

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



ESTUDIO COMPARATIVO DE IMPACTO
AMBIENTAL PARA LA APLICACIÓN DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN MINERÍA,
USANDO EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Presentado por

VÍCTOR RODRIGO BALBOA ESPINOZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

ING. DOUGLAS AITKEN

Profesor Co-guía

ING. CARLOS HUNT

Profesora Patrocinadora

ING. ADELINE DELONCA

Miembro de la Comisión

ING. SERGIO PALMA

SANTIAGO, NOVIEMBRE 2021

Agradecimientos

A mi madre Juana Espinoza, por el apoyo y su amor incondicional.

A mi familia, por el apoyo que me dieron día a día y ayudarme a ser quien hoy soy.

A Gonzalo Ramírez, por haberme mostrado un nuevo enfoque en mi carrera, por el cuál hoy me siento totalmente apasionado.

A todos los profesores, colegas, compañeros y amigos que me brindaron su apoyo cuando lo necesité. En especial a Adeline Delonca, Douglas Aitken y Carlos Hunt, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, y brindarme su conocimiento y ayuda en su desarrollo.

Resumen

La minería, actualmente, se enfrenta a un mercado energético y marco regulatorio normativo evolutivo que presiona a la industria a mejorar frecuentemente su estrategia y toma de decisiones en pro de una minería sustentable. Una solución a la par con el desarrollo tecnológico es la aplicación de maquinaria eléctrica, la que, aún en la actualidad, genera cierta incertidumbre en torno a su impacto real en el medioambiente. Debido a esto, el estudio tiene como objetivo principal evaluar los impactos ambientales asociados al uso de vehículos eléctricos en comparación a los impactos ambientales provenientes de los vehículos convencionales diésel en la minería de Chile, utilizando el análisis de ciclo de vida como una herramienta metodológica y cuantitativa. El estudio analiza los impactos ambientales en torno a tres alcances principales: la manufactura de los equipos, la matriz energética (producción eléctrica y de combustible), y, la operación de ambos equipos.

Los resultados mostraron que la aplicación de camiones bajo perfil eléctrico a batería tiene un mayor impacto ambiental en 14 de las 18 categorías estudiadas. Dentro de estas, se destaca el potencial de cambio climático el cual tiene como principal precursor las emisiones de dióxido de carbono. Por otro lado, de acuerdo con lo obtenido dentro de los tres alcances estudiados, el vehículo eléctrico presenta mayores impactos tanto en la manufactura (en las 18 categorías estudiadas) como en el análisis derivado de la matriz energética. Aun así, al considerar el alcance de la operación, el vehículo diésel presenta en promedio un 30.52% más de impacto ambiental que la operación del vehículo eléctrico.

Considerando lo anterior, y desde una mirada integral de todo el ciclo de vida de los vehículos, el vehículo eléctrico presenta mayores impactos en una mayor cantidad de categorías en comparación al vehículo diésel, siendo el punto crítico (en donde se obtuvieron los mayores impactos ambientales) la producción de electricidad y combustible diésel. No obstante, desde una perspectiva del alcance operacional, el vehículo eléctrico tiene una ventaja comparativa frente a las emisiones directas generadas en los vehículos diésel, teniendo este último, mayores impactos en su operación en comparación a la operación del vehículo eléctrico.

Abstract

Mining is currently facing an evolving energy market and regulatory framework that puts pressure on the industry to frequently improve its strategy and decision making in favor of sustainable mining. A solution on par with technological development is the application of electric machinery, which, even today, generates some uncertainty about its real impact on the environment. Due to this, the main objective of the study is to evaluate the environmental impacts associated with the use of electric vehicles in comparison to the environmental impacts of conventional diesel vehicles in mining in Chile, using life cycle assessment as a methodological and quantitative tool. The study analyzes the environmental impacts around three main scopes: the manufacture of the equipment, the energy matrix (electric and fuel production), and the operation of both equipment.

The results showed that the application of battery-electric low-profile trucks has a greater environmental impact in 14 of the 18 categories studied. Among these, the potential for climate change stands out, whose main precursor is carbon dioxide emissions. On the other hand, according to what was obtained within the three scopes studied, the electric vehicle presents greater impacts both in manufacturing (in the 18 categories studied) and in the analysis derived from the energy matrix. Even so, when considering the scope of operation, the diesel vehicle presents an average of 30.52% more environmental impact than the operation of the electric vehicle.

Considering the above, and from an integral view of the entire life cycle of the vehicles, the electric vehicle presents greater impacts in a greater number of categories compared to the diesel vehicle, with the critical point (where the greatest environmental impacts were obtained) being the production of electricity and diesel fuel. However, from an operational scope perspective, the electric vehicle has a comparative advantage over the direct emissions generated by diesel vehicles, with the latter having greater impacts in its operation compared to the operation of the electric vehicle.

Glosario

ACV: Análisis de ciclo de vida. Herramienta usada para evaluar los impactos y emisiones del ciclo de vida de un producto o proceso.

Unidad funcional: Marco de referencia del análisis de ciclo de vida. Limita el análisis a un periodo, cantidad, producción u otra característica del sistema a evaluar.

AICV: Análisis de inventario de ciclo de vida. Da cuenta de los cálculos, recopilación y posibles estimaciones de datos que contemplen las entradas y salidas del sistema a evaluar.

EPA: Agencia de protección ambiental (Environmental protection Agency).

ISO: Organización internacional de normalización (International Standardization Organization).

IPCC: Panel intergubernamental sobre el cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change).

WTT: Del pozo a la rueda (Well-To-Wheel).

TTW: Del tanque a la rueda (Tank-To-Wheel).

WTW: Del pozo a la rueda (Well-To-Wheel).

Rim Pull: Fuerza de tracción que se desarrolla en el punto de contacto de la rueda con el camino.

Ralentí: Estado mínimo de revolución de un motor para mantenerse en funcionamiento.

Ciclo: En término minero, se define como el viaje que realiza un equipo, usualmente referido a la carga, maniobra, viaje cargado, descarga y viaje descargado.

Block Caving: método de extracción subterráneo por hundimiento, en donde se genera una propagación y generación de fracturas para un posterior desplazamiento gravitacional hasta los puntos de extracción.

Esponjamiento: Medida del aumento del volumen relativo de un material en condición fracturado.

Producción: Medida minera de extracción mineral cuantificada en masa por unidad de tiempo.

Camión Bajo perfil: Equipo de acarreo de material, usualmente referido a un camión adaptado en sus dimensiones y estructura para operar en condiciones subterráneas.

Índice:

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract.....	4
Glosario	5
1. Introducción.....	16
1.1. Objetivos.....	17
1.1.1. Objetivo General.....	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. Alcances.....	18
1.2.1. Entorno y equipos considerados.....	18
1.2.2. Método de caracterización y categorías de impacto ambiental	18
1.2.3. Alcance Análisis de manufactura de vehículos	18
1.2.4. Alcance Análisis de matriz energética.....	19
1.2.5. Alcance de emisiones e impacto ambiental.....	19
1.2.6. Unidad Funcional	19
2. Antecedentes.....	20
2.1. Análisis de Ciclo de Vida	20
2.2. Análisis de Ciclo de Vida en la Minería	23
2.3. Análisis de Ciclo de Vida en Vehículos	25
2.4. Metodologías de caracterización de impacto ambiental	29
2.5. Emisiones en torno al ciclo de vida	31
2.6. Baterías en la industria automotriz	40
3. Marco Teórico	43
3.1. Estimación de emisiones de los vehículos en operación	43

3.2.	Caracterización de potencial de impacto ambiental.....	44
3.3.	Estimación del consumo de combustible / electricidad	45
4.	Metodología de trabajo.....	47
4.1.	Elaboración y planteamiento de Caso Base	48
4.2.	Elaboración de inventario de ciclo de vida	49
4.2.1.	Inventario de matriz energética	49
4.2.2.	Inventario de manufactura	50
4.2.3.	Inventario de operación minera	50
4.2.4.	Modelización de ciclo de vida	50
4.3.	Cálculo de indicadores medios de impacto ambiental.....	51
4.4.	Análisis de sensibilidad	51
5.	Desarrollo del estudio.....	52
5.1.	Planteamiento de caso base – Escenario “Tipo”.....	52
5.2.	Elaboración de Inventarios de Ciclo de Vida de los vehículos en Minería	55
5.2.1.	Inventario por matriz energética.....	55
5.2.2.	Inventario emisiones por manufactura de los equipos.....	59
5.2.3.	Inventario de emisiones por operación minera.....	68
6.	Resultados del análisis de impacto ambiental	72
6.1.	Resultados y análisis de Impacto ambiental por matriz energética	72
6.2.	Resultados y análisis de Impacto ambiental por Manufactura	79
6.3.	Resultados y análisis de Impacto ambiental por Operación	85
6.4.	Resultados y análisis procesos agregados.....	88
6.5.	Análisis de sensibilidad energética	92
7.	Conclusiones.....	97
8.	Recomendaciones	99

8.1.	Respecto a los resultados	99
8.2.	Respecto a la información.....	99
8.3.	Respecto a próximos estudios.....	100
9.	Referencias	101
10.	Anexos.....	116
10.1.	Anexo A: Metodología ReCiPe Midpoint (H).....	116
10.2.	Anexo B: Antecedentes.....	118
10.3.	Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”	125
10.4.	Anexo D: Inventario Matriz Energética.....	126
10.5.	Anexo E: Inventario Manufactura equipo Diesel.....	127
10.6.	Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico	132
10.7.	Anexo G: Inventario de Operación	148
10.8.	Anexo H: Análisis de sensibilidad	150

Índice de Figuras

Figura 1. Normativas en torno el análisis de Ciclo de Vida publicadas a lo largo de los años, y sus respectivas correcciones (Ver detalle en Tabla 29, Anexos 10.2).....	21
Figura 2. Etapas del análisis de ciclo de vida. Adaptación de ISO14040, 2016.	21
Figura 3. Límites del sistema (ciclo de vida) de minería para la evaluación de impacto ambiental. Adaptado de Durucan et al., 2006.	24
Figura 4. Límites del sistema para evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida de vehículos. Adaptado de Van Mierlo et al., 2017.	28
Figura 5. Elementos del análisis de impacto de ciclo de vida. Elementos opcionales son sólo abarcados por ALGUNOS métodos de caracterización. Adaptado de ISO14040, 2006.	29
Figura 6. Algunos métodos de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida publicados desde el año2000 con país/región de origen. Adaptado de Hauschild et al., 2018.....	30
Figura 7. Representación esquemática del material particulado de diésel. Extraído de Mohankumar & Senthilkumar, 2017.....	38
Figura 8. Etapas de producción de un pack de batería con sus respectivas partes. Extraído de Liu, (2020).....	40
Figura 9. Modelo físico de interacción de un vehículo en operación.....	45
Figura 10. Esquema de la configuración del modelo y sus variables asociadas. Adaptado de Dönicke, (2017b).....	45
Figura 11. Flowchart de metodología de trabajo a realizar.	48
Figura 12. Proceso de generación eléctrica para Chile - 2020 modelado en software OpenLCA.	57
Figura 13. Proceso de producción de combustible diésel bajo en sulfuro modelado en software OpenLCA.....	59
Figura 14. Diagrama general para inventario de emisiones por Manufactura de los vehículos. Adaptado de Wolff et al., 2020.....	60
Figura 15. Diagrama de tren de poder convencional diésel estudiado.	61
Figura 16. Proceso de manufactura del equipo diésel modelado en software OpenLCA. ..	64
Figura 17. Diagrama de tren de poder convencional eléctrico.....	65

Figura 18. Configuración de motores eléctricos considerado para el presente estudio. Extraído de Hickey & Dickson, (2021).....	65
Figura 19. Proceso de manufactura del equipo eléctrico modelado en software OpenLCA.	68
Figura 20. Lógica simplificada ocupada dentro del algoritmo en Matlab.....	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Emisiones de CO ₂ eq. para distintos alcances de empresas manufactureras de equipos mineros.....	37
Tabla 2. Algunos estándares de exposición al material particulado de diésel. Adaptado de Ngele, 2017.....	39
Tabla 3. Rendimiento técnico de distintas baterías de ion de litio. Adaptado de He, (2016).	41
Tabla 4. Producciones para División El Teniente identificadas.....	52
Tabla 5. Características del material y el camino usados como caso base en el estudio.....	52
Tabla 6. Distribución de tiempos y disponibilidades mecánicas estimadas para la operación mina. Adaptado de Acevedo Céspedes, (2017).....	53
Tabla 7. Modelos de equipos eléctricos ofrecidos por los principales proveedores del mercado.	54
Tabla 8. Modelos de camiones de bajo perfil con capacidad equivalente en el par Diésel-Eléctrico.....	54
Tabla 9. Aporte a la generación eléctrica anual por tecnología para el periodo 2020. Extraído de Comisión Nacional de Energía, (2020).	56
Tabla 10. Comparación diésel requerido versus diésel ofrecido por el mercado y su composición.....	58
Tabla 11. Masa de cada componentes estimados para el camión convencional Diesel en base al camión Sandvik TH550.....	62
Tabla 12. Composición material obtenida para el equipo convencional diésel.....	63
Tabla 13. Masa de cada componentes estimados para el camión eléctrico en base al camión Artisan Z50.....	66
Tabla 14. Composición porcentual por material para el equipo eléctrico.	67
Tabla 15. Resultados de simulaciones para la operación del vehículo diésel.	70
Tabla 16. Resultados de simulaciones para la operación del vehículo eléctrico.	70
Tabla 17. Factores de emisión estimados. Adaptado de IPCC, (2006).	71
Tabla 18. Material particulado límite por clasificación Tier para motores igual o superior a 600 [hp] y menores a 750 [hp] según la EPA. Adaptado de Dallmann & Menon, (2016)...	71

Tabla 19. Principales emisiones y sus cantidades durante la combustión del diésel.....	71
Tabla 20. Resultados del análisis de impacto ambiental para la producción de combustible diésel y la generación eléctrica (2020).	72
Tabla 21. Impactos totales durante la operación de los vehículos a lo largo de su vida útil.	76
Tabla 22. Resultados del análisis de impacto ambiental para la manufactura de los vehículos diésel y eléctrico.	79
Tabla 23. Resultados del análisis de impacto ambiental por concepto de operación de los vehículos diésel y eléctrico.....	85
Tabla 24. Resultados del análisis de impacto ambiental para el ciclo de vida de los vehículos diésel y eléctrico.	88
Tabla 25. Resultados por alcance para las tres mayores categorías de impacto para ambos vehículos.....	90
Tabla 26. Emisiones de CO ₂ por alcance para cada vehículo y su respectivo porcentaje relativo al máximo asociado.	91
Tabla 27. Porcentajes de contribución en la generación eléctrica para cada escenario por tecnología (E#: Escenario Sustentable número #).....	92
Tabla 28. Categorías de impacto y su descripción. Método ReCiPe Midpoint (H) v1.13. Adaptado de Ferat Toscano et al., (2019).....	116
Tabla 29. Normativas estandarizadas para la aplicación de Análisis de Ciclo de Vida. ...	118
Tabla 30. Estudios de análisis de Ciclo de Vida realizados en la industria minera.....	119
Tabla 31. Estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a distintos vehículos y fuentes de impulsión.	122
Tabla 32. Modelos de camiones de bajo perfil ofrecidos por los principales proveedores del mercado. Elaboración propia.....	125
Tabla 33. Inventario de producción de combustible [1 kg] y generación eléctrica [1 kWh].	126
Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.	127
Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.	132
Tabla 36. Parámetros técnico-operacionales de los vehículos ocupados.	148

Tabla 37. Frecuencia y duración de mantenimientos programados. Extraído de ARENAS, (2016).	149
Tabla 38. Inventario de generación eléctrica [1 kWh] proyecciones 2030 y 2050.	150
Tabla 39. Inventario de generación eléctrica, escenarios sustentables. Elaboración propia.	151

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Categorías de impacto ambiental abarcadas por distintos estudios de análisis de ciclo de vida en minería.....	25
Gráfico 2. Categorías de impacto ambiental abarcadas por distintos estudios de análisis de ciclo de vida en vehículos.....	27
Gráfico 3. Número de categorías abarcadas por metodología de caracterización de impactos.	31
Gráfico 4. Emisiones de GEI por sector industrial en Chile, expresado en kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente.	33
Gráfico 5. Distribución porcentual promedio de la generación energética bruta anual para el periodo 2015-2020, por tecnología, para el SING de Chile.	34
Gráfico 6. Distribución porcentual promedio de la generación energética bruta anual para el periodo 2015-2020, por tecnología, para el SIC de Chile.	34
Gráfico 7. Emisiones de GEI por año por combustible en Chile.	35
Gráfico 8. Distribución porcentual promedio anual de emisiones de CO ₂ eq. por combustible en Chile, periodo 2008-2018.	35
Gráfico 9. Emisiones de CO ₂ por proceso de manufactura y ensamble de vehículo genérico de 1532 [kg]. Adaptado de Sullivan et al., 2010.	36
Gráfico 10. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría para ambas fuentes de impulsión.	73
Gráfico 11. Emisiones con mayor aporte al potencial de cambio climático para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].	74
Gráfico 12. Emisiones con mayor aporte al potencial de agotamiento de los combustibles fósiles para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].	75
Gráfico 13. Emisiones con mayor aporte al potencial de toxicidad humana para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].	76
Gráfico 14. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría de impacto en operación para ambas fuentes de impulsión.....	77
Gráfico 15. Principales contribuciones por tecnología de generación a la categoría de cambio climático.	78

Gráfico 16. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno a la manufactura de cada vehículo.	80
Gráfico 17. Categorías de impacto ambiental con mayores resultados para la manufactura de ambos equipos.	81
Gráfico 18. Emisiones con mayor aporte al potencial de toxicidad humana para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.	82
Gráfico 19. Emisiones con mayor aporte al potencial de cambio climático para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.	82
Gráfico 20. Mayores 5 contribuciones por componente de los vehículos eléctrico (izquierda) y diésel (derecha) para la categoría de cambio climático.	83
Gráfico 21. Emisiones con mayor aporte al potencial de agotamiento de los metales para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.	84
Gráfico 22. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno a la operación de cada vehículo.	86
Gráfico 23. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno al ciclo de vida de cada vehículo.	89
Gráfico 24. Contribuciones por alcance para las categorías de cambio climático del vehículo eléctrico (izquierda) y del vehículo diésel (derecha).	91
Gráfico 25. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría de impacto por escenario evaluado en torno al ciclo de vida del vehículo eléctrico.	94
Gráfico 26. Cantidad y porcentaje relativo al máximo de emisiones de dióxido de carbono con aporte al aumento del potencial de cambio climático por escenario (sólo matriz energética).	95
Gráfico 27. Porcentajes relativos al máximo resultado para la categoría de potencial de cambio climático por escenario evaluado.	96

1. Introducción

Durante la última década, el impacto ambiental ha tomado una importancia relevante dentro de la minería y el mundo, principalmente, debido a los distintos eventos climáticos que se han observado (cambio climático, calentamiento global, escases de recursos, entre otros). Producto de esto, existe una necesidad de desarrollo de metodologías para cuantificar, evaluar y comparar el potencial de distintas medidas y decisiones que buscan mejorar la eficiencia ambiental de distintos procesos y actividades, tanto en la industria minera como en otras industrias productivas. Una herramienta metodológica que se ha desarrollado con este objetivo es el análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida aborda los aspectos ambientales y el potencial de impacto ambiental a lo largo de la vida de un producto (*ISO14040*, 2006) buscando servir como una herramienta de asistencia a las decisiones de la industria. En este sentido, una industria altamente criticada en torno a su impacto ambiental es la minería; principalmente por los desechos y emisiones que esta produce a lo largo de su operación. Existen autores que sostienen que la operación de los vehículos en la minería aporta significativamente a las emisiones de partículas (Asif et al., 2019) y en gran medida al calentamiento global producto de la quema de combustibles (Pell, Tijsseling, et al., 2019), por lo que evaluar alternativas de transporte a modo de poder disminuir las emisiones causadas por el uso de vehículos representa un gran desafío.

Una alternativa que asegura eliminar las emisiones causadas por los vehículos convencionales diésel, ha sido la implementación de vehículos eléctricos, los cuales tienen una nula emisión durante la operación (Petrauskienė et al., 2020). Por otro lado, si consideramos la matriz energética eléctrica que alimenta a estos vehículos, podemos encontrar factores de emisión asociados a la generación energética, que en estudios comparativos ha demostrado ser la causa principal de los altos niveles de contaminación asociados a las tecnologías eléctricas (Awuah-Offei et al., 2008).

La presente memoria realiza un estudio de los distintos impactos ambientales asociados a la aplicación de vehículos eléctricos en la minería subterránea de Chile frente al uso de vehículos convencionales diésel, usando la metodología de análisis de Ciclo de Vida

estandarizada por el International Standardization Organization (ISO). Con lo anterior se busca tener evidencia cuantitativa de la diferencia en materia de impacto ambiental del uso de equipos eléctricos en operación minera, y con esto, dar un aporte y sustento en la toma de decisiones hacia una mirada sustentable.

Este análisis tiene tres alcances principales dentro del ciclo de vida de los vehículos: la manufactura, siendo esta la que contempla el análisis de las materias primas del vehículo; la matriz energética, que busca analizar la producción y generación de los combustibles asociados a los vehículos, ya sea electricidad y diésel; y, la operación, que analizará los impactos asociados a la utilización de los vehículos y los consumibles (neumáticos y aceite de motor, este último para el caso diésel) dentro de su ciclo operativo en mina subterránea.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo principal es evaluar los impactos ambientales asociados al uso de vehículos eléctricos frente al uso de vehículos convencionales diésel en la minería subterránea de Chile. Los impactos ambientales, quedarán clasificados en 18 categorías establecidas en la metodología de caracterización ReCiPe Midpoint (H) (Ver Anexo A: Metodología ReCiPe Midpoint (H)), cuyos indicadores quedarán definidos en función del análisis de inventario a realizar.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Elaborar inventario conceptual de manufactura y operación para los vehículos mineros estudiados;
- Desarrollar un modelo de análisis de ciclo de vida para la operación de vehículos en minería subterránea, su ciclo de vida y el suministro de combustible;
- Modelizar el escenario planteado usando vehículos convencionales diésel y vehículos eléctricos;
- Comparar los escenarios evaluados para ambos tipos de vehículos y generar recomendaciones a partir de esto.

1.2. Alcances

La metodología de análisis de ciclo de vida se encuentra estandarizada por la norma ISO14040/44, donde se indica y menciona los puntos que debe incluir una definición acabada de los alcances del estudio. En este sentido, la presente memoria se alinearán con estos requerimientos.

1.2.1. Entorno y equipos considerados

El presente estudio se limitará a un entorno minero subterráneo, esto principalmente por el ambiente con escasa opción de ventilación que se presenta en la faena. Por esta misma razón, el estudio considera la comparación, en materia de impacto ambiental, de dos tipos de camiones bajo perfil (diésel y eléctrico impulsado por baterías) encargados del manejo de materiales a nivel de transporte intermedio. Así mismo, el estudio del ciclo de vida de los equipos se limitará a la vida útil de estos y no abarcará su disposición final (reciclaje de materiales, reutilización de equipos, entre otras opciones).

1.2.2. Método de caracterización y categorías de impacto ambiental

Para la medición del potencial de impacto ambiental, se utilizará el método de caracterización ReCiPe (Huijbregts et al., 2017) enfocada en sus indicadores intermedios (Midpoint (H)) por lo que el análisis de impacto ambiental quedará limitado a los factores de caracterización estipulados por este método (Ver Anexo A: Metodología ReCiPe Midpoint (H)). Además, se considerarán las estimaciones de emisiones por combustión, con énfasis en el material particulado de diésel como indicador intermedio de impacto por su relación en la ocurrencia de asma (McEntee & Ogneva-Himmelberger, 2008) y por su efecto cancerígeno (Chang et al., 2020). Por otro lado, el cálculo de impacto ambiental será abordado por medio del uso de la herramienta OpenLCA, un software de libre uso enfocado en la elaboración de análisis de ciclo de vida.

1.2.3. Alcance Análisis de manufactura de vehículos

Para elaborar este inventario, se considerarán publicaciones, análisis, y datos provenientes de la literatura, además de la información detectada desde los proveedores, por tanto, la

información se limitará a aquella que se encuentre accesible o que se encuentre en bases de datos de libre acceso. Además, es importante mencionar, que, en virtud de lo anterior, el inventario no contemplará la parte energética por concepto de ensamble de cada una de las partes del vehículo ni el transporte asociado a la obtención de cada una de las materias primas. De cualquier forma, el análisis de manufactura contemplará parte de la producción de las baterías (en el caso de los vehículos eléctricos) pero no su ciclo de vida completo, por lo que la disposición final de las baterías no será evaluada.

1.2.4. Alcance Análisis de matriz energética

Para el análisis de matriz energética se contemplarán las emisiones por concepto de generación eléctrica del año 2020. Estos datos contemplan el sistema actual de generación eléctrica nacional por tipo de tecnología de generación (por ejemplo, geotérmica, carbón, solar, entre otras) y su aporte a la matriz nacional. El inventario se limitará a la información publicada y accesible por distintas fuentes científicas, caso similar con el inventario del diésel.

