4	3	15 a 15 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-15%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-15%
Miniexcavadora	Tier 2	10	3	20	25	4	3261	0,0	4	3	10 a 10 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-15%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-15%
Miniexcavadora	Tier 3	50	3	21	27	5	2762	0,1	5	4	50 a 20 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-66%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-66%
Miniexcavadora	Tier 3	20	3	21	27	5	2762	0,0	5	4	50 a 15 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-75%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-75%
Miniexcavadora	Tier 3	15	3	21	27	5	2762	0,0	5	4	50 a 10 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-83%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-83%
Miniexcavadora	Tier 3	10	3	21	27	5	2762	0,0	5	4	20 a 15 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-36%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-36%
Miniexcavadora	Tier 4IA	50	2	7	18	1	2766	0,1	1	1	20 a 10 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-58%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-58%

Tabla 14.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM10, CO2, SO2, PM2.5, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 2 a Tier 3						Variación porcentual de Tier 2 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM 10	CO2	SO2	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2
Miniexcavadora	Tier 4IA	20	2	7	18	1	2766	0,0	1	1	15 a 10 ppm	-1%	5%	10%	23%	-15%	-44%	-36%	-64%	-25%	-76%	-15%	-43%
Miniexcavadora	Tier 4IA	15	2	7	18	1	2766	0,0	1	1													
Miniexcavadora	Tier 4IA	10	2	7	18	1	2766	0,0	1	1													
Retroexcavadora	Tier 2	50	9	84	96	7	12733	0,4	7	6	50 a 50 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-58%	-1%	-1%
Retroexcavadora	Tier 2	20	9	84	96	7	12733	0,2	7	6	20 a 20 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Retroexcavadora	Tier 2	15	9	84	96	7	12733	0,1	7	6	15 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Retroexcavadora	Tier 2	10	9	84	96	7	12733	0,1	7	6	10 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Retroexcavadora	Tier 3	50	4	86	67	7	12620	0,4	7	6	50 a 20 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-60%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-60%
Retroexcavadora	Tier 3	20	4	86	67	7	12620	0,2	7	6	50 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-70%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-70%
Retroexcavadora	Tier 3	15	4	86	67	7	12620	0,1	7	6	50 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-80%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-80%
Retroexcavadora	Tier 3	10	4	86	67	7	12620	0,1	7	6	20 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-26%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-26%
Retroexcavadora	Tier 4IA	50	2	9	54	3	12628	0,4	3	2	20 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-50%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-50%
Retroexcavadora	Tier 4IA	20	2	9	54	3	12628	0,2	3	2	15 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-34%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-34%
Retroexcavadora	Tier 4IA	15	2	9	54	3	12628	0,1	3	2													
Retroexcavadora	Tier 4IA	10	2	9	54	3	12628	0,1	3	2													
Tractor	Tier 2	50	9	90	104	8	13740	0,4	8	6	50 a 50 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-58%	-1%	-1%
Tractor	Tier 2	20	9	90	104	8	13740	0,2	8	6	20 a 20 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Tractor	Tier 2	15	9	90	104	8	13740	0,1	8	6	15 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Tractor	Tier 2	10	9	90	104	8	13740	0,1	8	6	10 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-1%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-1%
Tractor	Tier 3	50	5	93	73	8	13618	0,4	8	6	50 a 20 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-60%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-60%
Tractor	Tier 3	20	5	93	73	8	13618	0,2	8	6	50 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-70%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-70%