1.2.5. Alcance de emisiones e impacto ambiental

Las emisiones se limitan a aquellas obtenidas por distintas fuentes bibliográficas y por medio de bases de datos de inventarios de ciclo de vida de libre acceso. La toma de datos in situ no será abarcada en este estudio. Además, el estudio se concentrará en las emisiones gaseosas, el material particulado de diésel y aquellas que puedan obtenerse a modo de estimación desde la combustión en el motor (diésel o electricidad), por lo cual se excluyen emisiones de material particulado por actividad minera u otro contaminante de este espectro que puedan ser emitidos por fuentes externas.

1.2.6. Unidad Funcional

La unidad funcional, entendiéndose esta como la medida que demarca los límites del ciclo de vida estudiado (y por tanto las entradas y salidas dentro del sistema evaluado), quedará definida dentro del estimado de vida útil de un equipo de operación en minería. En este sentido, un camión de bajo perfil minero cumple su ciclo con una operación de

aproximadamente 21 500 horas efectivas, por tanto, las emisiones e impactos resultantes se encontrarán en unidades por 21 500 horas de operación.

2. Antecedentes

2.1. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es una metodología estandarizada por la International Standardization Organization (ISO) que busca identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales (Rodríguez, 2003) tanto del proceso de manufactura de un producto, esto considerando la extracción de materiales para su construcción, como también su uso y disposición final.

Esta metodología nace a raíz de las preocupaciones que han surgido en las últimas décadas por el cuidado del medioambiente y como una medida de análisis y sustento de decisiones de las diferentes industrias. Estas son consideradas como organismos activos que aportan por medio de su actividad con contaminantes al aire, aguas, suelos, agotamiento de los recursos naturales y degradación (Suárez Tamayo & Molina Esquivel, 2014).

A raíz de lo anterior, existe una familia de normas que estandarizan el marco referencial a distintos niveles de alcance (Ver Figura 1), fundamentando el uso de esta metodología en cinco propósitos según sea el enfoque buscado (Hauschild et al., 2018) :

- Soporte de decisiones de un proceso y su desarrollo;
- Propósitos de marketing;
- Desarrollo y selección de indicadores para monitorear el rendimiento ambiental;
- Selección de proveedores o subcontratistas; y,
- Planificación estratégica.

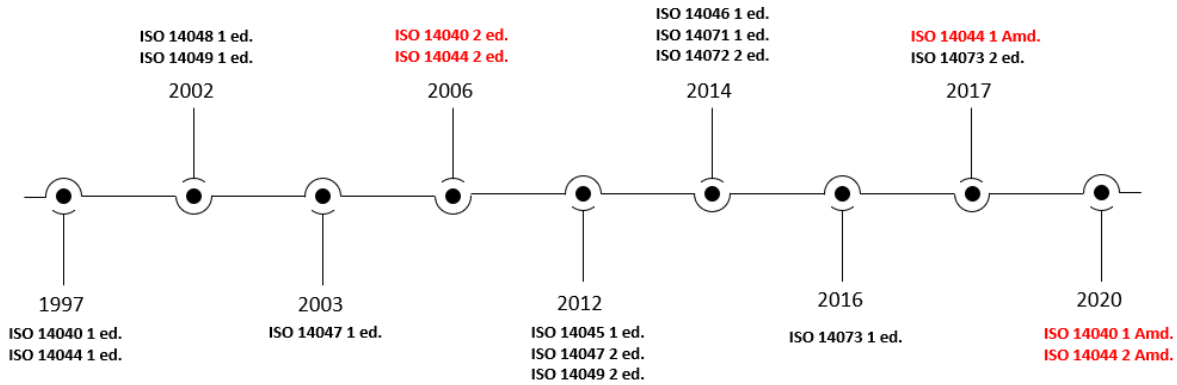


Figura 1. Normativas en torno el análisis de Ciclo de Vida publicadas a lo largo de los años, y sus respectivas correcciones (Ver detalle en Tabla 29, Anexos 10.2).

El ACV está compuesto de cuatro fases principales de carácter iterativo en su desarrollo y presenta distintos niveles de interacción (Ver Figura 2). Por tanto, el desarrollo de cada una de estas fases puede conllevar a una redefinición continua de los distintos objetivos, alcances, inventarios y categorías de impacto, con el fin de lograr evaluar de la mejor manera el potencial de impacto y responder al objetivo del estudio.

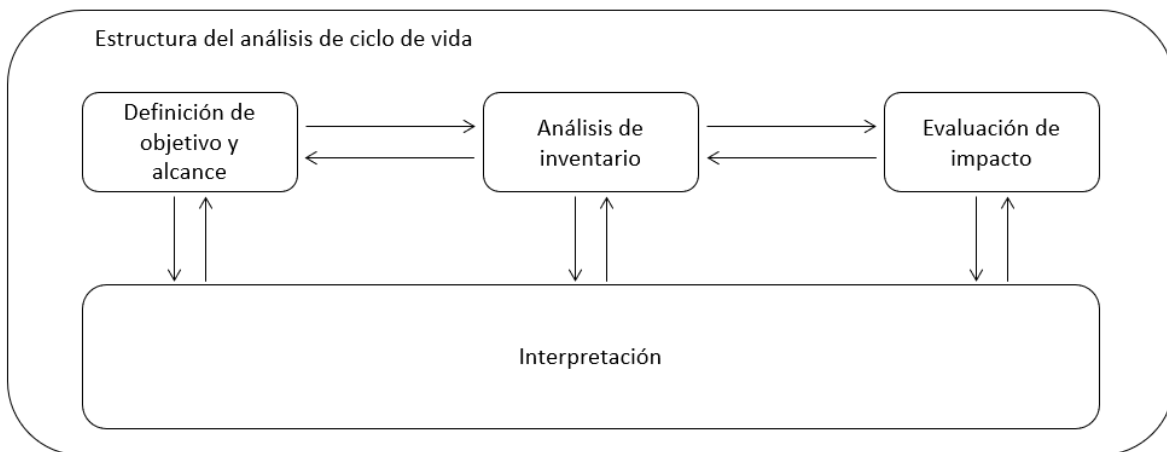


Figura 2. Etapas del análisis de ciclo de vida. Adaptación de ISO14040, 2016.

La fase de definición de objetivo y alcance del estudio de análisis de ciclo de vida define tanto la motivación del estudio, como los niveles de profundidad y detalles que tendrá el estudio (ISO14040, 2006), considerando además que estos deben proveer una descripción del sistema producto en términos de límites y de la unidad funcional (Rebitzer et al., 2004).

Por tanto, además de mostrar abiertamente la motivación y las razones para llevar a cabo el estudio, esto debe considerar mencionar a lo menos los siguientes puntos:

- La unidad funcional, entendiéndose a esta como una unidad cuantitativa del desempeño del sistema que pueda ser usada como método de referencia (Weidema et al., 2004);
- Los límites del sistema;
- Las suposiciones y consideraciones tomadas; y,
- Las categorías de impacto a evaluar, junto con la metodología de caracterización.

Respecto al análisis de inventario, este contempla la colección de los datos y el cálculo de todas las cantidades relevantes que interactúan en el sistema de interés. En este sentido, se debe llevar a cabo un seguimiento de los datos recolectados, con la finalidad de obtener un menor nivel de incerteza entorno a los resultados. De cualquier manera, este análisis es de carácter iterativo e interfiere directamente con los alcances definidos del estudio, considerando que estos pueden redefinirse en torno a los datos recolectados y a los productos objetivos que puedan derivar de estos.

Por otro lado, la tercera y última etapa de un análisis de ciclo de vida corresponde a la evaluación de impacto ambiental, esta corresponde a una de las partes analíticas de mayor implicancia, debido principalmente a que los supuestos realizados en esta etapa afectan directamente a los resultados obtenidos (Chevalier et al., 2011). Por tanto, esta etapa conlleva tres actividades obligatorias que se deben llevar a cabo (*ISO14040*, 2006):

- La selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, siendo estos últimos, los que aportan los factores de caracterización para la determinación de los indicadores de categoría, por tanto, de forma indirecta, estipulan y limitan las categorías de impacto a analizar;
- La asignación de los resultados del ICV (clasificación) a cada categoría de impacto, principalmente debido a que una sustancia puede tener un aporte transversal a varias categorías de impacto ambiental; y,
- El cálculo de indicadores de categoría, los cuales se encontrarán en función de una sustancia representativa equivalente, calculada en función de la ponderación de las sustancias resultantes del ICV por un factor de caracterización, el cual da cuenta de

la contribución relativa de cada entrada y salida del sistema al medio ambiente (Menoufi, 2011).

De igual manera, existen elementos opcionales que facilitan en cierto modo, la comparación entre resultados obtenidos para diferentes sistemas:

- Normalización: el cual provee la información de la relevancia relativa de un impacto en términos de unidades neutras (Andreas et al., 2020) producto de la aplicación de un factor de normalización que permite evaluar el grado de contribución de un impacto al medio ambiente en torno a un sistema de referencia, el cuál usualmente queda limitado al sistema de referencia en donde se desarrolló la metodología (Hauschild et al., 2018);
- Agrupamiento: este considera la unión de distintas categorías de impacto ambiental que contribuyan por medio de un mecanismo similar, al medioambiente y a su entorno;
- Ponderación: la cual busca presentar un valor único ponderado en base a los distintos impactos ambientales (Schmidt & Sullivan, 2002). Este paso en específico, no presenta un fundamento científico, más bien, queda fundamentado en las elecciones subjetivas de quién lleve a cabo el estudio (Hauschild et al., 2018).

Algo que puede resultar confuso, es considerar la diferencia entre realizar una normalización y una ponderación. En este sentido, la normalización conlleva la ponderación en base a un factor de normalización, el cual depende principalmente de una magnitud real o potencial de una categoría de impacto para una región geográfica y en un periodo de tiempo definido, con lo que se puede obtener una comparación entre las diferentes categorías de impacto, pero producto de lo anterior, estas no son cantidades sumables; por otro lado, la ponderación es el resultado de multiplicar los resultados normalizados de una categoría de impacto por un factor de ponderación dependiente de valuaciones subjetivas (social, político y éticos) con la finalidad de obtener un valor único sumable (Menoufi, 2011).

2.2. Análisis de Ciclo de Vida en la Minería

La minería tiene un papel fundamental en materia de impacto ambiental, atribuyéndole a esta industria la mayoría de las grandes contaminaciones del suelo producto de los desechos

(Khalil et al., 2013), como además de la ocurrencia de grandes catástrofes ambientales. Por lo anterior, con el fin de evaluar distintas alternativas para contrarrestar los efectos de los residuos en el medio ambiente y las propias emisiones dentro del proceso productivo es necesario de herramientas de carácter cuantitativo, las cuales facilitan la comparación de resultados. El análisis de ciclo de vida ha sido ocupado en distintos estudios con distintos enfoques, destacándolo principalmente, como una herramienta de detección de “hotspot” de emisiones dentro de los límites del sistema de ciclo de vida de la minería (Ver Figura 3).

Si bien cada metodología de caracterización entrega distintas categorías de impacto, existe una tendencia en las categorías de impacto evaluadas de distintos estudios de ACV realizados a la industria (Ver Gráfico 1), esto principalmente debido a la emisión de distintos contaminantes gaseosos emitidos por la industria metalúrgica. La evaluación de la acidificación, eutroficación, el calentamiento global y la toxicidad humana, han sido los focos principales en distintos estudios llevados a cabo, y por tanto las unidades funcionales evaluadas apuntan a el cálculo de las emisiones en torno a un valor másico de producción (Ver Tabla 30, Anexos 10.2).

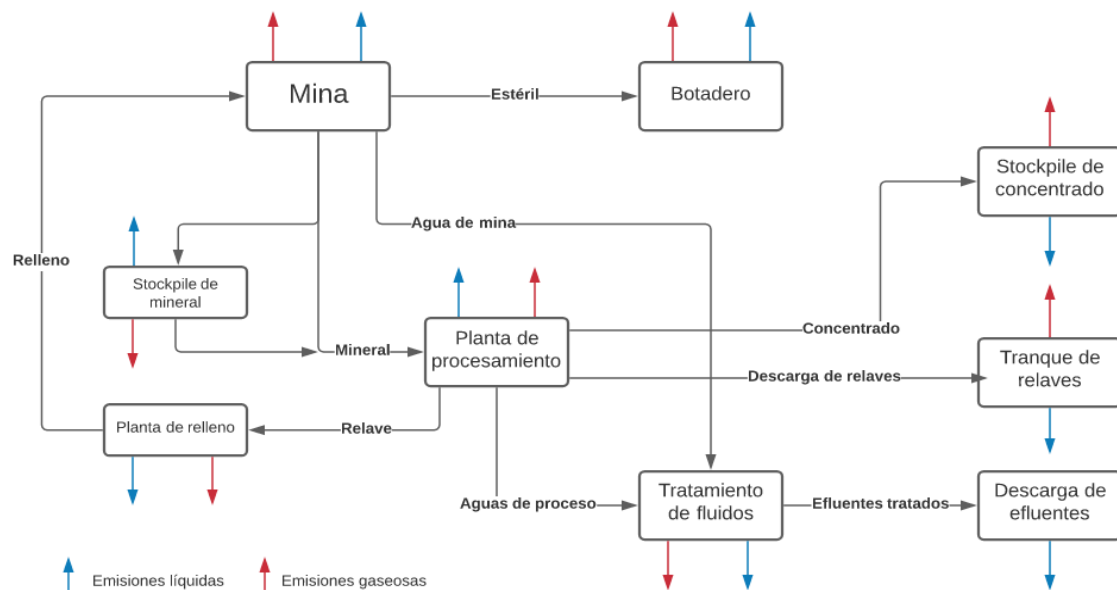


Figura 3. Límites del sistema (ciclo de vida) de minería para la evaluación de impacto ambiental. Adaptado de Durucan et al., 2006.

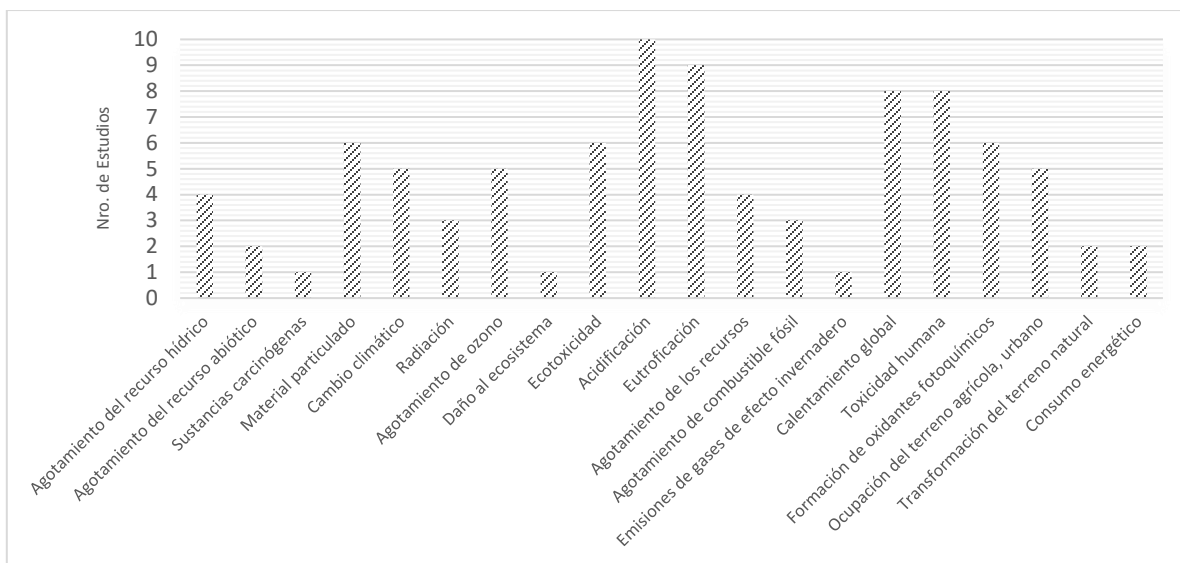


Gráfico 1. Categorías de impacto ambiental abarcadas por distintos estudios de análisis de ciclo de vida en minería.

Si bien, una manera de aplicar el ACV en minería es detectar aquellos procesos unitarios en donde se generen los mayores impactos ambientales, un enfoque comparativo puede servir como el sustento de decisiones a llevar a cabo, con miras en una medida paliativa que genere una disminución en las emisiones del proceso. Por tanto, estudios comparativos como el ejecutado por Awuah-Offei et al. (2008) han dado a conocer que estrategias en base a la utilización de tecnologías “verdes” no siempre conllevan un menor impacto ambiental, si no que el consumo energético asociado a estas tecnologías pueden ser más contaminantes que el propio uso de estas. Estudios similares llevados a cabo por Erkayaoğlu & Demirel (2016) han demostrado que la aplicación de una correa transportadora ha sido más contaminante que la utilización de camiones diésel, resultado condicionado a la matriz energética eléctrica (generación eléctrica en base a carbón) utilizada para la alimentación de los equipos eléctricos en la región de Alberta, Canadá.

2.3. Análisis de Ciclo de Vida en Vehículos

En la actualidad existen distintas medidas paliativas para generar una minería sustentable y sostenible. Una de las opciones existentes, es el adoptar el uso de tecnologías verdes capaces de minimizar los efectos adversos y externalidades negativas de la actividad industrial (Moscoso, 2018), y en ese sentido, los vehículos eléctricos son una alternativa a los

convencionales debido a su nula emisión durante la operación (Petrauskienė et al., 2020). No obstante, el enfoque del ACV da cuenta de cómo es que afectan factores indirectos en las emisiones generadas por el uso de una tecnología en específico, considerando, por ejemplo, emisiones asociadas a la manufactura de las partes que componen el vehículo o, a la producción de la electricidad consumida, pudiendo ser donde reside la mayor desventaja de las tecnologías eléctricas.

Algunos autores sostienen que la generación de energía eléctrica, es la causa principal de los altos niveles de contaminación asociados a tecnologías eléctricas (Awuah-Offei et al., 2008), llegando algunos a concluir que las emisiones indirectas de los vehículos eléctricos pueden ser comparables e incluso mayores que las emisiones directas asociadas al uso de vehículos convencionales (Sobol & Dyjakon, 2020). Un ejemplo de esto, son los gases de efecto invernadero emitidos por los vehículos eléctricos, los cuales son atribuidos al tipo de combustible usado en la generación de la electricidad utilizada por estos vehículos (van Vliet et al., 2011). Situación similar ocurre con las emisiones de material particulado, siendo la generación energética la que aporta los altos niveles de emisión asociados indirectamente a estos vehículos (Requia et al., 2018).

Otros estudios aplicados al transporte en minería, han demostrado que la operación de los vehículos aportan significativamente a las emisiones de partículas (Asif et al., 2019) y en gran medida al calentamiento global producto de la quema de combustibles fósiles (Pell, Tijsseling, et al., 2019), justificando la realización de distintos análisis de ciclo de vida en vista de poder evaluar distintas fuentes de impulsión y disminuir las emisiones generadas en los vehículos convencionales (Ver Tabla 31, Anexos 10.2).

Si bien, varios son los estudios realizados en torno al impacto ambiental que tienen distintos tipos de impulsión en los vehículos, los estudios tienden a evaluar categorías de impacto similares (Ver Gráfico 2), siendo estas: el potencial de calentamiento global, la formación de oxidantes fotoquímicos, y la toxicidad humana.

Con respecto a las emisiones asociadas al ciclo de vida de un vehículo, estas quedan principalmente representadas por 3 alcances:

- Emisiones debido a la matriz/fuente energética de impulsión del vehículo:
- Emisiones por la manufactura del equipo; y,
- Emisiones por el uso y operación del vehículo.

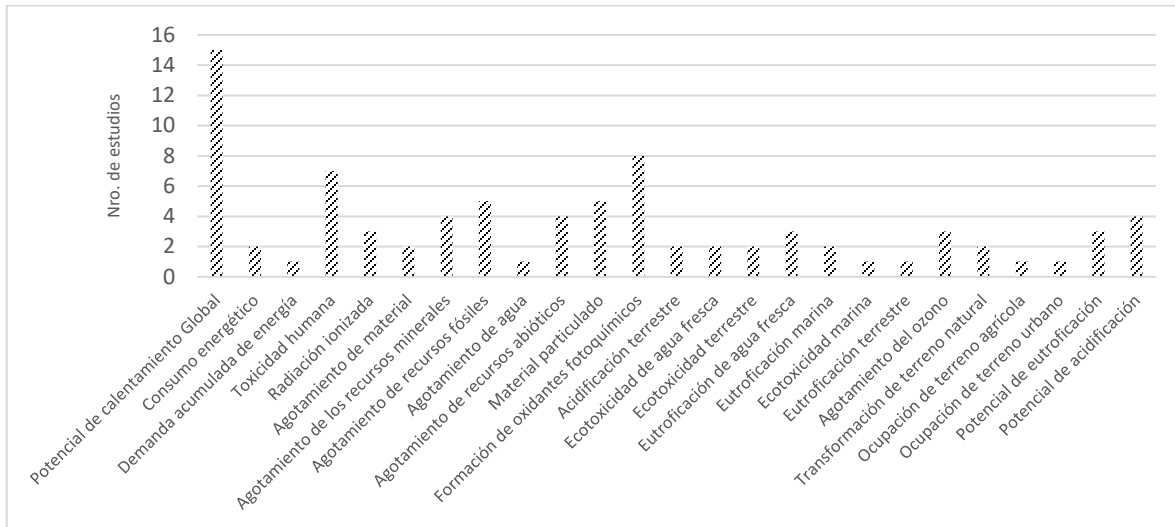


Gráfico 2. Categorías de impacto ambiental abarcadas por distintos estudios de análisis de ciclo de vida en vehículos.

Si bien, el uso del vehículo conlleva a una contaminación por causa de la quema de combustibles fósiles, también la adquisición del vehículo trae consigo distintos factores de emisión asociados a la manufactura, por ejemplo, en los vehículos eléctricos, la fabricación de las baterías y equipos electrónicos es la responsable de una fracción importante de las emisiones tóxicas del ciclo de vida (Van Mierlo et al., 2017). En consecuencia, los límites del sistema a analizar, según sean los procesos unitarios del ciclo del vehículo, deben ser considerados desde la manufactura del equipo (Ver Figura 4).

El sistema presentado en la Figura 4, considera la manufactura de la batería como parte del alcance de los equipos, considerándola como un componente propio de este. Por otro lado, dentro de este mismo ciclo se pueden diferenciar distintas perspectivas o enfoques de estudios evaluados por distintos autores, siendo estos los siguientes (Van Mierlo et al., 2017):

1. Enfoque *Well-To-Tank (WTT)*: siendo aquel análisis en donde se evalúan las emisiones generadas en la extracción/generación del combustible del vehículo, su

transporte y su distribución, y por tanto un enfoque en la cadena de suministro de combustible;

2. Enfoque *Tank-To-Wheel (TTW)*: que es donde se analiza la operación misma del equipo (conversión energética del combustible) y sus emisiones asociadas por su actividad;
3. Enfoque del *ciclo de vida del vehículo*: Aquel que se enfoca en la producción material, manufactura del vehículo, mantenimiento y el término de la vida útil del equipo, siendo un análisis enfocado en el objeto y no de su operación misma.
4. También se puede considerar la unión de los enfoques *Well-To-Tank* y *Tank-To-Wheel*, resultando intuitivamente, en el enfoque *Well-To-Wheel (WTW)*, un enfoque que considera desde la producción del combustible hasta la operación del vehículo con dicha fuente, además, de ser una metodología ampliamente utilizada para el apoyo de políticas en el transporte de carretera (Moro & Helmers, 2017).

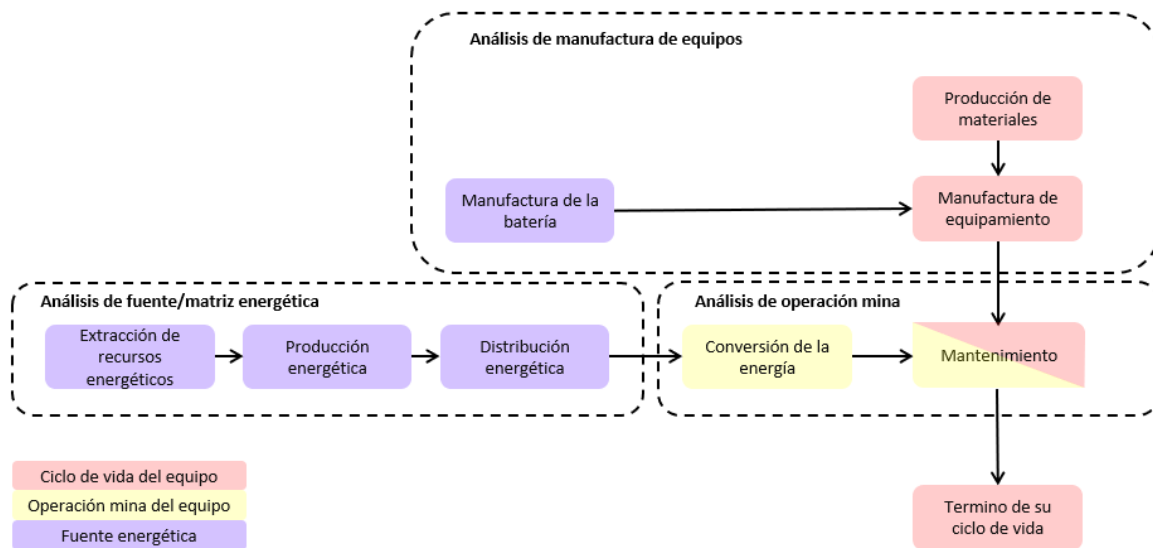


Figura 4. Límites del sistema para evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida de vehículos. Adaptado de Van Mierlo et al., 2017.

2.4. Metodologías de caracterización de impacto ambiental

Estas buscan describir los potenciales efectos en el medio ambiente de distintas actividades, cuantificándolos entorno a ponderaciones de emisiones características para cada tipo de categorías. Estos ponderadores quedan definidos por distintas evaluaciones, siendo la ubicación, el terreno, la actividad y el régimen operacional, algunos factores principales que los definen. Es por lo anterior, que cada metodología, si bien comprende los elementos obligatorios de un análisis de impacto ambiental, puede o no considerar la determinación del agrupamiento, normalización y/o ponderación (Ver Figura 5).

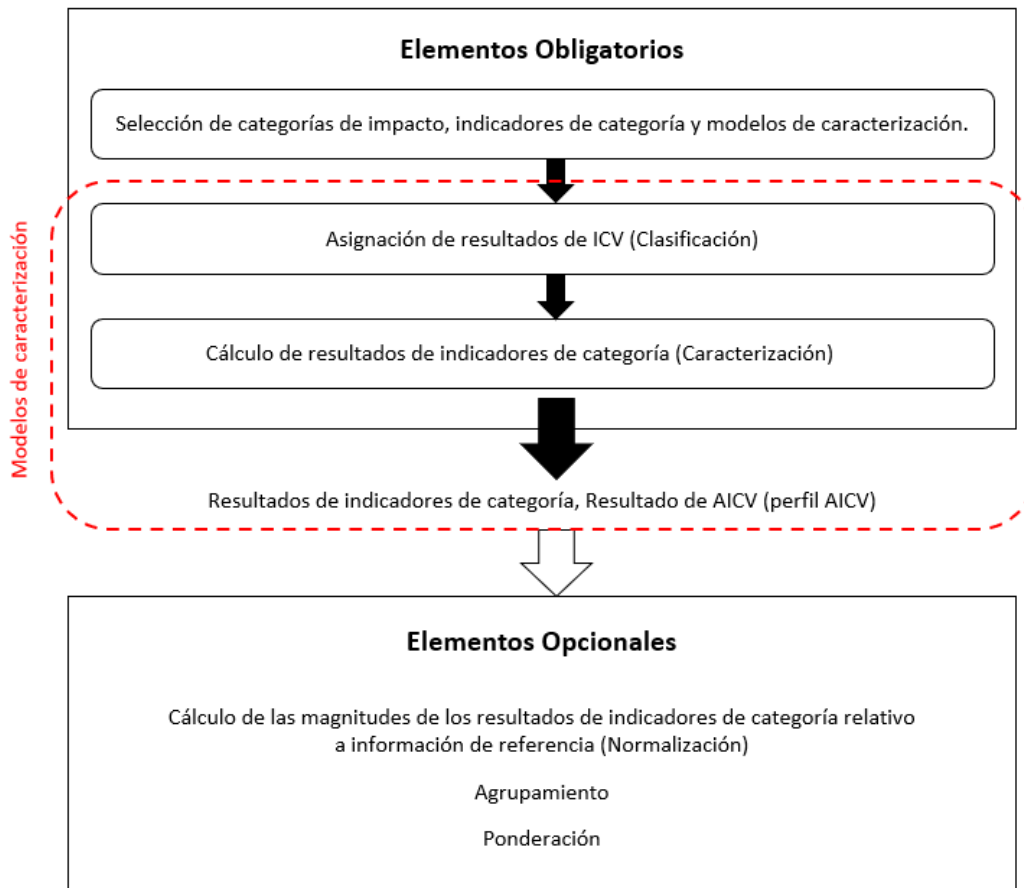


Figura 5. Elementos del análisis de impacto de ciclo de vida. Elementos opcionales son sólo abarcados por ALGUNOS métodos de caracterización. Adaptado de ISO14040, 2006.

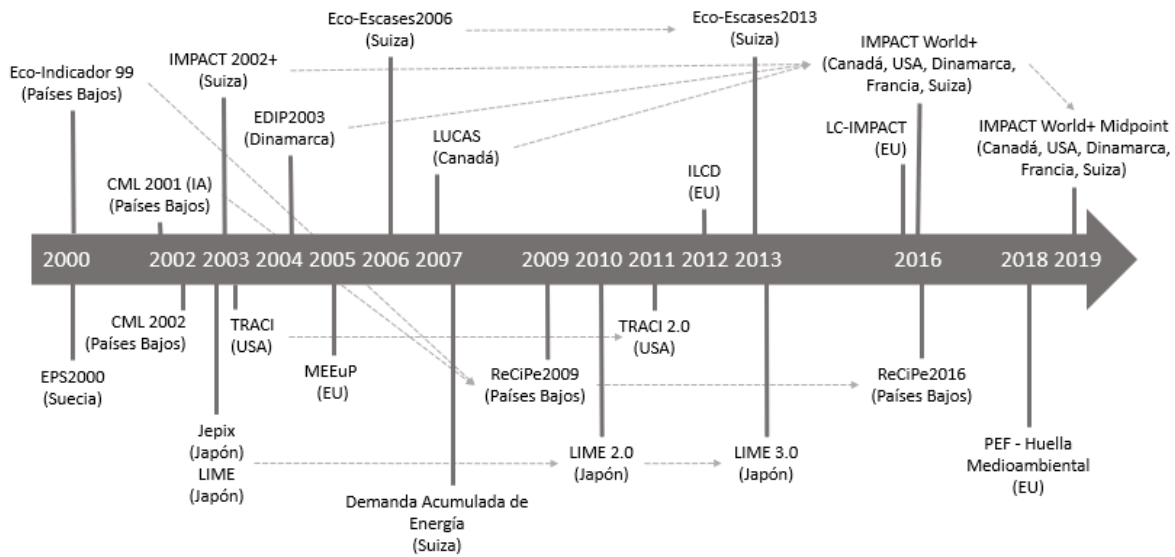


Figura 6. Algunos métodos de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida publicados desde el año 2000 con país/región de origen. Adaptado de Hauschild et al., 2018.

Dentro de los distintos métodos de caracterización se presentan distintas categorías de impacto, por lo que la elección del método de caracterización de impacto ambiental debe ser llevada a cabo en virtud de un análisis previo considerando los siguientes puntos:

- Utilizar un método que abarque las categorías de impacto alineadas con los objetivos del estudio;
- Se debe utilizar sólo el método de caracterización más reciente y actualizado en caso de utilizar los mismos modelos en múltiples AICV (JRC-IES, 2010);
- Si se utiliza un modelo de caracterización con una versión adaptada a diferentes regiones geográficas, pero el modelo en sí no se mejora ni cambia significativamente, sólo se debe incluir la versión original del método (JRC-IES, 2010).

Dado que los distintos métodos de caracterización se han desarrollado a lo largo de los distintos años y por tanto de una u otra forma responden a la necesidad contemporánea, las metodologías abarcan distintos números de categorías de impactos ambientales (Ver Gráfico 3). Las categorías de impacto se desenvuelven, de manera general, en torno a 3 consecuencias principales:

- Recursos: siendo estos el análisis en torno al agotamiento y escases de los recursos fósiles, minerales, agrícolas, energéticos y acuáticos;
- Salud Humana: en donde se consideran aspectos cancerígenos y no cancerígenos de distintas sustancias, distintos efectos respiratorios, morbilidad, molestias entre otros;
- Emisiones: considerando las emisiones de CO₂ y sus efectos en el cambio climático, la toxicidad, ecotoxicidad, acidificación, eutroficación, radiación ionizante, entre otros.

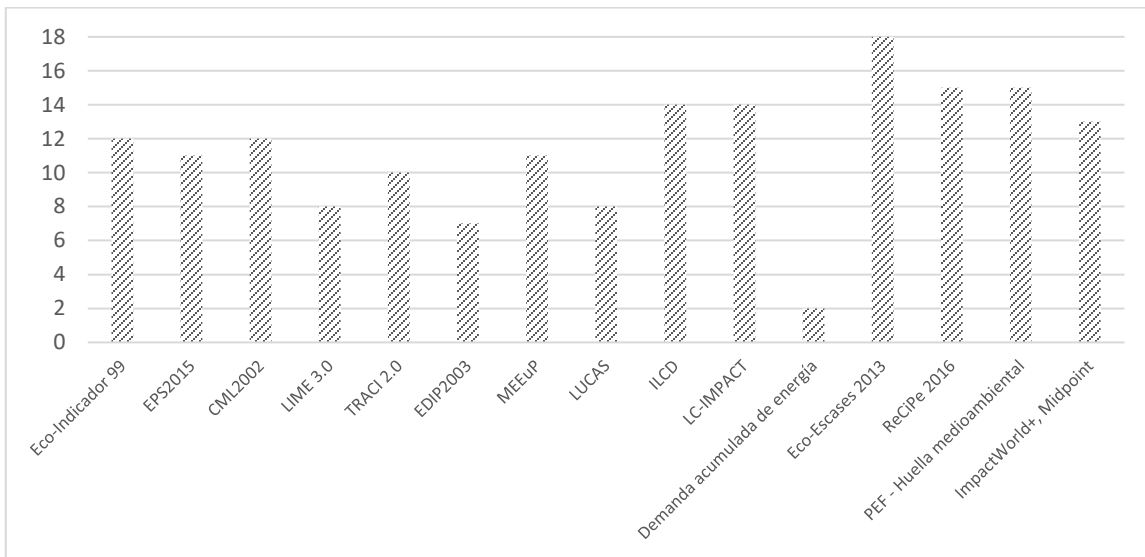


Gráfico 3. Número de categorías abarcadas por metodología de caracterización de impactos.

2.5. Emisiones en torno al ciclo de vida

Actualmente, las industrias actúan con un rol activo en materia de decisiones ambientales. Es por esto, que ha nacido la necesidad de poder cuantificar y categorizar los efectos de las emisiones con un enfoque en la contabilidad, el cual facilite la toma de decisiones y la generación de estrategias ambientales. Para esto, se han clasificado las emisiones en dos tipos principales (Protocol & Initiative, 2004):

- Emisiones directas: las cuales son generadas de fuentes que pertenecen a las compañías;

- Emisiones indirectas: que son emisiones resultado de las actividades de la compañía, pero que son emitidas desde fuentes pertenecientes o controladas por otras compañías.

Estas clasificaciones otorgan una primera mirada acerca del tipo de fuente de la emisión estudiada, sin embargo, es importante considerar distintos alcances acerca del desarrollo de los estudios en torno a fuentes de emisión. En este último aspecto, existen tres alcances bien definidos para las emisiones de gases, principalmente de los gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son (Protocol & Initiative, 2004):

- Alcance uno: emisiones directas desde fuentes propias, por ejemplo, vehículos, emisiones desde producciones químicas, o la operación de máquinas de combustión;
- Alcance dos: emisiones asociadas a la generación de la electricidad consumida en una actividad;
- Alcance tres: emisiones de tipo indirectas, por ejemplo, la extracción y producción de materiales comprados para la manufactura, transporte de combustibles adquiridos, entre otros.

En Chile, dentro del período 2008-2018, cerca del 40% de las emisiones de GEI son asociadas a las industrias energéticas y cerca de un 31% se asocian al sector del transporte (Ver Gráfico 4), por otro lado no menor, existe un 19% asociado a las industrias manufactureras y de la construcción, siendo estos 3 sectores, el 90% de las emisiones de GEI en el país (Comisión Nacional de Energía, 2018b).

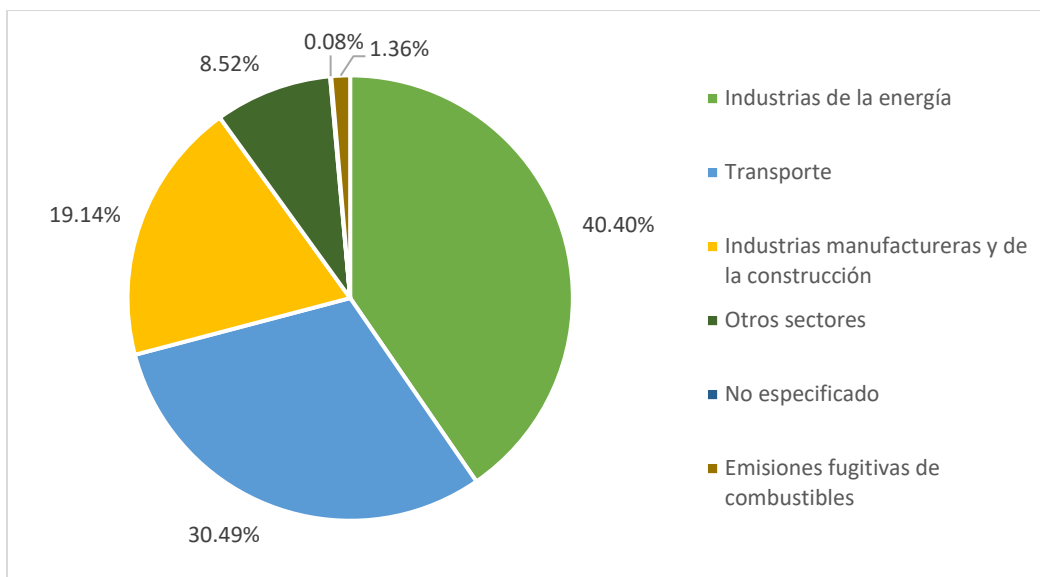


Gráfico 4. Emisiones de GEI por sector industrial en Chile, expresado en kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente.

Tomando en cuenta el gran aporte en materia de emisiones de GEI a nivel nacional, atribuible al suministro energético nacional, es importante considerar cuales son las tecnologías asociadas a la generación eléctrica de nuestra matriz energética.

La matriz energética nacional se encuentra determinada por el sistema eléctrico nacional (SEN), el cual fue formado a finales del año 2017 en base a la unión de los sistemas interconectado central (SIC) y el de norte grande (SING) (Comisión Nacional de Energía, 2017). Estos presentan distintas fuentes energéticas (tecnologías) para suministrar los requerimientos del país, destacando al carbón como la principal fuente de generación energética nacional, con un aporte del 71% al SING (Comisión Nacional de Energía, 2020c) y un 28% para el SIC (Comisión Nacional de Energía, 2020b), porcentaje correspondiente a la generación energética total anual, promediada para el periodo 2015-2020 (Ver Gráfico 5 y Gráfico 6).

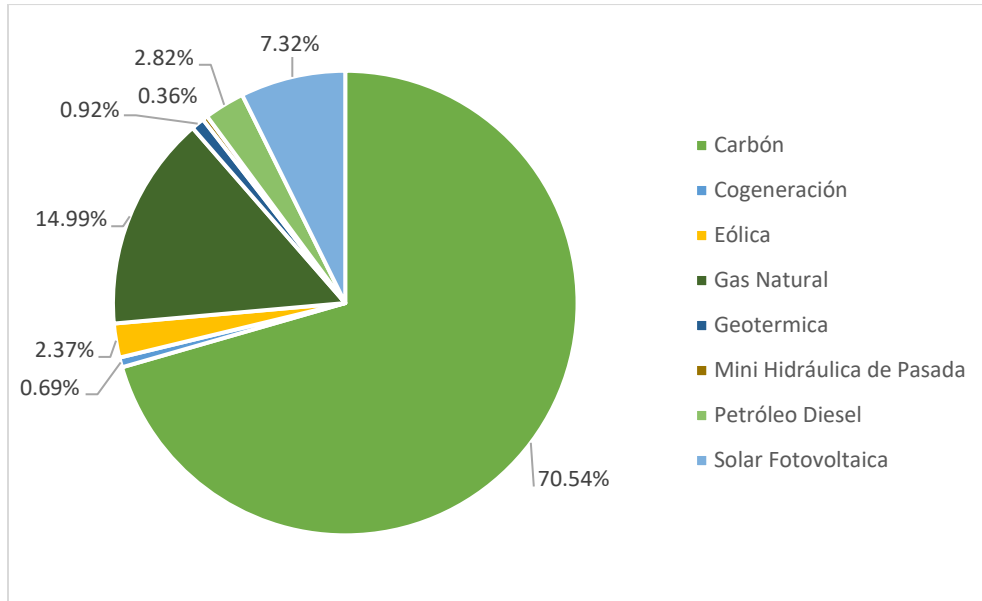


Gráfico 5. Distribución porcentual promedio de la generación energética bruta anual para el periodo 2015-2020, por tecnología, para el SING de Chile.

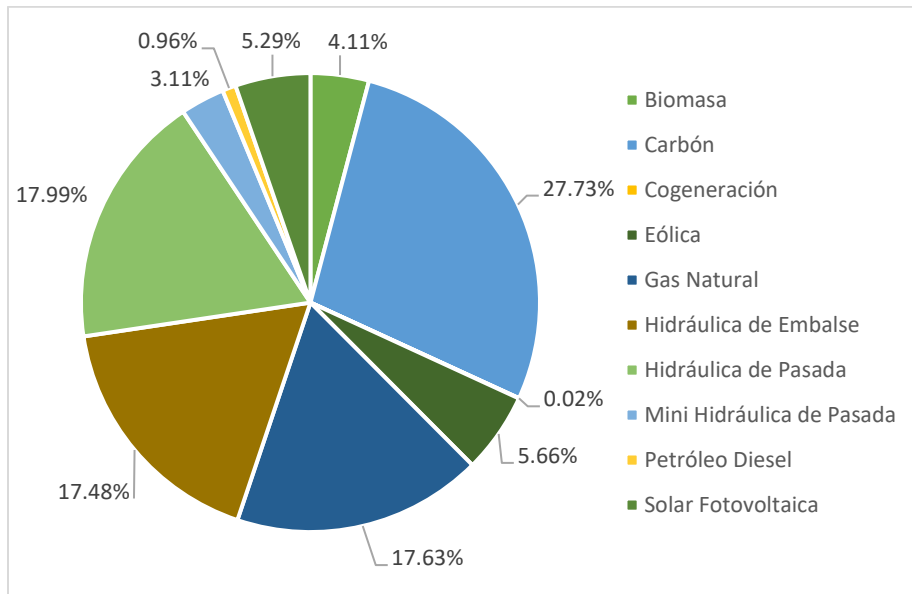


Gráfico 6. Distribución porcentual promedio de la generación energética bruta anual para el periodo 2015-2020, por tecnología, para el SIC de Chile.

Los dos sectores con mayor aporte a las emisiones de GEI nacionales, quedan determinados por la fuente de energética que se esté utilizando. En este último sentido, en Chile, cerca de 24 877 [kton CO₂ eq.] son emitidos en promedio anualmente desde la quema del combustible diésel, siendo cercano a un 32% en promedio del total anual de emisiones por combustible, siendo estrechamente seguido, con un 28% de las emisiones, por el carbón, emitiendo cerca

de 22 160 [kton CO₂ eq.] en promedio anual (Ver Gráfico 7 y Gráfico 8) (Comisión Nacional de Energía, 2018a).

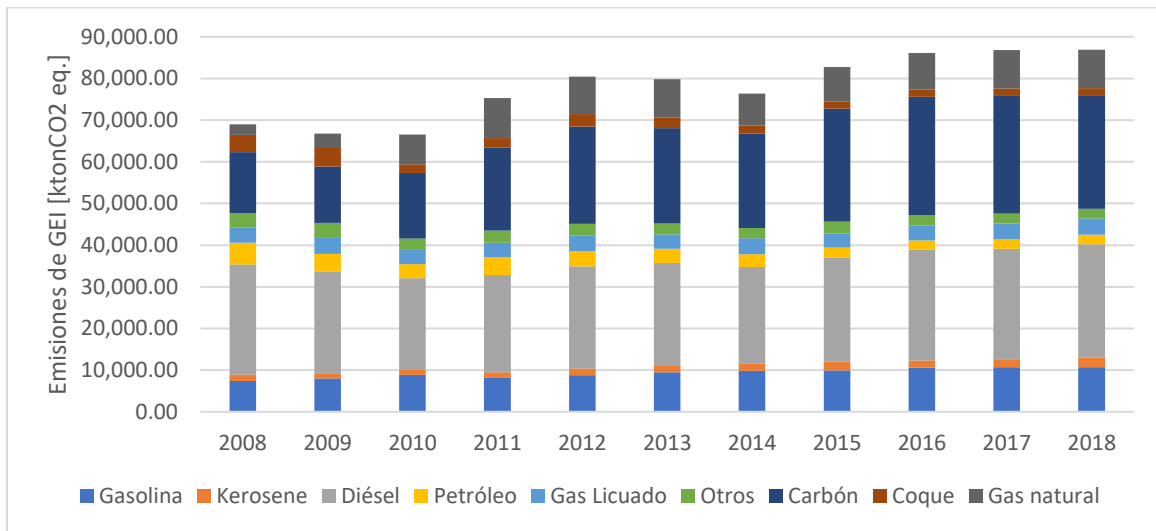


Gráfico 7. Emisiones de GEI por año por combustible en Chile.

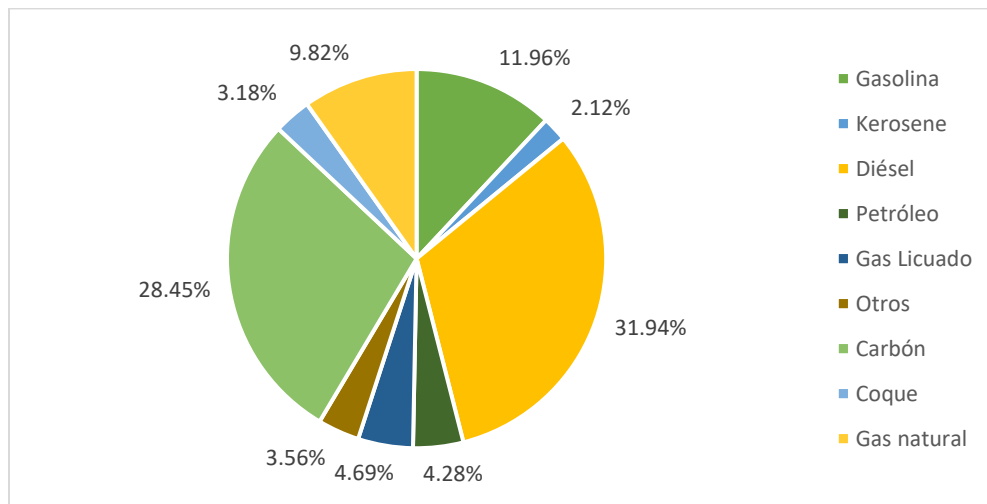


Gráfico 8. Distribución porcentual promedio anual de emisiones de CO₂ eq. por combustible en Chile, periodo 2008-2018.

Si bien, la quema de combustibles fósiles y en especial la combustión en el transporte aporta en grande medida con las emisiones de CO₂ eq., según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) las fuentes móviles también producen emisiones de gases directos de efecto invernadero, siendo principalmente: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de distintos tipos de otros contaminantes abarcando el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), dióxido de azufre

(SO₂), material particulado (PM) y distintos óxidos de nitrato (NO_x), donde estos últimos 5 contaminantes son considerados como gases indirectos de efecto invernadero o sustancias precursoras (Davies et al., 2006).

Tal y como se mencionó anteriormente, si bien la operación del transporte genera distintas emisiones principalmente de alcance uno, también es importante considerar las emisiones indirectas asociadas al alcance tres de la adquisición de maquinaria, vehículos y en general, fuentes móviles. Con respecto a este punto, es importante tomar en cuenta dentro del ciclo de vida de un vehículo, su propia manufactura y, por tanto, las emisiones que conllevan cada uno de los procesos necesarios para la elaboración de un vehículo (Ver Gráfico 9).