Tabla 14.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM10, CO2, SO2, PM2.5, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 2 a Tier 3						Variación porcentual de Tier 2 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM 10	CO2	SO2	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2
Tractor	Tier 3	15	5	93	73	8	13618	0,1	8	6	50 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	-1%	-1%	-80%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-80%
Tractor	Tier 3	10	5	93	73	8	13618	0,1	8	6	20 a 15 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-26%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-26%
Tractor	Tier 4IA	50	2	10	59	3	13627	0,4	3	3	20 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-50%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-50%
Tractor	Tier 4IA	20	2	10	59	3	13627	0,2	3	3	15 a 10 ppm	-50%	4%	-30%	0%	-1%	-34%	-78%	-89%	-44%	-59%	-1%	-34%
Tractor	Tier 4IA	15	2	10	59	3	13627	0,1	3	3													
Tractor	Tier 4IA	10	2	10	59	3	13627	0,1	3	3													
Zanjadora	Tier 2	50	9	84	94	8	12469	0,4	8	6	50 a 50 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Zanjadora	Tier 2	20	9	84	94	8	12469	0,2	8	6	20 a 20 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Zanjadora	Tier 2	15	9	84	94	8	12469	0,1	8	6	15 a 15 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Zanjadora	Tier 2	10	9	84	94	8	12469	0,1	8	6	10 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Zanjadora	Tier 3	50	8	87	103	10	12345	0,4	9	8	50 a 20 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-60%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-60%
Zanjadora	Tier 3	20	8	87	103	10	12345	0,2	9	8	50 a 15 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-70%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-70%
Zanjadora	Tier 3	15	8	87	103	10	12345	0,1	9	8	50 a 10 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-80%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-80%
Zanjadora	Tier 3	10	8	87	103	10	12345	0,1	9	8	20 a 15 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-26%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-26%
Zanjadora	Tier 4IA	50	4	24	64	4	12360	0,4	4	3	20 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-50%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-50%
Zanjadora	Tier 4IA	20	4	24	64	4	12360	0,2	4	3	15 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-34%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-34%
Zanjadora	Tier 4IA	15	4	24	64	4	12360	0,1	4	3													
Zanjadora	Tier 4IA	10	4	24	64	4	12360	0,1	4	3													
Grúa Horquilla	Tier 2	50	24	236	267	22	35186	1,1	22	18	50 a 50 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Grúa Horquilla	Tier 2	20	24	236	267	22	35186	0,4	22	18	20 a 20 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%

Tabla 14.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC									Variación porcentual de Tier 2 a Tier 3						Variación porcentual de Tier 2 a Tier 4IA					
			HC	CO	NOx	PM 10	CO2	SO2	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2	HC	CO	NOx	PM10, PM2.5 y BC	CO2	SO2
Grúa Horquilla	Tier 2	15	24	236	267	22	35186	0,3	22	18	15 a 15 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Grúa Horquilla	Tier 2	10	24	236	267	22	35186	0,2	22	18	10 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-1%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-1%
Grúa Horquilla	Tier 3	50	24	247	292	27	34837	1,1	27	22	50 a 20 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-60%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-60%
Grúa Horquilla	Tier 3	20	24	247	292	27	34837	0,4	27	22	50 a 15 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-70%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-70%
Grúa Horquilla	Tier 3	15	24	247	292	27	34837	0,3	27	22	50 a 10 ppm	-1%	5%	9%	22%	-1%	-80%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-80%
Grúa Horquilla	Tier 3	10	24	247	292	27	34837	0,2	27	22	20 a 15 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-26%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-26%
Grúa Horquilla	Tier 4IA	50	11	67	181	12	34879	1,1	12	10	20 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-50%	-55%	-72%	-32%	-46%	-1%	-50%
Grúa Horquilla	Tier 4IA	20	11	67	181	12	34879	0,4	12	10	15 a 10 ppm	-1%	5%	9%	23%	-1%	-34%	-55%	-72%	-32%	-45%	-1%	-34%
Grúa Horquilla	Tier 4IA	15	11	67	181	12	34879	0,3	12	10													
Grúa Horquilla	Tier 4IA	10	11	67	181	12	34879	0,2	12	10													

Nota: Los valores negativos se asocian a disminución y los positivos se asocian a Incremento. Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 2) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC. Realizado por el autor.

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Autohormigonera	Tier 3	50	8	59	101	16	20496	0,6	16	13	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-24%	-91%	0%	0%
Autohormigonera	Tier 3	20	8	59	101	16	20496	0,3	16	13	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Autohormigonera	Tier 3	15	8	59	101	16	20496	0,2	16	13	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Autohormigonera	Tier 3	10	8	59	101	16	20496	0,1	16	13	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Autohormigonera	Tier 4IA	50	1	9	77	1	20517	0,6	1	1	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-60%
Autohormigonera	Tier 4IA	20	1	9	77	1	20517	0,3	1	1	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-70%
Autohormigonera	Tier 4IA	15	1	9	77	1	20517	0,2	1	1	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-80%
Autohormigonera	Tier 4IA	10	1	9	77	1	20517	0,1	1	1	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-25%
Autohormigonera											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-50%
Autohormigonera											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-33%
Bulldozer	Tier 3	50	15	113	195	32	39344	1,2	31	25	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-24%	-91%	0%	0%
Bulldozer	Tier 3	20	15	113	195	32	39344	0,5	31	25	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Bulldozer	Tier 3	15	15	113	195	32	39344	0,4	31	25	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Bulldozer	Tier 3	10	15	113	195	32	39344	0,2	31	25	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Bulldozer	Tier 4IA	50	3	17	148	3	39383	1,2	3	2	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-60%
Bulldozer	Tier 4IA	20	3	17	148	3	39383	0,5	3	2	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-70%
Bulldozer	Tier 4IA	15	3	17	148	3	39383	0,4	3	2	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-80%
Bulldozer	Tier 4IA	10	3	17	148	3	39383	0,2	3	2	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-25%
Bulldozer											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-50%
Bulldozer											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-33%
Cargador Frontal	Tier 3	50	17	108	215	22	43385	1,3	22	16	50 a 50 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	0%
Cargador Frontal	Tier 3	20	17	108	215	22	43385	0,5	22	16	20 a 20 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	0%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM 10	CO ₂	SO ₂	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Cargador Frontal	Tier 3	15	17	108	215	22	43385	0,4	22	16	15 a 15 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	0%
Cargador Frontal	Tier 3	10	17	108	215	22	43385	0,3	22	16	10 a 10 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	0%
Cargador Frontal	Tier 4IA	50	10	155	204	12	43408	1,3	12	8	50 a 20 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	-60%
Cargador Frontal	Tier 4IA	20	10	155	204	12	43408	0,5	12	8	50 a 15 ppm	-42%	43%	-5%	-47%	0%	-70%
Cargador Frontal	Tier 4IA	15	10	155	204	12	43408	0,4	12	8	50 a 10 ppm	-42%	43%	-5%	-47%	0%	-80%
Cargador Frontal	Tier 4IA	10	10	155	204	12	43408	0,3	12	8	20 a 15 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	-25%
Cargador Frontal											20 a 10 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	-50%
Cargador Frontal											15 a 10 ppm	-42%	43%	-5%	-46%	0%	-33%
Dúmpер	Tier 3	50	14	65	98	12	17044	0,5	12	8	50 a 50 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	0%
Dúmpер	Tier 3	20	14	65	98	12	17044	0,2	11	8	20 a 20 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	0%
Dúmpер	Tier 3	15	14	65	98	12	17044	0,2	11	8	15 a 15 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	0%
Dúmpер	Tier 3	10	14	65	98	12	17044	0,1	11	8	10 a 10 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	0%
Dúmpер	Tier 4IA	50	4	56	80	4	17076	0,5	4	3	50 a 20 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-60%
Dúmpер	Tier 4IA	20	4	56	80	4	17076	0,2	4	3	50 a 15 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-70%
Dúmpер	Tier 4IA	15	4	56	80	4	17076	0,2	4	3	50 a 10 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-80%
Dúmpер	Tier 4IA	10	4	56	80	4	17076	0,1	4	3	20 a 15 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-25%
Dúmpер											20 a 10 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-50%
Dúmpер											15 a 10 ppm	-73%	-15%	-18%	-69%	0%	-33%
Excavadora	Tier 3	50	19	141	242	39	48843	1,5	38	31	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-24%	-91%	0%	0%
Excavadora	Tier 3	20	19	141	242	39	48843	0,6	38	31	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Excavadora	Tier 3	15	19	141	242	39	48843	0,4	38	31	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Excavadora	Tier 3	10	19	141	242	39	48843	0,3	38	31	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Excavadora	Tier 4IA	50	3	21	184	3	48892	1,5	3	3	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-60%
Excavadora	Tier 4IA	20	3	21	184	3	48892	0,6	3	3	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-70%
Excavadora	Tier 4IA	15	3	21	184	3	48892	0,4	3	3	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-80%