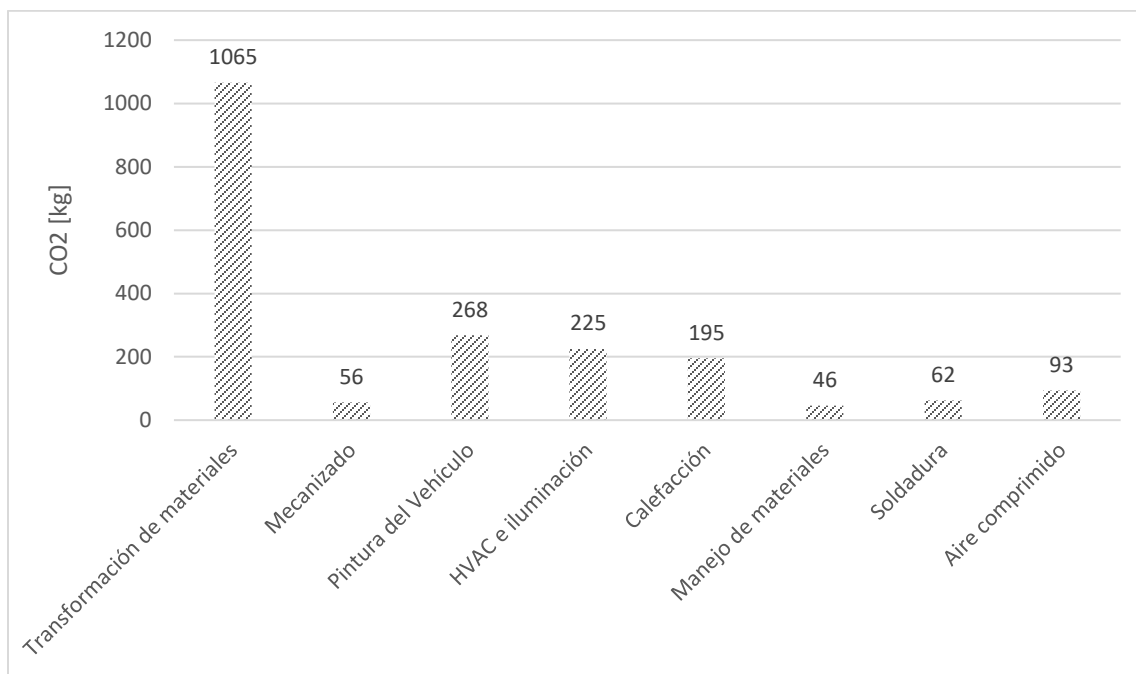


Gráfico 9. Emisiones de CO₂ por proceso de manufactura y ensamble de vehículo genérico de 1532 [kg]. Adaptado de Sullivan et al., 2010.

Con respecto al alcance dos de las emisiones consideradas para la industria, existen dos métodos distintos para su estimación, estos son el método basado en el mercado y el método basado en la localización. El primero de estos refleja la intensidad de emisiones promedio que se produce por el consumo de energía, siendo principalmente estimado como las emisiones físicas que son “soltadas” al aire por medio de un factor de emisión; por otro lado, tenemos el método basado en el mercado, que refleja las emisiones de la electricidad

comprada y elegida por la empresa, entendiéndose como las emisiones por decisión de compra (Sotos, 2015).

Grandes empresas entorno al rubro de manufactura de equipos mineros, han tenido la última década distintas consideraciones en torno a su impacto ambiental, pudiéndose reflejar en la adhesión de las emisiones en sus reportes anuales. Empresas como Hitachi, Sandvik, Komatsu, Epiroc y Caterpillar, han dado cuenta de distintas cantidades de emisiones que son soltadas anualmente por sus operaciones al ambiente (Ver Tabla 1), siendo el foco, principalmente, reflejado en emisiones de gases de efecto invernadero y algunas otras sustancias (NO_x, SO_x, CFC-11, etc.)

Tabla 1. Emisiones de CO₂ eq. para distintos alcances de empresas manufactureras de equipos mineros.

	Emisiones en kton CO ₂ eq.			Fuente
	Alcance 1	Alcance 2	Alcance 3	
Hitachi	1530	2890	106110	(HITACHI Sustainability Report, 2020)
Sandvik	176	429	-	(Sandvik Annual Report 2019 - Home, 2019)
Komatsu	-	663	-	(ESG Databook, 2020)
Epiroc*	6	22	105	(Annual and Sustainability Reports Epiroc, 2019)
Caterpillar	905	1795	-	(Caterpillar Annual Report & Sustainability Report, 2019)

*Emisiones contabilizadas sólo con CO₂. No aplica CO₂ eq.

Otro foco que ha sido considerado hoy en día en países más avanzados, son las emisiones de material particulado de diésel, DPM por sus siglas en inglés. El DPM es un subproducto de la combustión incompleta del combustible en los motores diésel, el cual está definido como un componente físico de aerosol sub-micrónico (<1.0 µm) del escape del vehículo (Zheng, 2011). Principalmente está formado por un núcleo formado por carbón elemental, con distintas otras sustancias adjuntas a la superficie (Ver Figura 7), incluyendo componentes de carbón orgánico conocidos como hidrocarburos aromáticos (Morla & Karekal, 2017).

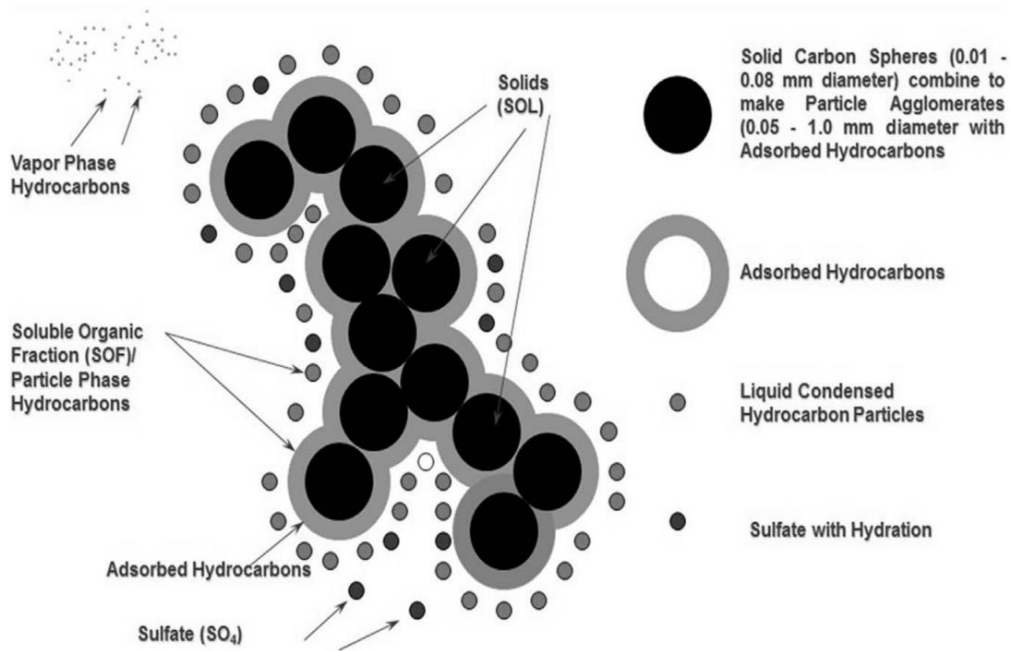


Figura 7. Representación esquemática del material particulado de diésel. Extraído de Mohankumar & Senthilkumar, 2017.

Esta emisión ha sido estudiada y ha demostrado la generación de tumores pulmonares frente a exposiciones prolongadas con concentraciones considerables (Chang & Xu, 2017), principalmente debido a que las partículas ultrafinas tienen una alta probabilidad de deposición, particularmente en la región alveolar de los pulmones (Bertolatti et al., 2011).

Frente a esto distintas naciones han elaborado legislaciones en torno a las concentraciones máximas de material particulado de diésel, además de elaborar cual es la sustancia objetivo que delimita la estimación del DPM. En este último punto, es importante mencionar que las legislaciones vigentes estipulan concentraciones máximas en torno, principalmente, al carbón elemental y polvo combustible respirable (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Algunos estándares de exposición al material particulado de diésel. Adaptado de Ngele, 2017.

Agencia / Comité / Regulador	Límite de exposición [mg/m ³]	Sustancia Medida
Canadian ad hoc Diesel Committee	1.5	Polvo Combustible Respirable
Mine Safety and Health Administration	0.4 - 0.16	Carbono Total
Suiza, Tunelería	0.2	Carbono Total
American Conf. Of Gov. Industrial Hygienists	0.02	Carbono Elemental
Alemania, Tunelería	0.1	Carbono Elemental
U.S: MSHA metal/non-metal underground mines	0.16	Carbono total: carbón elemental + carbón orgánico determinado por NIOSH meth 5040
U.S: MSHA metal/non-metal Coal mines	Tasas de emisión en función de la tasa de uso, por ejemplo: 2.5g/h	Medición en acorde con el procedimiento ISO 8178
Alemania: entorno ocupacional general	0.1	Carbono Elemental, por Coulometría
Alemania: sitios de construcción subterráneo metálico y no metálico	0.3	Carbono Elemental, por Coulometría
Canadá: Subterráneo, minería metálica y no metálica	1.5	Polvo Combustible Respirable
Suiza	0.1	Carbono Elemental, por Coulometría
Australia Department of Natural Resources and Mines (DNRM)	0.1 (máximo en 8 horas)	Carbono Elemental

Por otro lado, las estimaciones del material particulado de diésel se hacen complicadas considerando que se debe considerar el régimen de trabajo del motor, el combustible utilizado y características agregadas que pudiesen estar (filtros). Es por esto, que una buena aproximación, se realiza a partir de la United States Environmental Protection Agency (US EPA) al igual que la European Union (EU), agencias que certifican y clasifican distintos motores de acuerdo con los contaminantes emitidos en régimen de uso normal estandarizado. De acuerdo con esto, las clasificaciones otorgadas a los motores estudiados por la EPA, pueden dar cuenta de las cantidades emitidas de material particulado de interés. Para el caso particular de este estudio, se considerarán las clasificaciones otorgadas por la agencia estadounidense (Ver Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico).

2.6. Baterías en la industria automotriz

Las baterías de los vehículos eléctricos presentan configuraciones variables según sea el proveedor de estas. A modo general, estas mantienen un ordenamiento en torno a la formación de packs de baterías manufacturadas en distintas subetapas y partes (Ver Figura 8), las cuáles son ensambladas en arreglos convenientes para suministrar los requerimientos eléctricos necesarios.

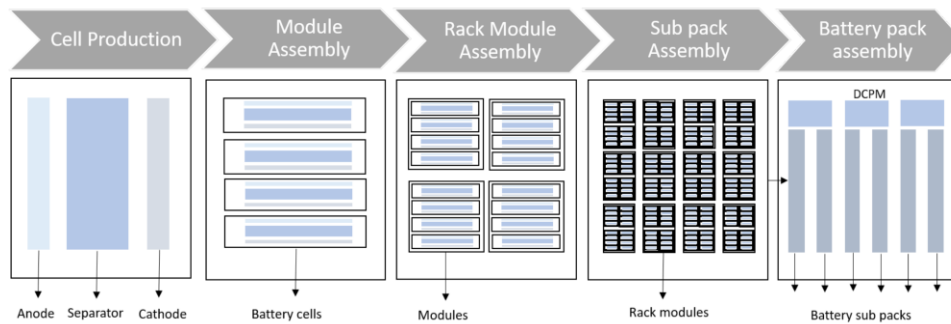


Figura 8. Etapas de producción de un pack de batería con sus respectivas partes. Extraído de Liu, (2020).

La principal diferencia entre tipos de baterías radica en la química que componen las celdas, principalmente centrado en el material de los electrodos y en el electrolito conformante. Actualmente, las baterías comúnmente ocupadas en los vehículos son las de plomo-ácido (PbA), Níquel-cadmio (NiCd), Níquel-metal hidruro (Ni-MH) y las más reconocidas, las de ion de litio (Lithium-ion). Estas últimas destacan frente a las otras, principalmente, por poseer alta densidad energética y una alta densidad de poder, permitiendo generar packs de baterías más livianos y de menor tamaño (He, 2016). Estas últimas presentan distintas categorías dependiendo del material que conforme el cátodo y, por tanto, cada una de estas presentan rendimientos técnicos diferenciados (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Rendimiento técnico de distintas baterías de ion de litio. Adaptado de He, (2016).

Especificaciones	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)
Rango voltaje operacional (V)	2.5~4.2	2.5~4.2	2~3.6	2.5~4.2
Energía específica (Wh/kg)	150-190	100-135	120-160	140-180
Temperatura operacional en descarga (°C)	-20~60	-30~60	-30~50	-20~60
Temperatura operacional en carga (°C)	0~45	0~45	0~45	0~45

Algunas ventajas que destacan de las baterías de LFP son:

- El uso de hierro como componente del cátodo, el cuál es barato y benigno para el medio ambiente (Spitthoff et al., 2021);
- Una vida de almacenamiento energético más prolongada, además de ser menos afectadas por la temperatura que otras baterías de ion litio en presencia de cátodos de LFP y ánodos de grafito (Spitthoff et al., 2021);
- Presenta una alta capacidad eléctrica (170 mAhg⁻¹) con una seguridad intrínseca debido a la fuerza de sus enlaces covalente P-O, descartando cualquier riesgo de liberación de oxígeno (Scrosati & Garche, 2010).

De cualquier forma, las tecnologías del mercado son variadas, y pueden llevarse a cabo con las distintas químicas de cada batería en distintas configuraciones, las cuales entregan distintos riesgos asociados principalmente a fallas eléctrica como fallas térmicas. Las celdas de ion litio, al presentar alta densidad energética, tiende a generar un sobrecalentamiento por las reacciones exotérmicas y una liberación rápida de la energía almacenada, lo que en unión a la característica inflamable de su electrolito, genera un peligro constante (Mikolajczak et al., 2012). Otro riesgo asociado al uso de estas baterías, es el riesgo mecánico, principalmente asociado al manejo de las grandes masas de baterías y posibles situaciones en donde se vean propensas a someterse a golpes desmesurados. Dentro de la investigación realizada por Kjosevski et al., (2017), se encontraron casos de accidentes ocurridos con vehículos eléctricos en donde existió una penetración de líquido refrigerante dentro de la carcasa de las celdas, lo que unido a los altos voltajes, genero un corto circuito y un eventual descontrol térmico, situación propensa a la que se encuentran las baterías durante su manejo.

De cualquier forma, existen riesgos asociados al funcionamiento eléctrico y su correcto control en el manejo energético de la batería, riesgo de explosión, principalmente debido a los electrolitos ocupados, descontrol térmico en situaciones de una alta temperatura ambiental por mal funcionamiento del sistema de control electrónico, entre otros (Hollmotz, 2013), en donde los proveedores han presentado distintos métodos de control, prevención y manejo, como el corte total de suministro energético en caso de la detección de filtraciones, carcacas protectoras para altos impactos, entre otros.

Otro punto importante para destacar, son las alternativas actuales del mercado frente al término del ciclo de vida de las baterías. Actualmente, existen dos alternativas principales para disminuir el impacto ambiental de estas en su disposición final (Environmental, 2019):

- Reusar: Esto considerando que al término de su vida útil estas presentan capacidad entre 70-80% las cuales pueden ser ocupadas en otras aplicaciones a modo de “segundas vida”. Además, existen múltiples aplicaciones estacionarias en donde las baterías pueden servir como suministro de almacenamiento instalado (Kotak et al., 2021).
- Reciclar: en donde existen distintos métodos para recuperar las materias primas que la componen, especialmente aquellos con valor químico y metálico como el cobalto, níquel y aluminio.

Reusar se establece como una alternativa preferente a la toma de decisiones de término de ciclo de vida de las baterías considerando la falta de desarrollo costo-energéticos de los procesos de reciclaje (Kotak et al., 2021). Además, hay que considerar que el reciclaje, especialmente de las baterías de ion litio, se dificulta debido a la composición de estas (gran mezcla de componentes) y al acceso a la información de dicha composición, además, de que la composición química de los electrodos varía de acuerdo a cada proveedor (Science for Environment Policy, 2018).

3. Marco Teórico

3.1. Estimación de emisiones de los vehículos en operación

Las metodologías de estimación de emisiones en fuentes móviles han sido abarcado por distintas entidades (Environmental Protection Agency-EPA , The Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, por nombrar algunos) y estudios (Barati & Shen, 2015; Dönicke, 2017; Tornehed, 2010; entre otros) diferenciándose, principalmente, en los distintos factores de emisión ocupados en sus cálculos.

La IPCC estipula distintas ecuaciones para el cálculo estimativo de emisiones en torno al ciclo de operación del vehículo. Generalizando, se basan principalmente en la siguiente expresión (Davies et al., 2006):

$$Emisión = \sum_{a,b,c,d} [Actividad_{a,b,c,d} \cdot EF_{a,b,c,d}] + \sum_{a,b,c,d} C_{a,b,c,d} \quad (1)$$

Donde:

Emisión = cantidad de sustancia emitida;

$EF_{a,b,c,d}$ = factor de emisión en unidades de masa de sustancia emitida por unidad de actividad considerada;

$Actividad_{a,b,c,d}$ = operación del vehículo cuantificada en unidades de distancia recorrida por unidad de tiempo o combustible consumido por unidad de tiempo;

$C_{a,b,c,d}$ = emisiones durante el arranque en frío en unidades de masa (en caso de considerar actividad cuantificada en unidades de distancia recorrida por unidad de tiempo);

a= tipo de combustible consumido;

b= tipo de vehículo evaluado

c= tecnología de control de emisiones en caso de existir;

d= condiciones de funcionamiento (ej. Carretera urbana o rural, clima, otros).

De la ecuación (1) es importante destacar que los factores de emisión se diferencian para cada emisión considerada, por lo que serán estimados en función del combustible utilizado a lo

largo de la operación. Las emisiones se concentrarán en aquellas asociadas a los gases de efecto invernadero, siendo estas principalmente las emisiones asociadas a CO₂, CH₄ y N₂O.

Para la estimación de material particulado de diésel, el factor de emisión será considerado como el límite asociado a la clasificación de sustentabilidad asignado por la EPA según sea el Tier y el año del motor. De cualquier forma, esto se considera una aproximación referida al desempeño ecológico del motor y no considera factores externos del propio vehículo que pueda afectar las emisiones estimadas (instalación de filtros, innovación en aceites y/o combustibles ocupados, optimización de desempeño, entre otros). Además, es importante mencionar que las mediciones realizadas al momento de caracterizar el motor son hechas en un ambiente controlado con estándares de contaminantes en el ambiente restringidos (Dallmann & Menon, 2016), por lo que puede o no reflejar las emisiones “reales” en operación. Para el caso del presente estudio, se considerará esta aproximación correcta.

3.2. Caracterización de potencial de impacto ambiental

La caracterización del impacto es realizado en base a los flujos elementales del análisis de inventario de ciclo de vida (Hauschild et al., 2018), en este sentido, los distintos flujos que fueron previamente clasificados en torno a distintas categorías de impacto, son multiplicados por un factor de caracterización y sumados según sea su grado de participación en la categoría de impacto evaluada.

El resultado principal de la caracterización es el puntaje de impacto (IS por sus siglas en inglés) el cuál es calculado de la siguiente forma (Hauschild et al., 2018):

$$IS_c = \sum_i (CF_i \cdot E_i) \quad (2)$$

Donde:

IS_c = puntaje de impacto (Impact Score) de la categoría c;

CF_i = factor de caracterización (Characterisation Factor) para la sustancia i;

E_i = flujo elemental de la sustancia i.

3.3. Estimación del consumo de combustible / electricidad

Para la estimación del consumo de combustible se considera el uso del modelo físico de tracción mecánica (Ver Figura 9), en donde intervienen distintas fuerzas que depende principalmente de las características del vehículo, del camino y el ambiente circundante (Ver Figura 10).

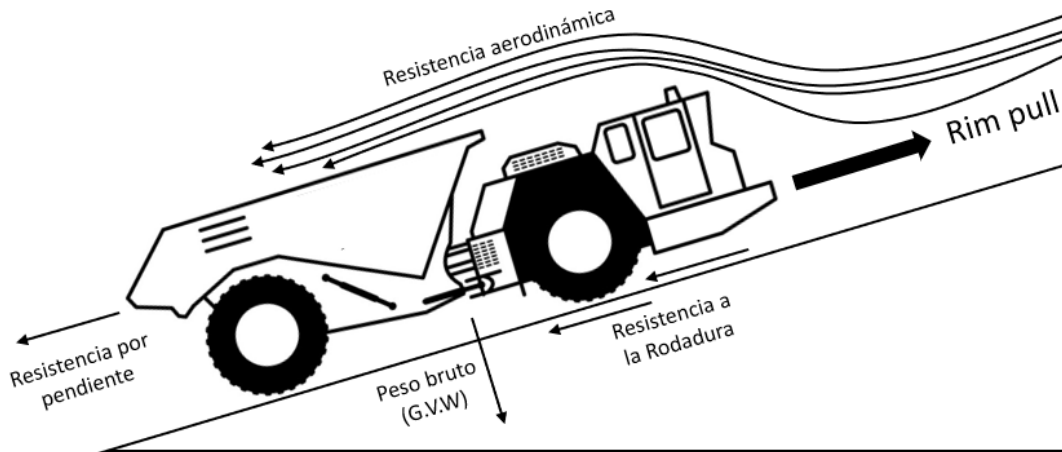


Figura 9. Modelo físico de interacción de un vehículo en operación.

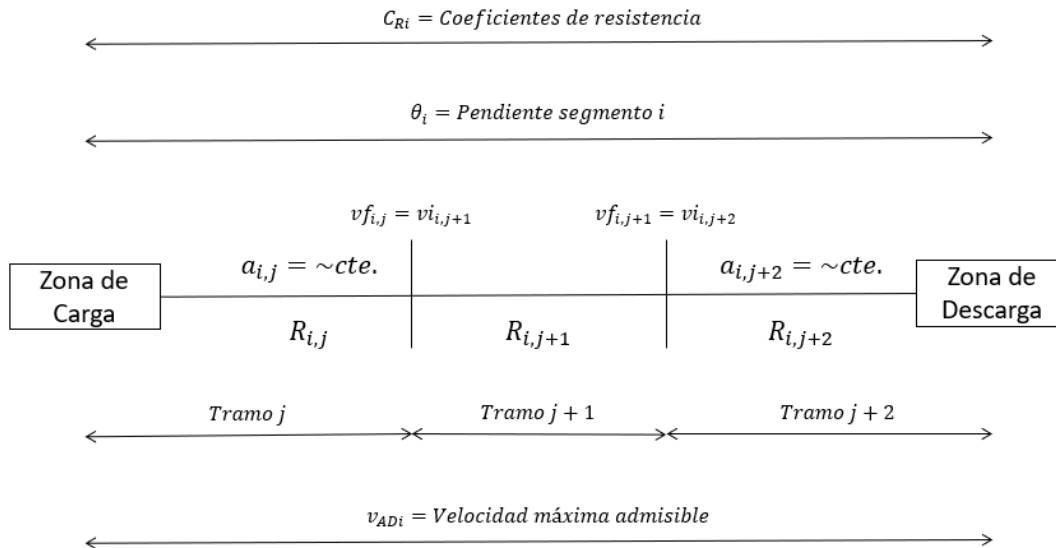


Figura 10. Esquema de la configuración del modelo y sus variables asociadas. Adaptado de Dönicke, (2017b).

El modelo considera el cálculo de la energía necesaria para el movimiento del vehículo y cuantifica el consumo de combustible o electricidad en torno a este valor y las eficiencias asociadas a la transformación energética de los motores y a la transmisión del vehículo.

A partir de lo presentado en la Figura 10, el consumo de combustible se estimará con el uso de la siguiente ecuación (Dönicke, (2017b), Wu et al., (2015), Wang et al., (2018), Hyodo et al., (2013), Gustavsson, (2020)):

$$C_{i,j} = \frac{(m_i \cdot a_{i,j} \cdot v_{i,j} + R_{i,j} \cdot v_{i,j} + C_a \cdot (v_{i,j} - v_{aire})^2) \cdot t_{i,j}}{\eta_t \cdot \eta_m \cdot PCI \cdot \delta} \quad (3)$$

Donde:

$C_{i,j,k}$ = consumo en L o kWh, del segmento i (cargado o descargado) para el tramo j;

m_i = masa del vehículo para el segmento i (cargado o descargado);

$v_{i,j}$ = velocidad del vehículo para el segmento i (cargado o descargado) y tramo j;

$R_{i,j}$ = rimpull del vehículo para el segmento i (cargado o descargado) y tramo j;

C_a = coeficiente aerodinámico del vehículo;

v_{aire} = velocidad del aire en el segmento i;

$t_{i,j}$ = tiempo empleado en el segmento i (cargado o descargado) y tramo j;

$\eta_{t,m}$ = eficiente de transmisión del vehículo (η_t) o del motor (η_m);

PCI = poder calorífico inferior del combustible (para el caso diésel);

δ = densidad del combustible (para el caso diésel).

4. Metodología de trabajo

Conforme al cumplimiento de los objetivos planteados y respondiendo al enfoque evaluativo del estudio, la metodología quedará definida en torno al marco de referencia de la ISO14040, 2006 y a los alcances del sistema a evaluar. La secuencia de este estudio envuelve cuatro puntos principales (Ver Figura 11):

- Planteamiento de caso base: el cual tendrá como función ser el “entorno” de operación simulado de los equipos;
- Elaboración del inventario de ciclo de vida: el cual será diferenciado de acuerdo con los tres alcances definidos, en donde el alcance operacional quedará restringido al límite establecido por la unidad funcional, en este caso, la vida útil de los equipos;
- Modelización del ciclo de vida: el cuál será realizado usando el software Openlca y los propios inventarios elaborados;
- Cálculo de indicadores: el cuál será realizado ocupando la interfaz de Openlca unida a la metodología de caracterización de impactos definida (ReCiPe Midpoint (H)); y, por último,
- Análisis de sensibilidad: que considera el planteamiento de distintitos escenarios energéticos y, por tanto, la elaboración y cálculo de nuevos inventarios e indicadores.