Excavadora	Tier 4IA	10	3	21	184	3	48892	0,3	3	3	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-25%
Excavadora											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-50%
Excavadora											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-33%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	50	34	278	491	51	99197	3,0	50	36	50 a 50 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	0%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	20	34	278	491	51	99197	1,2	50	36	20 a 20 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	0%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	15	34	278	491	51	99197	0,9	50	36	15 a 15 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	0%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 3	10	34	278	491	51	99197	0,6	50	36	10 a 10 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	0%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 4IA	50	22	354	466	28	99237	3,0	27	19	50 a 20 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	-60%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 4IA	20	22	354	466	27	99237	1,2	27	19	50 a 15 ppm	-36%	27%	-5%	-47%	0%	-70%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 4IA	15	22	354	466	27	99237	0,9	27	19	50 a 10 ppm	-36%	27%	-5%	-47%	0%	-80%
Camión Grúa: Grúa telescópica	Tier 4IA	10	22	354	466	27	99237	0,6	27	19	20 a 15 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	-25%
Camión Grúa: Grúa telescópica											20 a 10 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	-50%
Camión Grúa: Grúa telescópica											15 a 10 ppm	-36%	27%	-5%	-46%	0%	-33%
Motoniveladora	Tier 3	50	17	129	222	36	44843	1,4	35	29	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-24%	-91%	0%	0%
Motoniveladora	Tier 3	20	17	129	222	36	44843	0,5	35	29	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Motoniveladora	Tier 3	15	17	129	222	36	44843	0,4	35	29	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Motoniveladora	Tier 3	10	17	129	222	36	44843	0,3	35	29	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Motoniveladora	Tier 4IA	50	3	19	169	3	44888	1,4	3	2	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-60%
Motoniveladora	Tier 4IA	20	3	19	169	3	44888	0,6	3	2	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-70%
Motoniveladora	Tier 4IA	15	3	19	169	3	44888	0,4	3	2	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-80%
Motoniveladora	Tier 4IA	10	3	19	169	3	44888	0,3	3	2	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-25%
Motoniveladora											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-50%
Motoniveladora											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-33%
Perforador	Tier 3	50	5	27	71	7	14964	0,5	6	5	50 a 50 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	0%
Perforador	Tier 3	20	5	27	71	7	14964	0,2	6	5	20 a 20 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	0%
Perforador	Tier 3	15	5	27	71	7	14964	0,1	6	5	15 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	0%
Perforador	Tier 3	10	5	27	71	7	14964	0,1	6	5	10 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	0%
Perforador	Tier 4IA	50	1	6	56	1	14978	0,5	1	1	50 a 20 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-60%
Perforador	Tier 4IA	20	1	6	56	1	14978	0,2	1	1	50 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-70%
Perforador	Tier 4IA	15	1	6	56	1	14978	0,1	1	1	50 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-80%
Perforador	Tier 4IA	10	1	6	56	1	14978	0,1	1	1	20 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-25%
Perforador											20 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-50%
Perforador											15 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-87%	0%	-33%
Piloteadora	Tier 3	50	6	30	80	12	16894	0,5	11	9	50 a 50 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	0%
Piloteadora	Tier 3	20	6	30	80	12	16894	0,2	11	9	20 a 20 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	0%
Piloteadora	Tier 3	15	6	30	80	12	16894	0,2	11	9	15 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	0%
Piloteadora	Tier 3	10	6	30	80	12	16894	0,1	11	9	10 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	0%
Piloteadora	Tier 4IA	50	1	7	63	1	16909	0,5	1	1	50 a 20 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-60%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Piloteadora	Tier 4IA	20	1	7	63	1	16909	0,2	1	1	50 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-70%
Piloteadora	Tier 4IA	15	1	7	63	1	16909	0,2	1	1	50 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-80%
Piloteadora	Tier 4IA	10	1	7	63	1	16909	0,1	1	1	20 a 15 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-25%
Piloteadora											20 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-50%
Piloteadora											15 a 10 ppm	-81%	-77%	-21%	-92%	0%	-33%
Volqueta	Tier 3	50	20	152	303	42	52590	1,6	41	34	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-35%	-91%	0%	0%
Volqueta	Tier 3	20	20	152	303	42	52590	0,6	41	34	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	0%
Volqueta	Tier 3	15	20	152	303	42	52590	0,5	41	34	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	0%