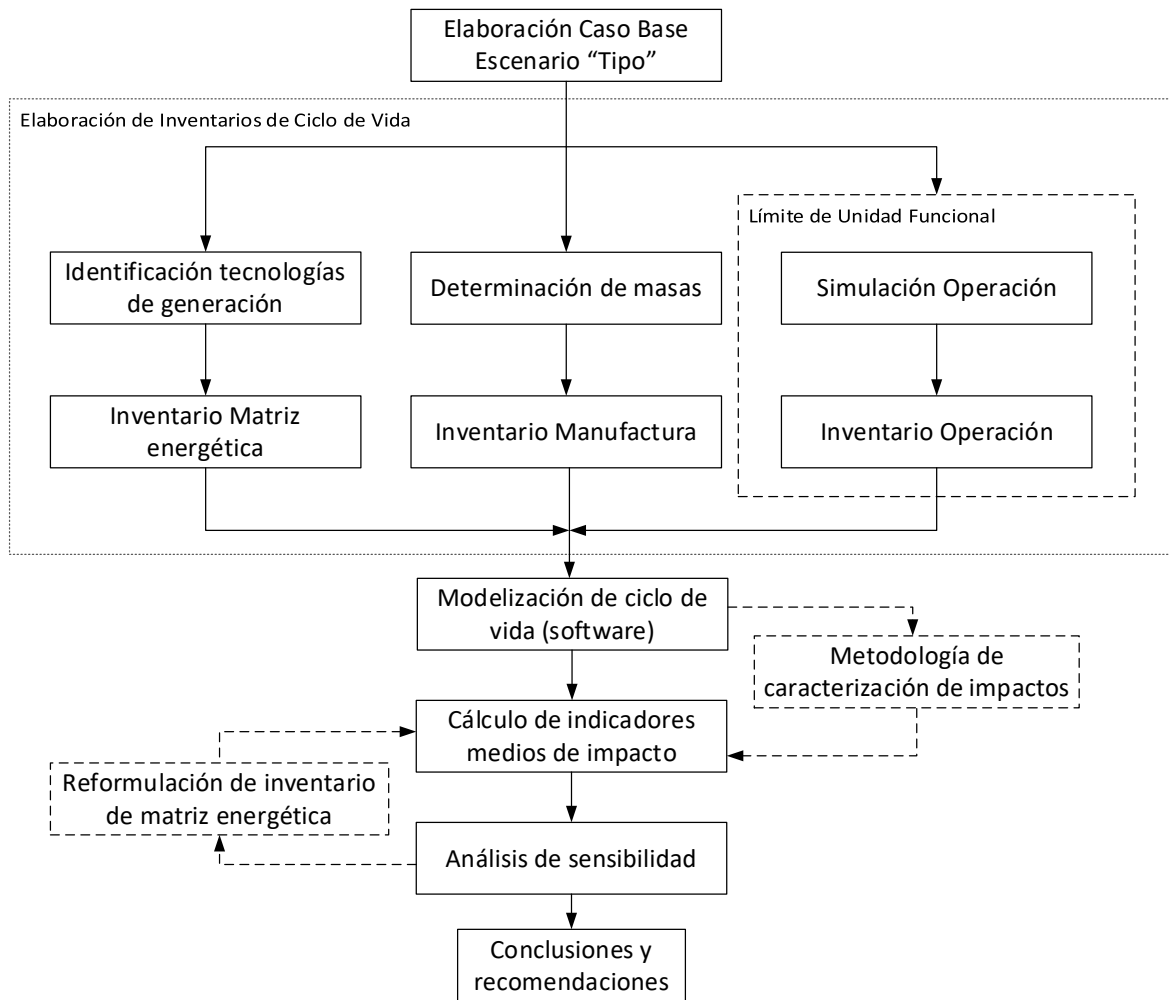


Figura 11. Flowchart de metodología de trabajo a realizar.

4.1. Elaboración y planteamiento de Caso Base

Este escenario “tipo” será elaborado de acuerdo con los siguientes puntos:

1. Se seleccionarán los modelos de los equipos (diésel y eléctrico) a estudiar en base al mercado actual, considerando modelos comparables en base a la capacidad de carga.; y,
2. Se elegirán las variables operacionales y parámetros necesarios del camino (resistencia a la rodadura, pendientes, distancias, entre otros) en donde se simularán ambos equipos. Con esto, se elaborará un modelo teórico abordando las diferentes entradas y salidas del sistema a analizar.

4.2. Elaboración de inventario de ciclo de vida

Los inventarios serán planteados en virtud de la información identificada en distintas bases de datos de ACV (Ver detalles de inventarios en Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”, Anexo D: Inventario Matriz Energética, Anexo E: Inventario Manufactura equipo Diesel y Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico). De cualquier forma, se considerará mantener un mínimo del 95% de información para cada componente, ocupando las bases de datos: Agribalyse, NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability), ELCD (European Life Cycle Database), BioEnergieDat y EF (Environmental Footprints database), las que presentan una gran cantidad de datos con fuentes referenciadas. Es importante mencionar, que los procesos de manufactura de las materias primas y la generación energética pertinente a cada componente, será asumida y/o referenciada en base a estudios realizados por otros autores, por lo que gran parte de esta información será ocupada con una referencia espacial globalizada o sectorizada para ciertos casos particulares (Ver detalles de inventarios en Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”, Anexo D: Inventario Matriz Energética, Anexo E: Inventario Manufactura equipo Diesel y Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico). De la misma forma ocurre con la información desde un aspecto temporal, en donde no toda la información representa un carácter actualizado (2020).

Con esto, entonces, se detectarán las entradas y salidas correspondientes a cada alcance planteado. Estos se abordarán de la siguiente manera:

4.2.1. Inventario de matriz energética

Se considerará una revisión bibliográfica de las distintas fuentes energéticas que alimentan la matriz eléctrica del país, esto con la finalidad de poder establecer una matriz actualizada que dependa de las contribuciones energéticas por tecnología (entiéndase como carbón, solar fotovoltaica, eólica, entre otras). Con respecto al combustible se evaluará el tipo de combustible ocupado por los equipos, y su disponibilidad en bases de datos para poder ser integrado al modelo. Considerando ambos puntos, se estimarán las cantidades necesarias para la generación de 1 [kg] de combustible y 1 [kWh] como unidad básica para su integración al modelo posterior.

4.2.2. Inventario de manufactura

Se contemplarán los modelos de vehículos y aproximaciones en torno a la composición material de los vehículos. Esto se hará con distintos inventarios de ciclo de vida escalables con los que se puede obtener aproximaciones de los materiales constituyentes de las distintas partes de los vehículos, entendiéndose a esto como las cantidades de acero u otro material por los que se encuentran compuestos. Al tener un modelo de masa de las distintas partes, se podrá incurrir en el uso de la ecuación (1), con un factor de actividad igual a la masa del material producido, que se entenderá como la masa del material que componen a cada parte del vehículo.

4.2.3. Inventario de operación minera

Para la estimación de emisiones en la operación de los vehículos, se hace necesario obtener datos de rendimiento y desempeño en faena minera, los cuales se estimarán por medio de la ecuación (3) para el caso eléctrico, respecto al caso diésel, este será abordado en función de información operacional detectada. Esto otorgará la información necesaria referente al combustible consumido a lo largo de la vida útil del vehículo (para el caso diésel) y, del consumo eléctrico asociado a la carga de baterías (para el caso eléctrico).

Es importante considerar que para este inventario se simulará la operación de los vehículos mineros con el uso de la herramienta Matlab bajo el modelo físico de tracción presentado en el apartado 3.3 y una estrategia de despacho basada en el nivel de combustible de los vehículos y el tiempo acumulado total en operación. En esta simulación se contemplará el mantenimiento y el uso de los neumáticos, pudiéndose estimar los recambios de aceite de motor y de los neumáticos, elementos constituyentes también de este inventario. Es importante mencionar que, para este análisis, no se considera la disposición final de los elementos. Además, las emisiones asociadas a la combustión del diésel, serán estimadas en base a lo estipulado en las directrices metodológicas del IPCC 2006 (IPCC, 2006).

4.2.4. Modelización de ciclo de vida

La modelización del ciclo de vida es considerada la parte final de la elaboración de los inventarios debido a que contempla el ingreso de los datos recopilados y estimados al

software. En este se generarán los flujos correspondiente a cada proceso, además de generar los sistemas de productos con los que el software establece los cálculos necesarios para la estimación de emisiones y de categorías de impacto.

Es importante mencionar que en este punto se generan dos modelos distintos para cada vehículo, así mismo, cada parte constituyente de los vehículos, será modelizado como procesos de manufactura, para el caso de la operación, esta será ingresada considerando como inputs los recambios de aceite de motor y de neumáticos, además de las emisiones por concepto de combustión del diésel. Las cantidades de combustible consumido y electricidad consumida, serán consideradas parte del proceso de la matriz energética debido a que estas emisiones nacen de la manufactura/generación de estos combustibles.

4.3. Cálculo de indicadores medios de impacto ambiental

Los cálculos de indicadores medios (Midpoint) de impacto ambiental fueron llevados a cabo con el uso de la herramienta OpenLCA. Esta herramienta se encarga de modelizar los procesos con sus respectivas entradas/salidas para estimar las emisiones asociadas. El cálculo de emisiones lo realiza con el uso de las bases de datos suministradas por el usuario, a partir de estas y las estimaciones de emisiones, entrega distintos resultados dentro de los cuales se destacan el análisis de impacto ambiental, el cuál considera la aplicación de los factores de emisión asociados a la metodología de caracterización (Ver Anexo A: Metodología ReCiPe Midpoint (H)).

4.4. Análisis de sensibilidad

Se realizará el análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos para el ciclo de vida del vehículo eléctrico frente a cambios en la contribución energética para la generación eléctrica. Para esto, se generarán distintos escenarios con matrices energéticas variables en cuanto a la tecnología de generación (matriz 100% solar, matriz 100% eólica, entre otros), lo cual permitirá recalcular cada categoría de impacto y poder comparar los resultados obtenidos en dichos escenarios frente al escenario actual (2020).

5. Desarrollo del estudio

5.1. Planteamiento de caso base – Escenario “Tipo”

El régimen de operación de los equipos a estudiar, se plantea en función de la información disponible de libre acceso de la División El Teniente, reconocida por ser la mina subterránea más grande de Chile. En este sentido, se plantea el escenario “tipo” en base a una producción por Block Caving, con un régimen de 35 000 [tpd] determinado por medio de la literatura (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Producciones para División El Teniente identificadas.

Faena	Valor	Unidad	Fuente	Nota
PNNM - Teniente	56000.00	tpd	Acevedo Céspedes, (2017); Guerrero González, (2017)	Ramp Up
PNNM - Teniente	137.00	ktpd	Acevedo Céspedes, (2017)	Régimen
Pacífico Superior- Teniente	15000.00	tpd	Orellana Oporto, (2019)	Sin información
Diablo Regimiento - Teniente	21000.00	tpd	Valenzuela Núñez, (2017)	Entre los años 2017-2019
Diablo Regimiento - Teniente	28532.00	tpd	Valenzuela Núñez, (2017)	Para el año 2015
Diablo Regimiento - Teniente	2981.00	tpd	Valenzuela Núñez, (2017)	Año 2024

De esta misma forma, se establecen los parámetros principales en torno a las características inherentes al material y al camino por el cual se desplazarán los camiones estudiados (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Características del material y el camino usados como caso base en el estudio.

Característica Material	Valor	Unidad	Fuentes
Densidad	2.65	ton/m ³	Adaptado de: Sáez Garrido, (2019); Orellana Oporto, (2019)
Espojamiento	30.00	%	Sáez Garrido, (2019)
Densidad aparente	1.86	ton/m ³	Cálculo Propio
Resistencia a la rodadura	3	%	Adaptado de: Sáez Garrido, (2019); Guerrero González, (2017); Acevedo Céspedes, (2017)
Resistencia a la fricción	0.65 (seco) - 0.3 (húmedo)	-	Adaptado de: Acevedo Céspedes, (2017)
Distancia promedio de transporte	565.13	m	Acevedo Céspedes, (2017); Guerrero González, (2017); Uribe Neira, (2014)
Distancia - sin carga / con carga	616.50 / 513.75	m	Acevedo Céspedes, (2017); Guerrero González, (2017); Uribe Neira, (2014)
Pendiente	0.50	%	Asumido, verificado con expertos.
Distancia zona recarga / swap	180.00	m	Valor asumido.
Distancia mantenimiento – Ida / Vuelta	258.30 / 298.60	m	Valor asumido.

Es importante mencionar que estos valores fueron ocupados en función de estimaciones realizadas a partir de varios estudios realizados a distintas faenas mineras subterráneas que utilizan camiones de bajo perfil y no necesariamente corresponde a mina El Teniente.

En la operación mina, existen distintas pérdidas o tiempos en los cuales la maquinaria no está operando (o produciendo) debido a demoras que van desde los propios cambios de turno, hasta las horas de colación que tienen los operadores. Estos tiempos fueron detectados y estimados para la elaboración del caso base con la finalidad de obtener un estudio de operación más exacto (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Distribución de tiempos y disponibilidades mecánicas estimadas para la operación mina. Adaptado de Acevedo Céspedes, (2017).

Distribución Jornada	Valor	Unidad
Turnos	2	turnos/día
Tiempo	12	h/turno
Pérdidas/Demoras/Reservas		
Inicio de Turno	51.75	min/turno
Fin Turno	41.25	min/turno
Chequeo Equipo	6.00	min/turno
Colación	72.00	min/turno
Limpieza Área	6.00	min/turno
Pausa Compensatoria	24.00	min/turno
Chequeo Calle	6.00	min/turno
Otras	6.00	min/turno
Total	219.00	min/turno
	501.00	min/turno
Tiempo Operativo	1002.00	min/día
	16.70	h/día

Por otro lado, el conocer el escenario actual ofrecido por el mercado da cuenta de los potenciales equipos a considerar dentro del escenario “tipo”. Dentro de la detección realizada, se encontró un número acotado de equipos eléctricos (Ver Tabla 7), siendo los proveedores principales Epiroc, Artisan y Fermel. Es importante mencionar que Artisan figura como una parte del Grupo Sandvik, pero para efectos del presente estudio, se trataran por separado de acuerdo con los medios digitales (páginas web diferidas).

Tabla 7. Modelos de equipos eléctricos ofrecidos por los principales proveedores del mercado.

OEM ¹	Modelos	Capacidad [ton]	Capacidad Tolva [m ³]	Potencia de motor/es ² [kW]	Capacidad Batería [kWh]
Epiroc	MT2010	20	7.1	230 / 301	165
	MT42	42	15	200 (x2) / 160	S/I ³
Fermel	E-Hauler	25	S/I ³	S/I ³	S/I ³
Artisan	Z50	50	22.7	980 / 125	354 / 22

¹ Original Equipment Manufacturer (Fabricante de equipo original).

² Nominación (x#) da cuenta del número de motores, mientras que / da cuenta de la potencia del motor auxiliar.

³ Sin Información

Los camiones bajo perfil diésel ofrecidos por “Sandvik” (considerado como el mayor oferente de camiones de bajo perfil) presentan capacidades de 7 a 80 [ton], con volúmenes de tolva de 3.5 a 37 [m³] (Ver Tabla 32, Anexo B: Antecedentes).

Desde un punto de vista de la planificación minera, se compararon los equipos con una similar capacidad de transporte (Ver Tabla 8), pero con diferente fuente de impulsión, para así no afectar la planificación y considerar sólo la diferencia en torno al motor.

Tabla 8. Modelos de camiones de bajo perfil con capacidad equivalente en el par Diésel-Eléctrico.

OEM	Modelos	Impulsión	Capacidad [ton]	Capacidad Tolva [m ³]	Potencia motor/es [kW]	Capacidad Batería [kWh]
Artisan	Z50	Eléctrica	50	22.7	980 / 125	354 / 22
Epiroc	MT5020	Diésel	50	18.5	485	-
Sandvik	TH550	Diésel	50	20	450	-
Epiroc	MT2010	Eléctrica	20	7.1	230 / 301	165
	MT2010	Diésel	20	7.1	224	-
Sandvik	TH320	Diésel	20	10.5	240	-
Fambition	FT20	Diésel	20	10	224	-
Epiroc	MT42	Eléctrica	42	15	200 (x2) / 160	S/I
	MT42	Diésel	42	15	399	-

El principal percance frente a la elección de los equipos a estudiar es el acceso que se puede tener a información interna de los proveedores (fuente primaria) de acuerdo con la manufactura de los equipos. Debido a esto la información debe ser detectada y recopilada

desde fuentes secundarias, entendiéndose a estas como reportes, informes, estudios e investigaciones.

Lo anterior, limita la elección de los equipos y por tanto los datos que se pueden obtener para poder generar los inventarios pertinentes. Considerando esto, y en virtud de la información a la que se puede acceder, el espectro de modelos a elección se ve limitado, siendo entonces los vehículos base a evaluar, los modelos Z50 de Artisan y TH550 de Sandvik. Es importante mencionar que estos camiones se usan sólo como referencia para poder obtener información de las partes de los dos camiones a evaluar.

De acuerdo con el planteamiento general de la problemática a estudiar, es importante definir también la matriz energética que alimentará a los equipos, entendiéndose a esto, como la fuente de energía que los impulsará (electricidad o combustible). Por lo tanto, se considerará que la energía consumida por el vehículo eléctrico a batería, para el caso del presente estudio, será suministrada por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), y, con respecto al combustible que ocupará el equipo convencional diésel, este será definido como petróleo diésel grado B (Ver justificación en apartado 5.2.1).

5.2. Elaboración de Inventarios de Ciclo de Vida de los vehículos en Minería

Los inventarios se enfocarán en las 3 áreas de análisis del ciclo de vida de los vehículos (Ver Figura 4, apartado 2.3). La elaboración, análisis y las fuentes de datos ocupadas serán especificadas en cada apartado correspondiente.

5.2.1. Inventario por matriz energética

Las emisiones por concepto de consumo eléctrico asociado a la recarga de la batería del vehículo eléctrico, están sujetas a las tecnologías de generación asociadas a dicha carga, por tanto, existen emisiones inherentes las cuales formulan el presente inventario (Ver Tabla 9).

Tabla 9. Aporte a la generación eléctrica anual por tecnología para el periodo 2020. Extraído de Comisión Nacional de Energía, (2020).

Tecnología	Aporte al suministro anual [%]
Carbón	35.05
Gas Natural ¹	17.63
Hidráulica Pasada ²	14.45
Hidráulica Embalse	12.11
Solar Fotovoltaica	9.80
Eólica	7.10
Biomasa	2.42
Geotérmica	0.32
Cogeneración	0.24
Fuel Oil ³	0.89

De acuerdo con lo anterior, el inventario se estima por medio del uso de estos factores porcentuales, los cuales aportan a la generación de 1 [kWh] desde el SEN para el año 2020. De acuerdo con esto, y por medio del uso del software OpenLCA, el proceso de generación eléctrica queda modelado como se muestra a continuación (Ver detalle en Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”):

¹ Se considera que las emisiones asociadas son en base a la quema de gas natural, sea en su forma gaseosa o líquida (GNL) por lo que se consideran juntas. Esto responde a la falta de información de emisiones asociadas a los procesos de producción de GNL para su próximo análisis de impacto ambiental.

² Se considera la suma de los aportes energéticos para hidráulica de pasada de toda envergadura (Hidráulica y Minihidráulica).

³ Se considera en este apartado la suma de los aportes energéticos de las tecnologías en base a petróleo diésel y fuel oil.

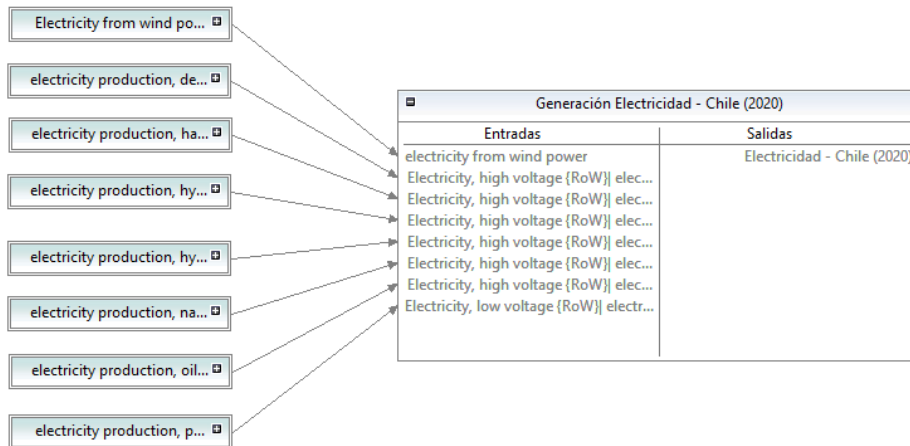


Figura 12. Proceso de generación eléctrica para Chile - 2020 modelado en software OpenLCA.

Es importante mencionar que existirán errores asociados a la modelación de los flujos por causa de los datos disponibles, en este sentido, se tomaron las siguientes consideraciones:

- La generación eléctrica en base a gas natural considera al gas licuado natural (GNL), de donde se debe tener presente, que a pesar de que el proceso de generación sigue siendo en base a gas natural, el gas licuado contiene en su línea de procesamiento la licuefacción del gas natural (y los procesos inherentes a este), proceso que no fue considerado;
- Para la generación solar se asumió que se utilizaba como fuente energética a los paneles fotovoltaicos, que, en vista de los datos disponibles, se modeló en base a un sistema fotovoltaico de 570 kWp con una generación de bajo voltaje (<1kV) (Wernet et al., 2016);
- De manera similar al punto anterior, se asumió que la generación eléctrica en base a las tecnologías eólicas se realiza en función de una planta eólica con vida útil de 20 años con una producción anual promedio de 4700 MWh (Wernet et al., 2016);
- El flujo que considera la generación eléctrica en base a carbón, considera una planta de tratamiento promedio de “hard coal”, la cual considera a la antracita, carbón coque, y otros carbones bituminosos (Wernet et al., 2016).

Con respecto al combustible de los camiones diésel, es importante considerar el tipo de diésel a ocupar y su composición. La selección se realiza en función de los requerimientos del

equipo, por lo que se hace el cruce con los principales combustibles ofrecidos por el mercado actual (Ver Tabla 10). Es importante considerar que, para materia del presente estudio, se considerará el uso de petróleo diésel ultra bajo en sulfuro, composición similar a la del diésel grado B, el cual presenta más información y presencia en bases de datos enfocadas en estudios ACV.

Tabla 10. Comparación diésel requerido versus diésel ofrecido por el mercado y su composición.

Requerimiento Equipo				Diésel Mercado ³		
Clasificación General de combustibles	Estándar ASTM ⁴	Núm. 1 ASTM 1-D ¹	Núm. 2 ASTM 2-D ⁵	Estándar ASTM ⁶	Diesel Grado B-1 ⁷	Diesel Grado B-2 ³
Gravedad, °API # 16°C / 60°F	D 287	40 - 44	33 - 37	D 1298 o D 4052	35.8	-
Punto de inflamación (°F / °C, mín.)	D93	100 / 38	130 / 54	D 93 o D 3828	58	52
Viscosidad, cinemática (cSt a 100 °F / 40 °C)	D 445	1.3 - 2.4	2.0 - 3.2	D 445	3.161	1.9 - 4.1
(¹) Punto de enturbiamiento # (²) Punto de escurrimiento	(¹) D 2500	(¹) 10°F (6°C) máx.	(¹) 30°F (-1,1°C) máx.	(²) D 97 o D 5949 o D 5950 o D6892	(²) -9	(²) -1
Contenido de azufre (% peso, máx.)	D 129	0.5	0.5	D 7039 o D 5453	0.00091 ⁸	0.005
Residuos de carbono (al 10%, % peso, máx.)	D 524	0.15	0.35	D 4530 o D 524	0.07 (Rmasbottom)	0.21 (Rmasbottom) 0.21 (Micrométodo)
Cenizas (% peso, máx.)	D 482	0.01	0.01	D 482	0.01	0.01
Número de cetano, mín.+	D 613	45	42-50	D 613 o D 976 o D 7170	50.8	40
Temperatura de destilación (°F / °C) IBP, n° típico # 10% n° típico # 50% n° típico # 90% # Punto final #	D 86	350 / 177 385 / 196 425 / 218 500 / 260 Máx. 550 / 288 Máx.	340/400 400/460 470/540 550/610 580/660	D 86 o D7345	(90%) -/340.9	(90%) 282/351
Agua y sedimento (% v/v, máx.)	D 1796	0.05	0.05	D 2709	0.005	0.05

⁴ Technical Specification Atlas Copco MT2010

⁵ Technical Specification Atlas Copco MT5020

⁶ ENAP

⁷ Certificado de Calidad 25 Septiembre Diesel Grado B-1

⁸ [Diésel de Categoría Ultra Bajo en Sulfuro \(Ultra Low Sulfur Diesel -ULSD\) por la EPA](#)

Núm. no especificado en ASTM D 975

+ Difiere de ASTM D 975

Por medio del uso del software OpenLCA y considerando la información recopilada, el proceso de generación de 1 kg de combustible diésel bajo en sulfuros se presenta a continuación (Ver detalle en Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”):

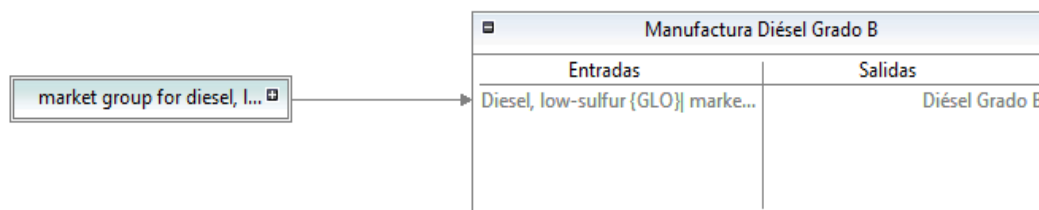


Figura 13. Proceso de producción de combustible diésel bajo en sulfuro modelado en software OpenLCA.

Es importante mencionar, que las cantidades ocupadas para la generación eléctrica y la manufactura del combustible se expresan en su unidad fundamental (1 kWh y 1 kg, respectivamente). Los totales ocupados de cada combustible son estimados y presentados en el punto 5.2.3.

5.2.2. Inventario emisiones por manufactura de los equipos

El inventario fue construido considerando la generalización de los componentes de los vehículos en macro agrupaciones para simplificar la detección de la información relevante en torno a la composición material de cada uno de estos artefactos (Ver Figura 14). En este sentido, los equipos se generalizaron en 3 componentes principales (Wolff et al., 2020):

1. Partes Generales: correspondientes a las componentes inherentes de los equipos, siendo estas identificadas como la cabina del piloto, el chasis estructural del equipo, las llantas y neumáticos, la suspensión y la tolva del equipo;
2. Tren de potencia: siendo el punto diferenciador entre una impulsión convencional diésel o eléctrica, contemplando como parte principal el motor de combustión interna o motor eléctrico según corresponda;
3. Combustible: Siendo este el diésel para una impulsión convencional o la batería para el caso eléctrico.

Es importante considerar que el inventario por concepto de manufactura no considera la energía asociada al ensamble de las partes del vehículo ni el transporte de cada una de las partes hasta el lugar de ensamble y utilización. De esta misma forma, y tal y como se mencionó antes, esta división realizada al vehículo evita indagar en partes particulares que pudiesen alterar el inventario, esto quiere decir, que componentes como mangueras, líquidos refrigerantes, o cualquier otro implemento particular que no sea especificado y/o considerado en este inventario fue agregado a la masa total del chasis.

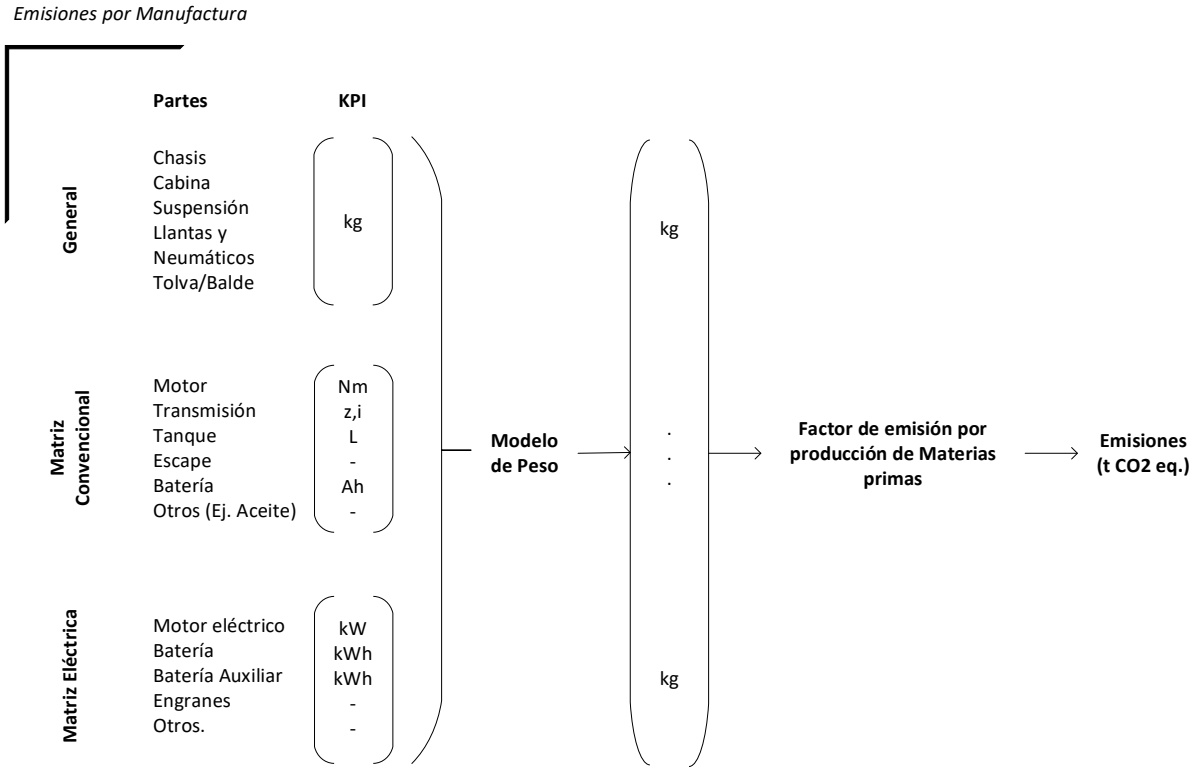


Figura 14. Diagrama general para inventario de emisiones por Manufactura de los vehículos. Adaptado de Wolff et al., 2020.

Es importante recalcar que, debido a la escasa información publicada en torno a los equipos específicos estudiados, se procedió a utilizar distintas herramientas para estimar los pesos aproximados de cada componente y de su composición material unitaria. Estos métodos se distribuyen de la siguiente manera:

1. Escalamiento: realizado principalmente (pero no exclusivo) a partir de datos de composición material estudiados en el modelo GREET 2.7 (Burnham et al., 2006) y del inventario escalable para la aplicación en vehículos pesados (Wolff et al., 2020);
2. Semejanza: seleccionando un modelo con capacidad similar, al cual se tuviera el acceso a la información requerida, principalmente el modelo Atlas Copco MT5020, el cual presentaba basta información en distintas plataformas digitales;
3. Estimación: realizada a partir de la diferencia de masa entre los componentes que se pudieron identificar y escalar, y la masa total reportada por parte de los proveedores (por medio de las especificaciones técnicas de los equipos).

5.2.2.1. Manufactura de los equipos convencionales diésel

Actualmente la impulsión convencional se realiza por medio de motores de combustión interna (Internal Combustion Engines – ICE) que utilizan al diésel como combustible principal, esto debido al bajo consumo generado a velocidades bajas y altos torques (Reinhart, 2015). Estos motores se caracterizan por tener un tren de poder basado en una fuente de energía química (combustible) la cuál es transformada a energía mecánica (en el motor) y que es transmitida hasta cada uno de los ejes por medio de engranajes, cardanes y/o transmisiones (Ver Figura 15).

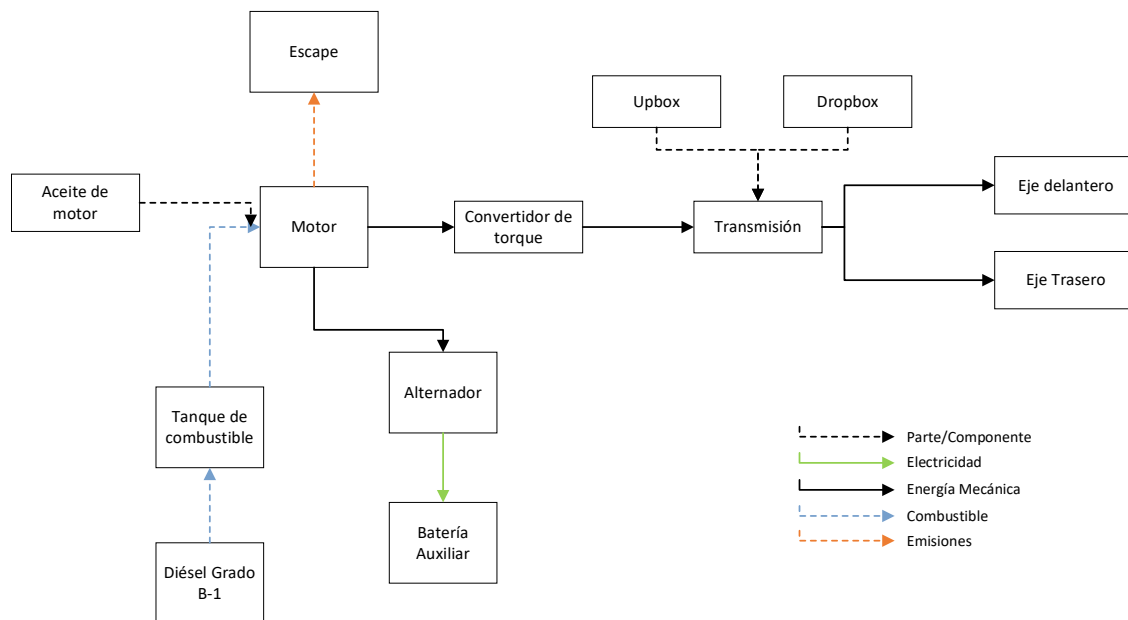


Figura 15. Diagrama de tren de poder convencional diésel estudiado.

A partir de lo presentado en la Figura 15, se identificaron los componentes principales de la maquinaria de interés y se establecieron los pesos unitarios de estos a modo de poder obtener la composición material de cada uno. Esta información se encuentra presentada en la siguiente tabla (Ver detalles en Anexo D: Inventario Matriz Energética):

Tabla 11. Masa de cada componentes estimados para el camión convencional Diesel en base al camión Sandvik TH550.

Componentes	Peso [kg]	Cantidad	Peso total [kg]
Peso Total Máquina ⁹	35900.00	1	35900.00
Partes Generales	Cabina	1	1584.96
	Neumáticos ¹⁰	4	2600.00
	Suspensión	1	1158.40
	Tolva ¹¹	1	3284.78
	Chasis	1	13900.87
	Cilindro de basculación	2	818.00
	Cilindro de suspensión	2	172.00
	Cilindro de dirección	2	276.00
	Aceite hidráulico ¹²	225	200.25
Tren de Potencia	Motor ¹³	1	1600.00
	Upbox	1	276.00
	Dropbox	1	530.00
	Ejes ¹⁴	2	5792.00
	Transmisión ¹⁵	1	1327.00
	Tanque de combustible ¹⁶	1	260.46
	Escape	1	979.12
	Convertidor ¹⁷	1	382.00
	Aceite de motor ¹⁸	53	46.38
	Alternador ¹⁹	2	30.00
Batería Auxiliar ²⁰ 6	2	91.00	

⁹ Peso con tanque lleno 100% , fluidos y todos los componentes de la maquinaria;

¹⁰ Neumáticos modelo 29.5R25 E4;

¹¹ Peso estimado para tolva SAE struck 18.5 m³;

¹² Tanque de almacenamiento de 225 Lts. Aceite API GL4 SAE 10W-30, basado en Atlas Copco MT5020;

¹³ Motor VOLVO AD1661VE 450kW (603 hp) / 1800 rpm, Tier 4i;

¹⁴ Basado en ejes Kessler 106 presentes en camión bajo perfil Atlas Copco MT5020;

¹⁵ Transmisión marca Dana series 8000;

¹⁶ Tanque con capacidad de 700 Lts.;

¹⁷ Convertidor marca Dana series C9000;

¹⁸ Tanque de almacenamiento de 53 Lts. Aceite API C14 SAE 15W-40, basado en Atlas Copco MT5020;

¹⁹ Basado en alternador de 28 V /140 Ah;

²⁰ Batería Volvo 12V/160 Ah.

Para poder validar los datos, se contactó a especialistas mecánicos del área, se verificaron los valores entregados con los catálogos publicados y se compararon resultados con estudios previamente realizados. Los valores en torno a la composición porcentual del equipo fueron calculados, obteniéndose los resultados resumidos presentados en la Tabla 12. Es importante mencionar que para el equipo diésel se identificaron 38 materiales diferentes.

Tabla 12. *Composición material obtenida para el equipo convencional diésel.*

	Masa [kg]	Composición [%]
Acero	27493.76	78.35%
Aluminio	2976.37	8.48%
Caucho Natural	1066.00	3.04%
Hierro	1017.60	2.90%
Acero Carbono	747.28	2.13%
Acero Cromo-Molibdeno (18/8)	572.00	1.63%
Carbono Negro	464.60	1.32%
Caucho Sintético	157.45	0.45%
Otros	596.04	1.70%

Es importante considerar que a partir de la composición material de cada componente del equipo estudiado se recurrirá a distintas bases de datos publicadas y de libre acceso para poder obtener los procesos unitarios de obtención de cada material, es decir, por ejemplo, se procederá a evaluar los procesos y las emisiones incurridas en la producción de una unidad de masa de acero u otro material. Nuevamente, el proceso de manufactura fue modelado en el software OpenLCA, el inventario ocupado, es presentado en Anexo D: Inventario Matriz Energética. A continuación, se presenta el diagrama producto general del proceso de manufactura. Hay que considerar que, para una mejor visualización, no se presentan los procesos desagregados.

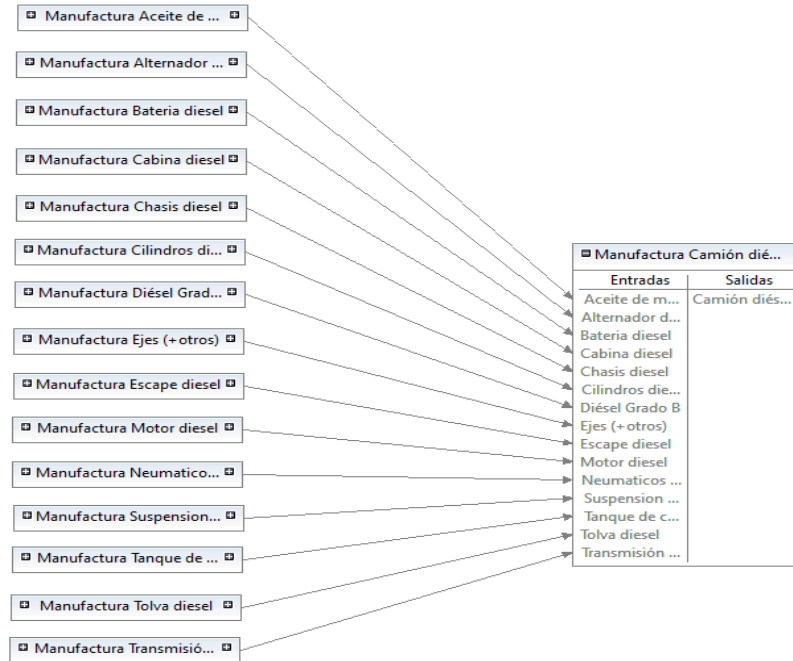


Figura 16. Proceso de manufactura del equipo diésel modelado en software OpenLCA.

5.2.2.2. Manufactura de los equipos eléctricos impulsados por batería

A diferencia del tren de poder de un equipo diésel, los equipos eléctricos impulsados por batería basan su funcionamiento en el uso de una batería de alta densidad energética la cuál actúa como fuente eléctrica. Esta energía es suministrada al motor eléctrico posterior a su paso por un inversor (DC/AC) generando energía mecánica que se traspa directamente (o por medio de un gearbox) a los ejes del vehículo. En este sentido, son variadas las combinaciones en el mercado en torno al uso de los motores eléctricos en el tren motriz, abarcando desde el uso de un motor por rueda, hasta un motor unitario que impulse toda la maquinaria. Para el presente estudio, y en función de la información detectada por medio de patentes asociadas al proveedor Artisan, se considera el uso de 4 motores, uno en cada rueda. De igual forma, se presenta en la Figura 17 un diagrama general del funcionamiento de un tren motriz eléctrico.

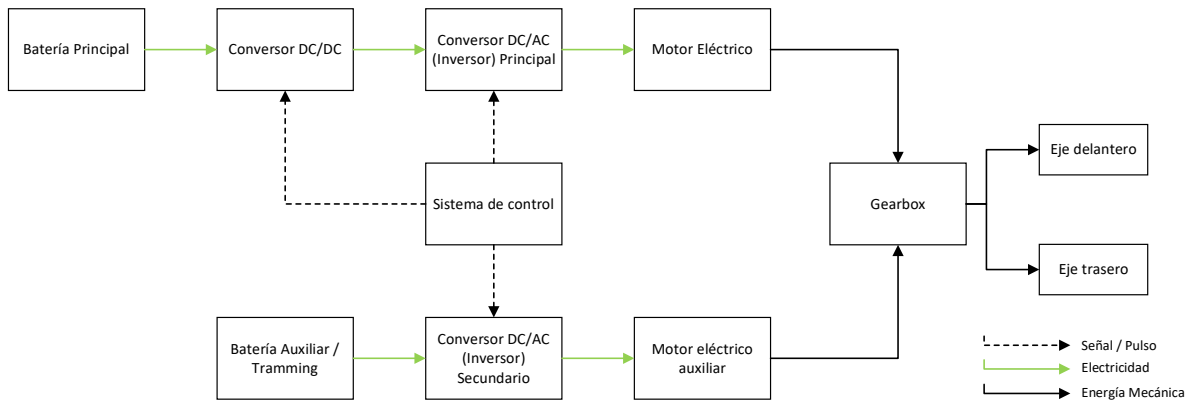


Figura 17. Diagrama de tren de poder convencional eléctrico.

Para este caso, los componentes generales del modelo de masa son similares al anterior vehículo, pero se adecuaron los componentes necesarios (por ejemplo, el tipo de neumático y motor) en función de la información detectada a partir de las especificaciones técnicas entregadas por los proveedores.

Para evaluar las partes de un tren motriz eléctrico para vehículos de alto tonelaje fuera de carretera, se procedió a realizar una búsqueda de las patentes de asociadas. En este sentido, el inventario se realizó alineado con la Figura 18, la cual representa la configuración de un modelo de camión bajo perfil del proveedor Artisan con cuatro motores (184, 186, 182 y 180) con transmisión directa a sus neumáticos. De esta misma forma se pudo observar la presencia de una batería principal (módulo 104, unión de 200 y 202) y una batería auxiliar (105).

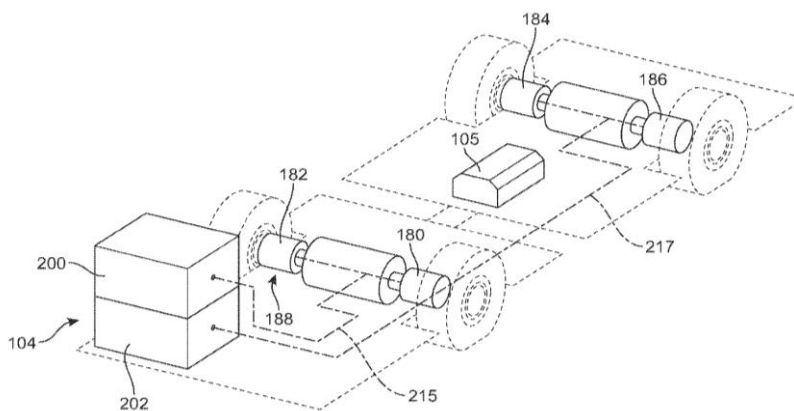


Figura 18. Configuración de motores eléctricos considerado para el presente estudio. Extraído de Hickey & Dickson, (2021).

Con lo anterior, se procede a escalar, calcular y detectar la masa asociada a cada componente del vehículo eléctrico (Ver detalles Anexo E: Inventario Manufactura equipo Diesel):

Tabla 13. Masa de cada componentes estimados para el camión eléctrico en base al camión Artisan Z50.

Descripción		Peso [kg]	Cantidad	Masa total [kg]
Peso Total Máquina		48148.00	1	48148.00
Partes Generales	Cabina	2125.69	1	2125.69
	Neumáticos ²¹	697.00	4	2788.00
	Suspensión	1158.40	1	1158.40
	Tolva ²²	3284.78	1	3284.78
	Chasis ²³	20860.28	1	20860.28
	Cilindro de basculación	409.00	2	818.00
	Cilindro de suspensión	86.00	2	172.00
	Cilindro de dirección	138.00	2	276.00
	Aceite hidráulico ²⁴	0.89	225	200.25
Tren de Potencia	Eje ²⁵	2896.00	2	5792.00
	Batería Auxiliar ²⁶	277.00	1	277.00
	Batería principal ²⁷	8255.00	1	8255.00
	Motor Tracción eléctrico ²⁸	340.00	4	1360.00
	Motor Auxiliar ²⁹	81.00	1	81.00
	Inversor DC/AC Motor auxiliar ³⁰	16.00	1	16.00
	Inversor DC/AC Motores principales ³¹	16.00	4	64.00
	Convertor DC/DC ³²	5.00	1	5.00
	Gearbox ³³	305.10	2	610.20
	Sistema de control ³⁴	1.10	4	4.40

²¹ Neumáticos tipo 875/65R29.

²² SAE struck 22.7 m³.

²³ Acero de baja aleación de alta resistencia (High-strength Low Alloy - HSLA).

²⁴ 225 litros de aceite API GL-4 SAE 10W-30.

²⁵ Diseño de transmisión directa del motor a la rueda con extremos de rueda DANA / Basado en Kessler 106 - 125t de cargas dinámicas por eje.

²⁶ Batería LiFePO₄ 22 kWh / 72 Ah.

²⁷ Pack de baterías LiFePO₄ 354 kWh / 576 Ah / 614 V_{dc}.

²⁸ Peak Combinado/ Continuo ,1432/980 kW (Torque 8400/6400 Nm) Motor eléctrico sin escobillas refrigerado por líquido. Se asumirá un motor de imán permanente sincrónico considerando un suministro de 600V_{dc}.

²⁹ Se asume motor TM4 SUMO LD HV800, acorde a los requerimientos del vehículo 125 kW - 700/400 Nm.

³⁰ Se asume inversor DANA CO150HV, compatible con motor auxiliar.

³¹ Uno por cada rueda, se asume inversores DANA CO150HV, compatibles con motores principales.

³² Uno para operaciones auxiliares. El voltaje de suministro de las baterías considera el suministro directo para los motores.

³³ Se asume un gearbox por eje.

³⁴ Un controlador por cada motor e inversor.

A partir de los datos presentados en la Tabla 13, se estimó la composición material de cada componente en base a modelos, inventarios y base de datos publicadas. De esto, se presenta el siguiente resumen:

Tabla 14. Composición porcentual por material para el equipo eléctrico.

Material	Masa [kg]	Composición porcentual [%]
Acero	33595.89	69.78%
Aluminio	5516.08	11.46%
Caucho Natural	1143.08	2.37%
Cobre	1027.71	2.13%
LiFePO ₄	1014.13	2.11%
Acero cromo molibdeno (18/8)	726.19	1.51%
Carbón negro	671.31	1.39%
Plástico	564.50	1.17%
Grafito	492.58	1.02%
Otros*	3396.55	7.05%

La mayor parte de materiales se encuentra en la categoría otros, representando 107 materiales distintos. Al igual que el resultado obtenido para el equipo diésel, la composición porcentual predominante corresponde al acero.

A continuación, se presenta el diagrama producto general elaborado en el software OpenLCA. Es importante mencionar, que nuevamente, se presentan los procesos generales y no de manera desagregada para una mayor facilidad de visualización.

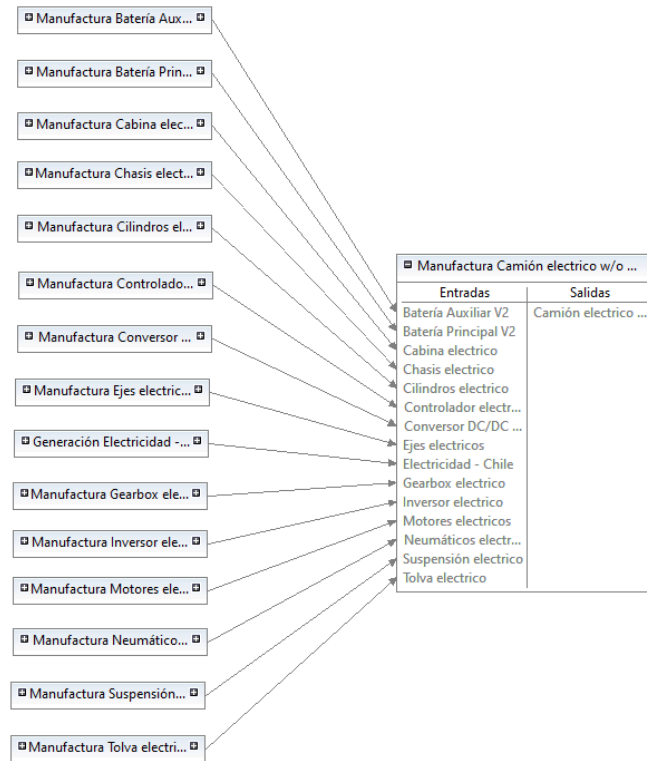


Figura 19. Proceso de manufactura del equipo eléctrico modelado en software OpenLCA.