Volqueta	Tier 3	10	20	152	303	42	52590	0,3	41	34	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	0%
Volqueta	Tier 4IA	50	4	23	198	4	52643	1,6	4	3	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-60%
Volqueta	Tier 4IA	20	4	23	198	4	52643	0,6	3	3	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-70%
Volqueta	Tier 4IA	15	4	23	198	4	52643	0,5	3	3	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-80%
Volqueta	Tier 4IA	10	4	23	198	4	52643	0,3	3	3	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-25%
Volqueta											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-50%
Volqueta											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-35%	-92%	0%	-33%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	50	19	97	271	14	57343	1,8	14	10	50 a 50 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	0%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	20	19	97	271	14	57343	0,7	14	10	20 a 20 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	0%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	15	19	97	271	14	57343	0,5	13	10	15 a 15 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	0%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 3	10	19	97	271	14	57343	0,4	13	10	10 a 10 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	0%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 4IA	50	12	189	268	13	57363	1,8	12	9	50 a 20 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	-60%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 4IA	20	12	189	268	13	57363	0,7	12	9	50 a 15 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	-70%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM ₁₀	CO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Perforador: Taladro petrolero	Tier 4IA	15	12	189	268	13	57363	0,5	12	9	50 a 10 ppm	-33%	95%	-1%	-10%	0%	-80%
Perforador: Taladro petrolero	Tier 4IA	10	12	189	268	13	57363	0,4	12	9	20 a 15 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	-25%
Perforador: Taladro petrolero											20 a 10 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	-50%
Perforador: Taladro petrolero											15 a 10 ppm	-33%	95%	-1%	-9%	0%	-33%
Minicargador: Grúa	Tier 3	50	20	57	141	18	24534	0,8	18	13	50 a 50 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	0%
Minicargador: Grúa	Tier 3	20	20	57	141	18	24534	0,3	18	13	20 a 20 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	0%
Minicargador: Grúa	Tier 3	15	20	57	141	18	24534	0,2	18	13	15 a 15 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	0%
Minicargador: Grúa	Tier 3	10	20	57	141	18	24534	0,2	18	13	10 a 10 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	0%
Minicargador: Grúa	Tier 4IA	50	5	82	115	6	24582	0,8	6	4	50 a 20 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-60%
Minicargador: Grúa	Tier 4IA	20	5	82	115	6	24582	0,3	6	4	50 a 15 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-70%
Minicargador: Grúa	Tier 4IA	15	5	82	115	6	24582	0,2	6	4	50 a 10 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-80%
Minicargador: Grúa	Tier 4IA	10	5	82	115	6	24582	0,2	6	4	20 a 15 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-25%
Minicargador: Grúa											20 a 10 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-50%
Minicargador: Grúa											15 a 10 ppm	-73%	43%	-18%	-69%	0%	-33%
Tractor: agrícola	Tier 3	50	21	162	277	45	56048	1,7	44	36	50 a 50 ppm	-82%	-85%	-24%	-91%	0%	0%
Tractor: agrícola	Tier 3	20	21	162	277	45	56048	0,7	44	36	20 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Tractor: agrícola	Tier 3	15	21	162	277	45	56048	0,5	44	36	15 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Tractor: agrícola	Tier 3	10	21	162	277	45	56048	0,3	44	36	10 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	0%
Tractor: agrícola	Tier 4IA	50	4	24	211	4	56104	1,7	4	3	50 a 20 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-60%
Tractor: agrícola	Tier 4IA	20	4	24	211	4	56104	0,7	4	3	50 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-70%
Tractor: agrícola	Tier 4IA	15	4	24	211	4	56104	0,5	4	3	50 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-80%

Tabla 15.

Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC.

Tipología de MMNC	Nivel Tecnológico	Contenido de azufre (ppm)	Toneladas generadas 1000 und de MMNC								Variación porcentual de Tier 3 a Tier 4IA						
			HC	CO	NOx	PM 10	CO ₂	SO ₂	PM 2.5	BC	Variación en el nivel de azufre	HC	CO	NOx	PM ₁₀ , PM _{2.5} y BC	CO ₂	SO ₂
Tractor: agrícola	Tier 4IA	10	4	24	211	4	56104	0,3	4	3	20 a 15 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-25%
Tractor: agrícola											20 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-50%
Tractor: agrícola											15 a 10 ppm	-82%	-85%	-24%	-92%	0%	-33%

Nota: Los valores negativos se asocian a disminución y los positivos se asocian a Incremento. Emisiones de contaminantes generadas y su variación porcentual según estándar de emisión dado por retraso tecnológico (Tier 3) y su aumento en la variación del estándar de emisión (Hasta Tier 4IA) para HC, CO, NOx, PM₁₀, CO₂, SO₂, PM_{2.5}, y BC de acuerdo con tipologías de MMNC. Realizado por el autor.