5.2.3. Inventario de emisiones por operación minera

El inventario de operación fue elaborado en función del caso base planteado (Ver capítulo 5.1) y los parámetros técnicos de cada vehículo (Ver Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico). Los datos fueron ingresados a la plataforma Matlab con la finalidad de simular la operación mina (Ver Figura 20). Es importante mencionar que esta simulación no consideró la interacción con otros factores internos (interacción entre calles, demoras no programadas, entre otros), ni otras entidades (teoría de colas). Aun así, se consideró una programación considerando los viajes a recargar combustible o al recambio de batería, además de las mantenciones programadas en función del tiempo efectivo de operación del equipo. Para el caso eléctrico, estudios realizados por Jacobs et al., (2013) evidenciaron aproximadamente un 5% menos de tiempo en materia de mantenimientos programados para los vehículos eléctricos, por lo que este valor fue considerado dentro de esta simulación.

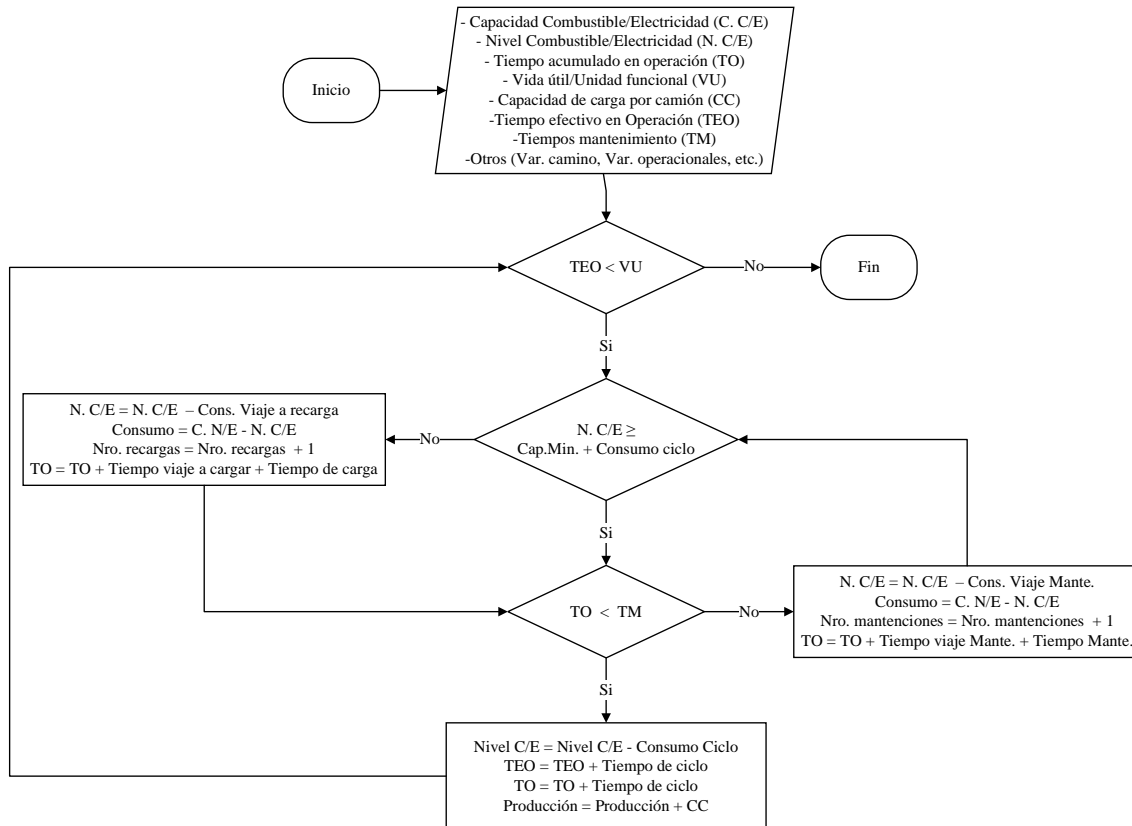


Figura 20. Lógica simplificada ocupada dentro del algoritmo en Matlab.

Un punto importante a mencionar es que dentro de las simulaciones realizadas para el caso diésel, se consideró que, al frenar, la acción de estos no es suficiente para disminuir la función del motor y por tanto se genera una condición de desaceleración sin fuerza de tracción aplicada desde el motor, entrando este en un estado de ralentí (Kim & Wallington, 2016). Este estado de ralentí es estimado en base a la cilindrada del motor y a estudios realizados por Esfahanian & Meech, (2013) (Ver Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico).

Se realizaron 10 simulaciones para cada vehículo (Ver Tabla 15 y Tabla 16), de donde los resultados más pertinentes son el consumo (eléctrico y de combustible, según sea el caso), el número de recambio de neumáticos, y para el caso diésel, el número de mantenencias cada 250 horas efectivas de operación, mantención en donde se realiza cambio de aceite del motor.

Las simulaciones fueron realizadas hasta cumplirse 21 500 horas efectivas de operación de los equipos, parámetro correspondiente a la vida útil de los equipos, alineado a la unidad fundamental del análisis de ciclo de vida.

De igual forma, el consumo promedio ocupado en simulación para el caso del vehículo diésel es de 60 litros por hora efectiva (información provista por especialistas del área de Codelco división El Teniente). Con esto se estimó el consumo en operación del vehículo diésel, ajustándolo de acuerdo con la necesidad de mantenciones y recargas del caso base en particular.

Tabla 15. Resultados de simulaciones para la operación del vehículo diésel.

Parámetros resultado	Promedio	Varianza	Desviación
Ciclos [-]	216793.60	1726.64	41.55
Tiempo simulación [h]	21500.04	0.00	0.02
Horas efectivas [h]	21500.00	0.00	0.00
Producción Total [ton]	7394829.70	2008932.00	1417.37
Nro. Mantenciones cada 125 h [-]	86.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 250 h [-]	43.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 500 h [-]	22.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 1000 h [-]	11.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 2000 h [-]	10.00	0.00	0.00
Cambio de neumáticos [-]	4.00	0.00	0.00
Tiempo Ciclo [h]	0.10	0.0003	0.02
Recargas de combustible [-]	1549.00	0.00	0.00
Consumo total de combustible [L]	1080345.18	2933.58	54.16
Distancia recorrida [km]	245405.57	2205722.28	46.97

Tabla 16. Resultados de simulaciones para la operación del vehículo eléctrico.

Parámetros resultado	Promedio	Varianza	Desviación
Ciclos [-]	203362.10	908.09	30.13
Tiempo simulación [h]	21500.05	0.00	0.03
Horas efectivas [h]	21500.00	0.00	0.00
Producción Total [ton]	7922987.42	1378373.10	1174.04
Nro. Mantenciones cada 125 h [-]	86.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 250 h [-]	43.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 500 h [-]	22.00	0.00	0.00
Nro. Mantenciones cada 1000 h [-]	13.00	16.00	4.00
Nro. Mantenciones cada 2000 h [-]	8.00	16.00	4.00
Cambio de neumáticos [-]	4.00	0.00	0.00
Tiempo Ciclo [h]	0.10	0.00	0.01
Recambios de batería [-]	5353.50	0.65	0.81
Consumo total de energía [kWh]	1539190.25	56585.56	237.88
Distancia recorrida [km]	230909.43	1169371.75	34.20

Si bien, distintos autores (D. Liu et al., (2021), Gabriel et al., (2014, p. 2), Nealer & Hendrickson, (2015), OAM, (2012), Zheng et al., (2020)) aseveran que la propia operación de los vehículos eléctricos no emite contaminantes asociados, la combustión del diésel en los

motores de combustión interna si los emite, por lo que estos son considerados en el presente inventario (Ver detalle en Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico). Estos son estimados en función de factores de emisión presentados por la EPA, (2018) para cada tipo de motor y su operación.

Respecto a las emisiones por concepto de combustión del vehículo convencional diésel, estas fueron estimadas considerando los factores de emisión por defecto dentro de las directrices del IPCC 2006, adaptados a las características del combustible ocupado (Ver Tabla 17). Además, considerando lo planteado en el apartado de metodología, se estimará el material particulado de diésel en base al tier del motor y su potencia base (Ver Tabla 18). Los resultados obtenidos de la estimación de emisiones por concepto de combustión del diésel, se presentan en la Tabla 19. Es importante considerar que se ocupó el valor por defecto en el software OpenLCA para la estimación de los impactos asociados.

Tabla 17. Factores de emisión estimados. Adaptado de IPCC, (2006).

Emisión Categoría	Dióxido de carbono		Metano		Monóxido de di nitrógeno	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Defecto	2.6578	kg CO ₂ /L	0.0001	kg CH ₄ /L	0.0010	kg N ₂ O/L
Inferior	2.6040	kg CO ₂ /L	0.0001	kg CH ₄ /L	0.0005	kg N ₂ O/L
Superior	2.6829	kg CO ₂ /L	0.0004	kg CH ₄ /L	0.0031	kg N ₂ O/L

Tabla 18. Material particulado límite por clasificación Tier para motores igual o superior a 600 [hp] y menores a 750 [hp] según la EPA. Adaptado de Dallmann & Menon, (2016)

Poder del Motor	Tier	Año del Motor	PM Límite [g/kW-h]
≥450kW a <560kW (≥600hp a <750hp)	Tier 1	1996-2001	0.54
	Tier 2	2002-2005	0.20
	Tier 3	2006-2010	0.20
	Tier 4i	2011-2013	0.02
	Tier 4f	2014-2020	0.02

Tabla 19. Principales emisiones y sus cantidades durante la combustión del diésel.

Emisión	Valor	Unidad
Dióxido de carbono	2871361.7299	kg CO ₂
Metano	160.8118	kg CH ₄
Monóxido de di nitrógeno	1108.2449	kg N ₂ O
Material particulado	193.5000	kg PM _{2.5}

6. Resultados del análisis de impacto ambiental

En este capítulo se presentarán de los resultados de impacto ambiental para las 18 categorías evaluadas en torno a los 3 alcances, el proceso agregado que considera los impactos integrados para el ciclo de vida de cada vehículo, y, por último, los resultados en torno al análisis de sensibilidad energética. En todos estos subcapítulos se hace un énfasis en las categorías evaluadas con mayores resultados obtenidos, en donde también se entrega un análisis en torno a las emisiones con mayor contribución al aumento de dichas categorías.

6.1. Resultados y análisis de Impacto ambiental por matriz energética

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de impacto ambiental para el combustible diésel y para la electricidad generada en Chile:

Tabla 20. Resultados del análisis de impacto ambiental para la producción de combustible diésel y la generación eléctrica (2020).

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Diésel [Imp./GJ]	Electricidad [Imp./GJ]
Ocupación de terreno agrícola	m2a	0.203	0.910
Cambio climático	kg CO2-Eq	12.479	45.531
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	29.393	7.517
Ecotoxicidad de aguas frescas	kg 1,4-DCB-Eq	0.010	0.159
Eutroficación de aguas frescas	kg P-Eq	0.002	0.024
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	1.433	17.312
Radiación ionizante	kg U235-Eq	5.617	0.698
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq	0.017	0.163
Eutroficación marina	kg N-Eq	0.002	0.010
Agotamiento de los metales	kg Fe-Eq	0.124	0.209
Transformación del terreno natural	m2	-0.001	-0.003
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	0.000	0.000
Formación de material particulado	kg PM10-Eq	0.035	0.099
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq	0.075	0.145
Acidificación terrestre	kg SO2-Eq	0.116	0.270
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	0.001	0.002
Ocupación de terreno urbano	m2a	0.140	0.452
Agotamiento del agua	m3 water-Eq	0.031	0.157

Acorde a los resultados, la manufactura del combustible diésel presenta un impacto menor a la generación eléctrica en 15 de las 18 categorías de impacto ambiental estudiadas (Ver Gráfico 10). Además, en promedio, la generación eléctrica presenta 5.9 veces más impactos que la producción de diésel, entendiéndose este valor como un promedio de la razón de los impactos de la generación eléctrica por sobre la producción de diésel. Aún así, existe la excepción con las categorías de potencial de agotamiento de combustibles fósiles, potencial de emisión de radiación ionizante y agotamiento del ozono, en donde los resultados evidenciaron 3.9 veces, 8.1 veces y 13.1 veces más impactos para la producción diésel que para la generación eléctrica, para cada categoría respectivamente. Con esto, se evidencia que la emisión de material radiactivo con efecto a la salud humana y la emisión de sustancias antropogénicas (como los clorofluorocarbono), representan mayores impactos en la producción del diésel en comparación con la generación eléctrica, siendo estas diferencias de impactos por sobre el promedio de las diferencias de las otras categorías evaluadas.

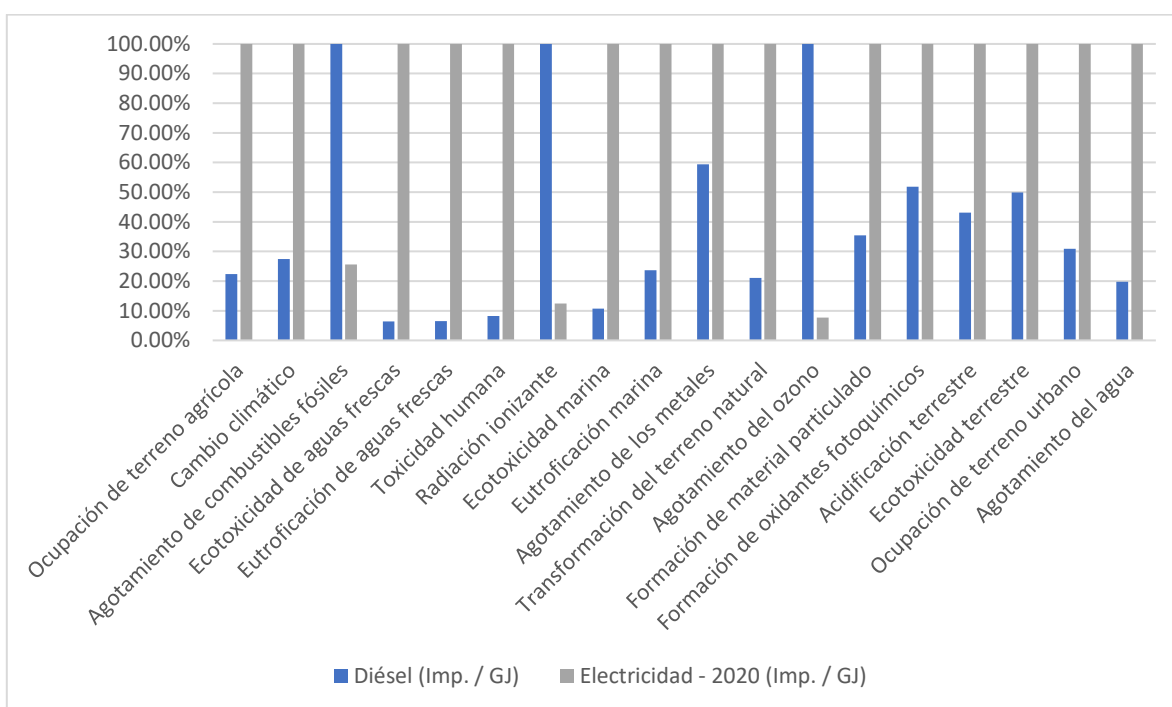


Gráfico 10. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría para ambas fuentes de impulsión.

Las categorías que representan un mayor impacto entorno a la manufactura de combustible diésel son los potenciales de agotamiento de combustibles fósiles, el potencial de cambio climático y el potencial de emisión de radiación ionizante, en cambio para la generación

eléctrica, el potencial de cambio climático toma el rol más importante, seguido por el potencial de toxicidad humana y por último el agotamiento de los combustibles fósiles.

La emisión con mayor influencia dentro del potencial de cambio climático es el dióxido de carbono teniendo un aporte del 96.9% al total del impacto para la electricidad y un 93% del aporte en el caso de la manufactura del diésel (Ver Gráfico 11). Este aporte de emisiones de dióxido de carbono se encuentra asociado principalmente al proceso propio de manufactura del diésel (elaboración de diésel bajo en sulfuros) y en el caso de la electricidad, a la generación de electricidad en base al carbón, la que aporta con un 60.9% al total de emisiones de dióxido de carbono.

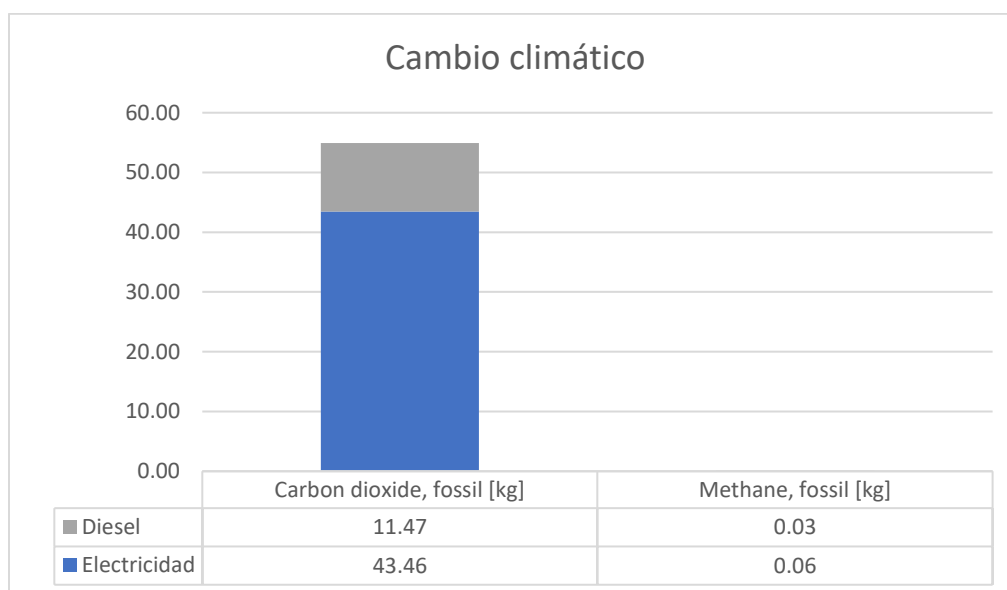


Gráfico 11. Emisiones con mayor aporte al potencial de cambio climático para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].

Con respecto al potencial de agotamiento de combustibles fósiles, es intuitivo pensar en que la propia producción de diésel representa un mayor impacto en comparación a la generación de energía eléctrica. En este sentido, la producción de diésel representa, en promedio, 7.2 veces más consumo de combustibles fósiles que la generación de energía eléctrica (por Giga Joule). De cualquier forma, el agotamiento se encuentra focalizado en el consumo de petróleo crudo y en mucha menor magnitud, en el consumo de gas natural (Ver Gráfico 12).

Con respecto a la manufactura del diésel, el consumo de petróleo crudo representa un 95.7% del consumo asociado al agotamiento de combustibles fósiles, por otro lado, por parte de la electricidad, es el consumo de gas natural quien presenta un mayor aporte a esta categoría de impacto, consumo asociado principalmente al proceso de producción eléctrica en base al gas natural, el cual representa un 73.2% del consumo total de combustibles fósiles asociados a esta generación.

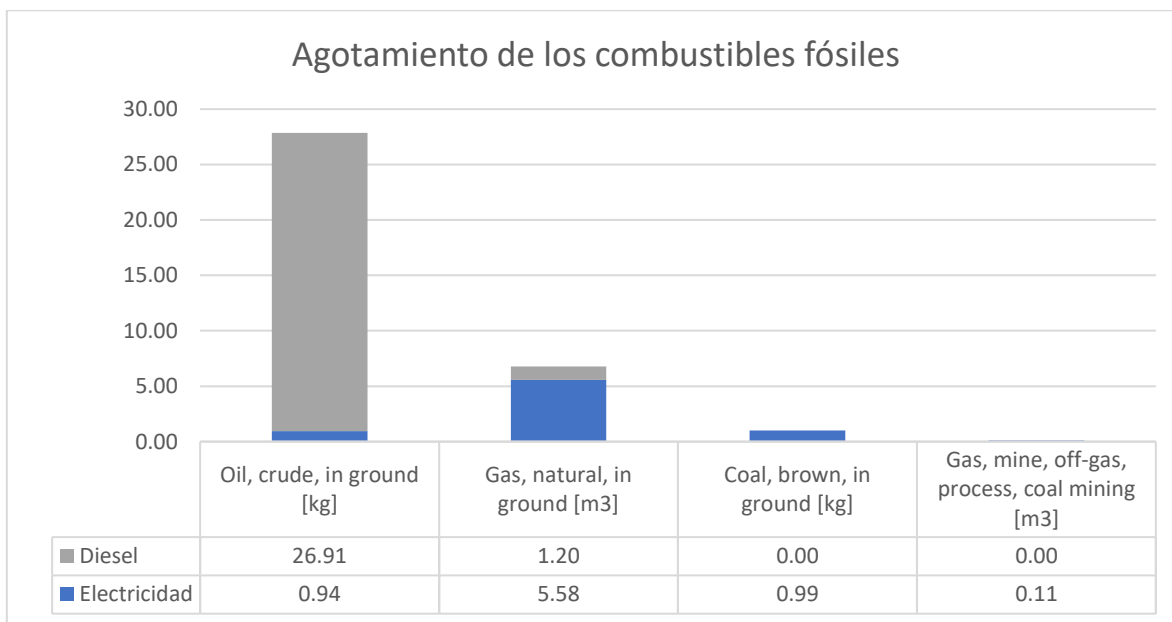


Gráfico 12. Emisiones con mayor aporte al potencial de agotamiento de los combustibles fósiles para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].

La tercera categoría de impacto con mayor potencial de contaminación es la toxicidad humana. En esta categoría de impacto, las emisiones de manganeso presentan la mayor contribución al aumento del potencial de toxicidad, respecto a la generación eléctrica, el manganeso representa un aporte del 78.6% respecto al total del impacto de esta categoría, por otro lado, para la manufactura del combustible diésel, el manganeso representa un aporte del 60.7% al total de la categoría (Ver Gráfico 13). En este sentido, las emisiones en la generación eléctrica representan 15.9 veces las emisiones de manganeso en la manufactura de combustible diésel (por Giga Joule de cada combustible), siendo el mayor aporte (emisiones del 84.5% del manganeso total) atribuido al proceso de generación eléctrica en base al carbón, tecnología de generación que suministra el 35.1% de electricidad total a la matriz energética nacional para el año 2020.

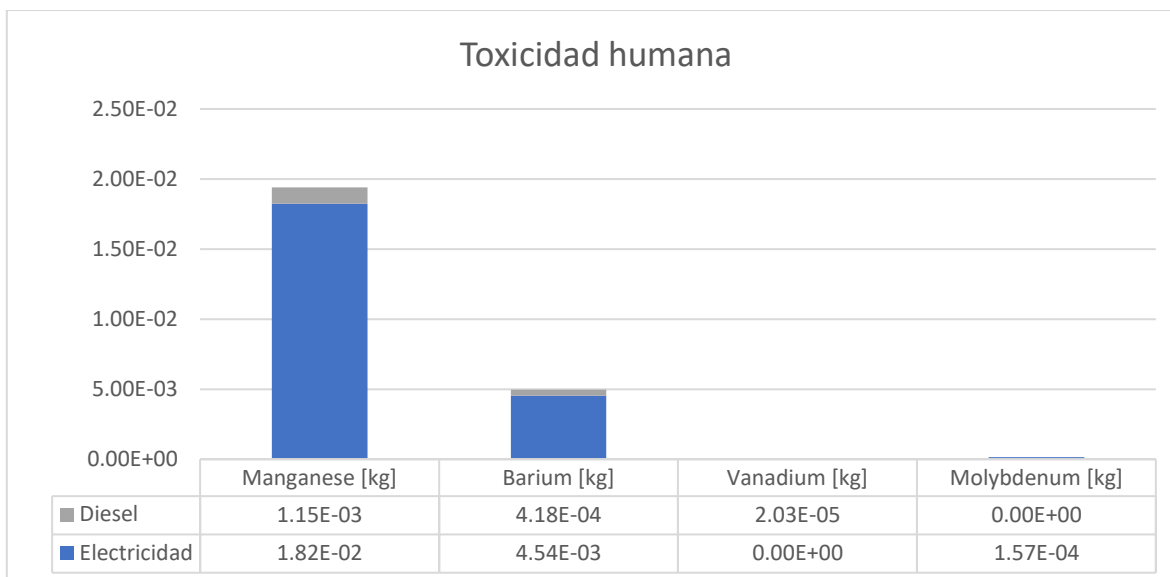


Gráfico 13. Emisiones con mayor aporte al potencial de toxicidad humana para la manufactura de diésel y la generación de electricidad [Emisiones/ GJ].

Estos resultados guardan estrecha relación con la unidad básica de cada combustible (Impactos/GJ) siendo directamente proporcionales al consumo total durante la vida útil de los equipos para cada caso correspondiente. En este sentido, los impactos ambientales totales se presentan a continuación:

Tabla 21. Impactos totales durante la operación de los vehículos a lo largo de su vida útil.

Categoría de Impacto	Unidad de referencia	Camión diésel	Camión Eléctrico
Ocupación de terreno agrícola	m2a	8072.28	18148.93
Cambio climático	kg CO2-Eq	495745.75	908240.63
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	1167680.47	149949.16
Ecotoxicidad de aguas frescas	kg 1,4-DCB-Eq	403.62	3172.18
Eutroficación de aguas frescas	kg P-Eq	61.85	481.23
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	56915.81	345331.12
Radiación ionizante	kg U235-Eq	223159.39	13920.17
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq	690.66	3243.25
Eutroficación marina	kg N-Eq	96.38	204.39
Agotamiento de los metales	kg Fe-Eq	4920.49	4163.72
Transformación del terreno natural	m2	-24.46	-58.23
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	0.62	0.024
Formación de material particulado	kg PM10-Eq	1395.88	1976.93
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq	2990.56	2899.13
Acidificación terrestre	kg SO2-Eq	4614.06	5377.24
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	37.59	37.80
Ocupación de terreno urbano	m2a	5543.28	9013.71
Agotamiento del agua	m3 water-Eq	1231.34	3128.29

Considerando los consumos asociados a la operación para cada combustible, la energía eléctrica presenta un mayor impacto en comparación al combustible diésel en 13 de las 18 categorías de impacto evaluadas. De cualquier forma, es importante mencionar, que estas emisiones no tratan directamente del consumo u operación del vehículo, sino más bien, en los impactos ambientales generados por la manufactura o generación de cada uno de los combustibles ocupados.

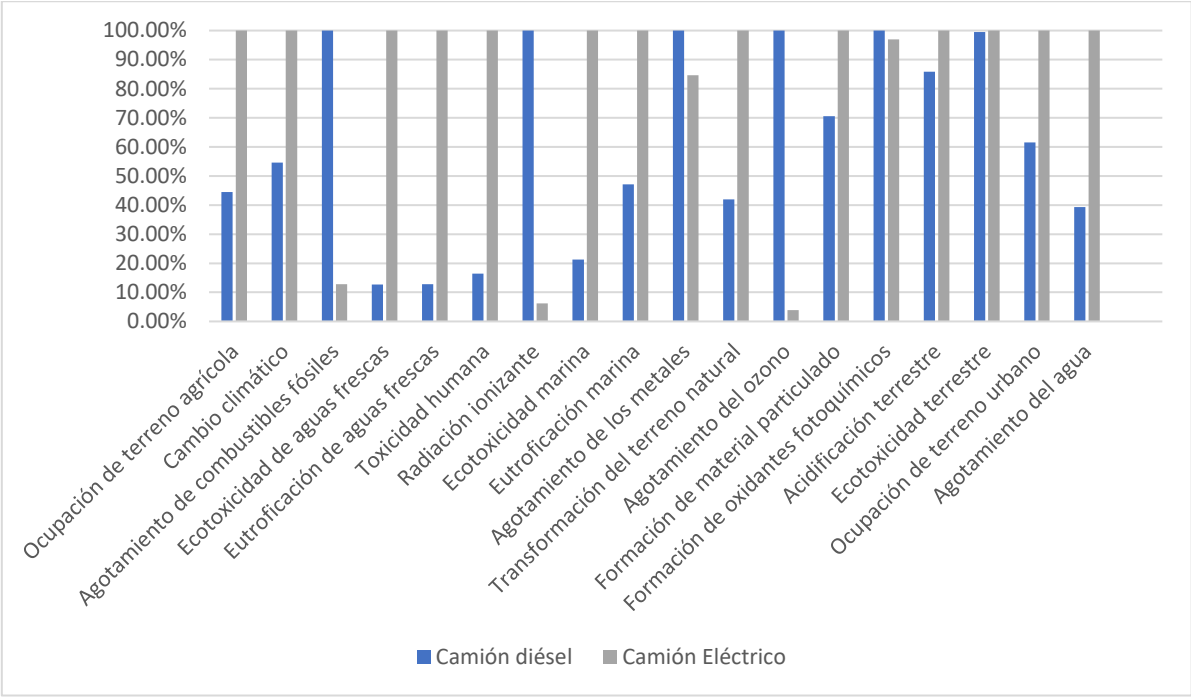


Gráfico 14. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría de impacto en operación para ambas fuentes de impulsión.

Es importante mencionar, que a partir de la Tabla 21, se puede observar que el impacto asociado a la transformación del terreno natural presenta un valor negativo, lo cual es atribuible a la generación de terreno fértil o disponible luego del consumo de los recursos necesarios para la manufactura/generación de cada combustible. Además, otro punto a considerar es que los resultados en general presentan diferencia en torno a los factores de emisiones otorgados por el ministerio de energía de Chile, en este sentido, por ejemplo, el factor de emisión de gramos de CO₂ por kWh consumido para el año 2020 es de 383.4, el cual presenta diferencia al factor de 568.4 gramos de CO₂ por kWh consumido obtenidos en el presente estudio. Esto responde principalmente al factor temporal y espacial de los datos utilizados en el inventario, los cuales consideran que parte de la información en torno a las

tecnologías de generación eléctrica fueron asumidas en función de la información disponible (Ver Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”), la cual puede o no reflejar la realidad chilena.

Considerando a la categoría de cambio climático como aquella en donde se obtuvieron los mayores resultados, es importante evidenciar aquellos procesos en donde se obtengan los mayores aportes porcentuales. Con respecto a la producción de diésel, este fue considerado un proceso único productivo (en función de la información provista por bases de datos) por lo que la manufactura de este tiene la totalidad de contribución. Con respecto al inventario de generación eléctrica, las distintas tecnologías de generación tienen distintas contribuciones al aumento de esta categoría, siendo el mayor aporte asociado a la generación eléctrica en base a carbón con un aporte de 61.7% al total esta categorías de impacto (Ver Gráfico 15). De cualquier forma, las emisiones de dióxido de carbono permanecen siendo la fuente de aumento de los resultados para esta categoría de impacto, teniendo el 95.7% del aporte total respecto a la generación eléctrica en base a carbón.

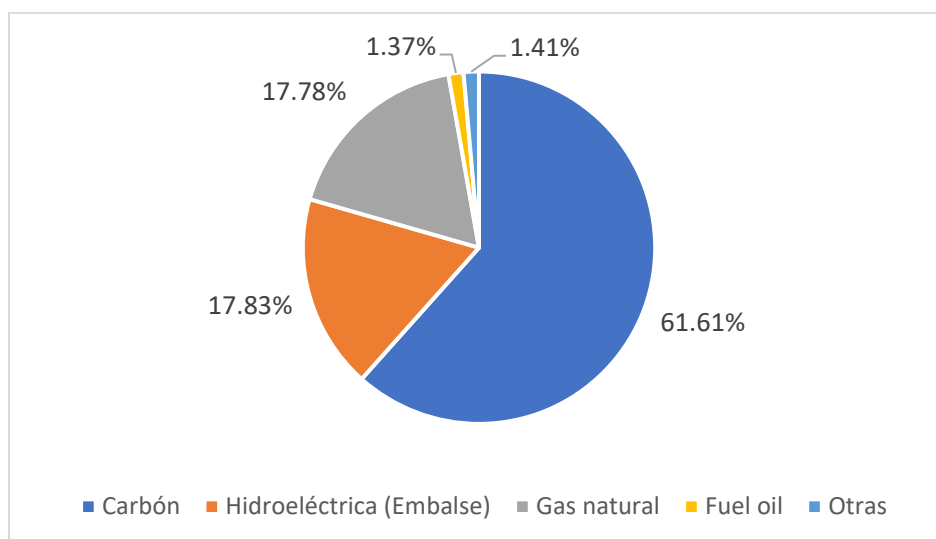


Gráfico 15. Principales contribuciones por tecnología de generación a la categoría de cambio climático.

6.2. Resultados y análisis de Impacto ambiental por Manufactura

Los resultados obtenidos del análisis de impacto ambiental para los procesos de manufactura de un vehículo diésel y vehículo eléctrico, son presentados a continuación:

Tabla 22. Resultados del análisis de impacto ambiental para la manufactura de los vehículos diésel y eléctrico.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Camión diésel	Camión eléctrico
Ocupación de terreno agrícola	m2a	2590.95	4444.63
Cambio climático	kg CO2-Eq	74587.22	117567.20
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	11269.39	18824.77
Ecotoxicidad de aguas frescas	kg 1,4-DCB-Eq	560.67	914.31
Eutroficación de aguas frescas	kg P-Eq	60.48	99.91
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	79154.81	129351.11
Radiación ionizante	kg U235-Eq	3673.23	7897.24
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq	678.87	1185.97
Eutroficación marina	kg N-Eq	18.64	28.53
Agotamiento de los metales	kg Fe-Eq	41839.40	62105.41
Transformación del terreno natural	m2	-6.96	-10.79
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	0.00	0.01
Formación de material particulado	kg PM10-Eq	284.83	420.58
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq	330.52	506.54
Acidificación terrestre	kg SO2-Eq	358.13	618.59
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	9.34	19.09
Ocupación de terreno urbano	m2a	866.80	1619.76
Agotamiento del agua	m3 water-Eq	496.83	1057.86

De acuerdo con los resultados obtenidos, la producción de un camión eléctrico tiene los mayores impactos en todas las categorías en comparación a la producción de un camión diésel (Ver Gráfico 16), donde, además, los resultados muestran que los impactos ambientales son en promedio 1.7 veces más altos para la manufactura de un vehículo eléctrico que para la manufactura de un vehículo diésel. Respecto a esto, el análisis de resultados asocia estos impactos principalmente a la manufactura del chasis y los ejes para el vehículo diésel, y la manufactura del chasis y la batería principal para el vehículo eléctrico. En este sentido, la manufactura de la batería principal representa, en promedio, un 19.6% “extra”- de impactos ambientales respecto al vehículo diésel, debido principalmente a la falta de este componente en el tren de potencia en los vehículos convencionales.

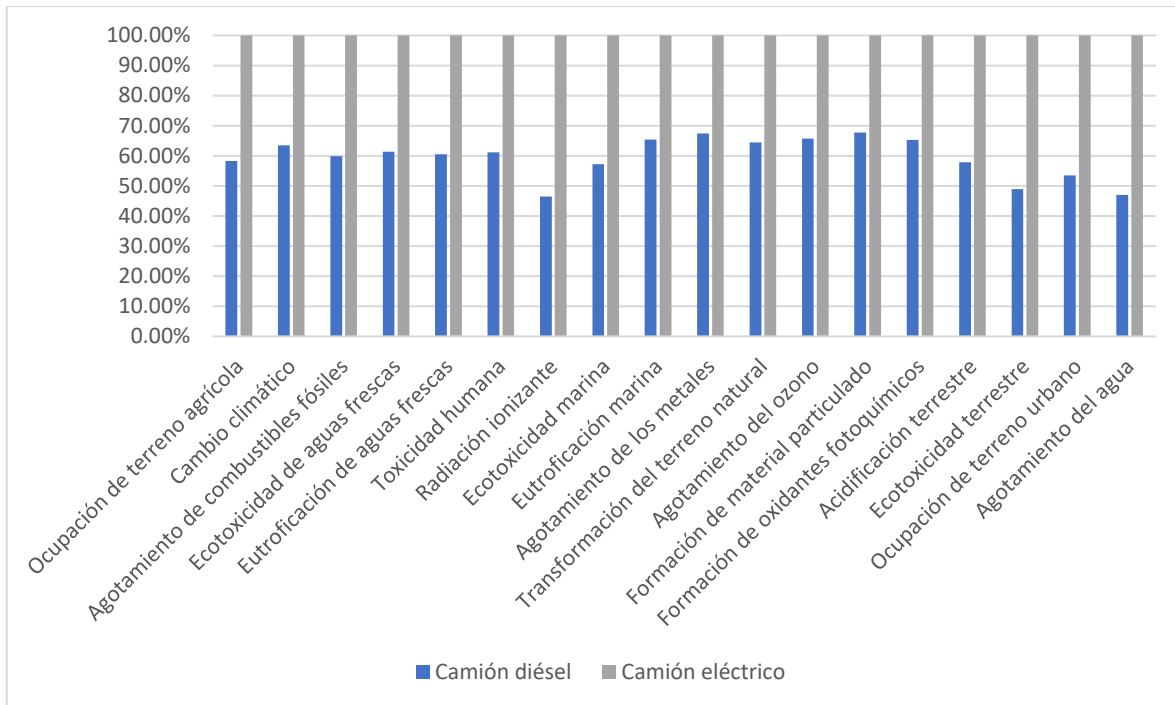


Gráfico 16. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno a la manufactura de cada vehículo.

Por otro lado, para ambos equipos, las categorías de impacto con mayores resultados corresponden al potencial de toxicidad humana, potencial de cambio climático, el agotamiento de los metales, el agotamiento de combustibles fósiles y el potencial de emisión de radiación ionizante (Ver Gráfico 17). Es importante recalcar, que tal y como se mencionó antes, para el caso eléctrico, la manufactura del chasis y la batería principal corresponden a los mayores aportes a cada categoría de impacto, siendo estos aportes atribuidos al chasis. De cualquier forma, específicamente para la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, es la batería la que presenta un mayor impacto. El análisis de resultados atribuye este resultado a los materiales de composición, con una mayor contribución asociada a la producción de nylon 66 y al aluminio estructural, asociados también, al trabajo de ambos materiales (moldeo, soldadura, entre otros).

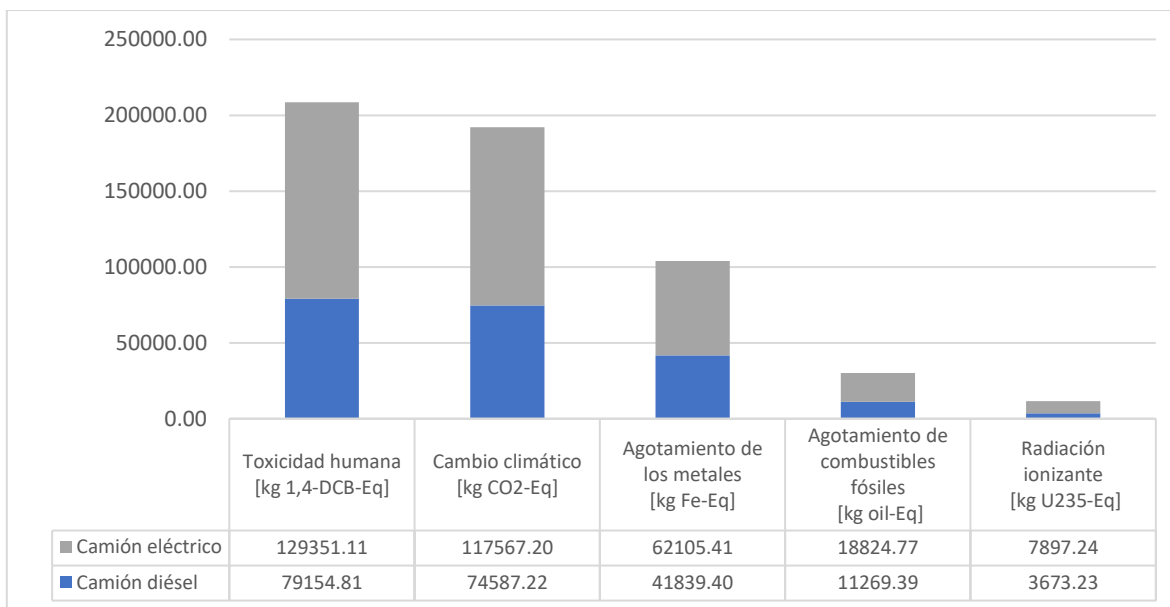


Gráfico 17. Categorías de impacto ambiental con mayores resultados para la manufactura de ambos equipos.

Considerando las tres categorías con mayor potencial de impacto ambiental, la toxicidad humana se establece como la primera de ellas, siendo el principal agente de emisión el manganeso, con un aporte al total de la categoría de 64.4% para el caso diésel y 66.2% para el caso eléctrico (Ver Gráfico 18). Estas emisiones de manganeso provienen principalmente de la producción del acero de baja aleación para la estructura del equipo y en menor medida de la producción cobre y aluminio, materiales usados en grandes cantidades para el chasis de ambos equipos, y específicamente, para el eje del camión diésel, cuya producción tiene una contribución del 18.9% al total de impacto de la categoría y, para el caso eléctrico, como materiales estructurales que componen en gran medida los motores de tracción, manufactura que contribuye con un 21.2% al total de esta categoría. De cualquier forma, la producción de cobre presenta una contribución del 22.9% al total del potencial de toxicidad en cuanto al vehículo eléctrico se refiere, el acero de baja aleación, una contribución de 53.5% y el aluminio un 6.8%. Por el lado del vehículo diésel, el aluminio representa el 6% de la contribución a esta categoría de impacto, el cobre un 4.7%, mientras que el acero, presenta una contribución del 78.7%, evidenciando el fuerte impacto que tiene la producción de acero, en los impactos asociados a la manufactura de las partes críticas de ambos equipos.

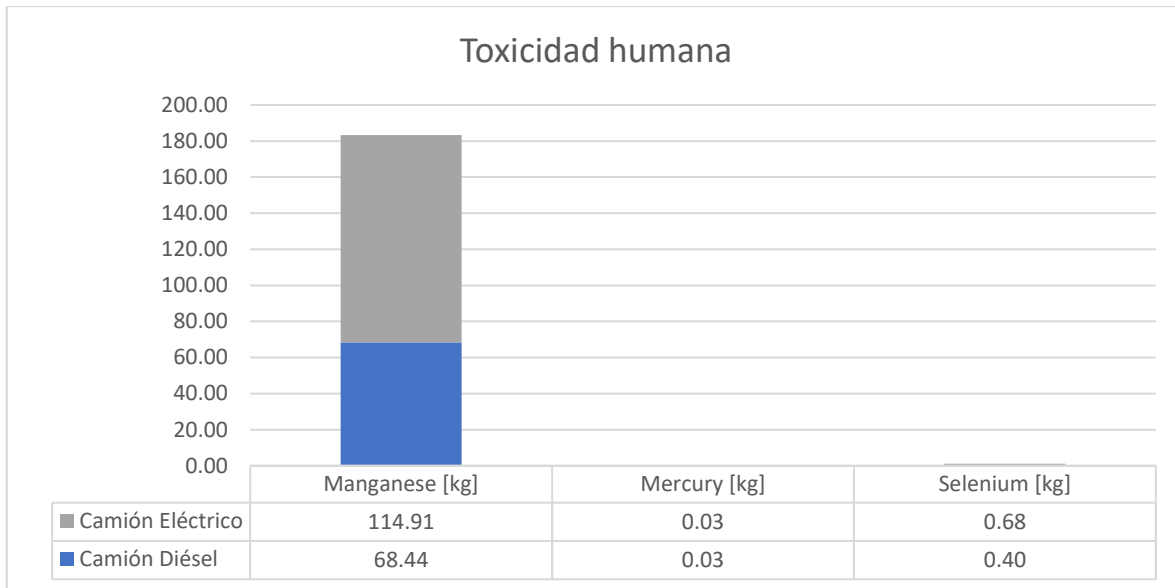


Gráfico 18. Emisiones con mayor aporte al potencial de toxicidad humana para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.

La segunda categoría con mayor impacto en la manufactura de ambos equipos es el potencial de cambio climático, el cual se ve influenciado en gran medida por las emisiones de dióxido de carbono (Ver Gráfico 19). Estas emisiones contribuyen con un 93.1% y 92.5% del total de potencial de impacto por manufactura de los vehículos diésel y eléctrico, respectivamente.

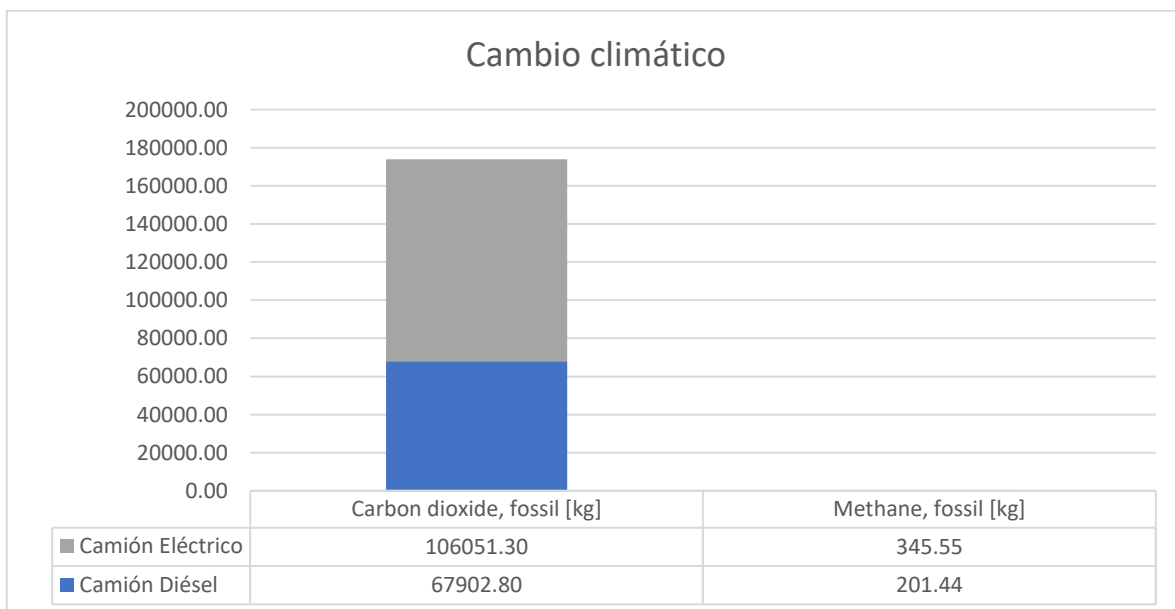


Gráfico 19. Emisiones con mayor aporte al potencial de cambio climático para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.

Para la manufactura de ambos vehículos, los procesos de producción de acero y aluminio presentan las mayores contribuciones al aumento de esta categoría de impacto ambiental. Para el vehículo eléctrico, respecto a las contribuciones totales a esta categoría, la producción del acero y aluminio representan el 42.1% y el 23.8%, respectivamente. Con respecto al vehículo diésel, la producción de acero y aluminio, aportan con el 59.7% y el 20.2% de las contribuciones totales a la categoría de impacto, respectivamente.

Considerando a esta categoría como una de las principales precursoras en materia de la huella ecológica, es importante evidenciar aquellos componentes que tienen los mayores aportes en el aumento de esta categoría. Teniendo en cuenta esto, tanto para el caso eléctrico como el diésel, las mayores contribuciones son asociadas a la manufactura de los chasis (Ver Gráfico 20), pero como componente diferenciador, la batería principal de los equipos eléctricos, aporta con el 21.3% al total de esta categoría, componente que desplaza a la manufactura de los ejes hasta una tercera posición, esto considerando que para el caso diésel, el eje ocupa el puesto de la segunda mayor contribución al total de los resultados para esta categoría.

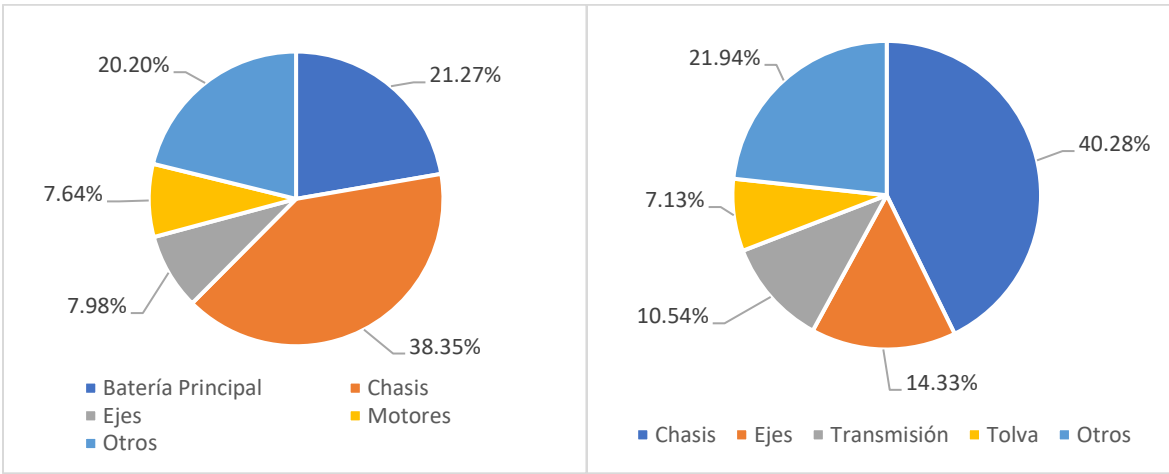


Gráfico 20. Mayores 5 contribuciones por componente de los vehículos eléctrico (izquierda) y diésel (derecha) para la categoría de cambio climático.

De cualquier forma, al igual que la categoría anterior, la producción de metales es la que se atribuye las mayores contribuciones de emisiones, lo que puede estar directamente relacionado con el modelo de inventario de masas desarrollado, el cuál presenta altos porcentajes de materiales estructurales basados en aceros y aluminios.

Siguiendo con la línea de las categorías de impacto, como es de esperarse, para el potencial de agotamiento de los metales es el proceso de producción de acero el que contribuye en gran medida con el agotamiento tanto para la manufactura del equipo diésel como del equipo eléctrico. En este sentido, la producción de acero tiene una contribución del 67% y 89.5% al total de la categoría de impacto para la manufactura del vehículo eléctrico y diésel, respectivamente, con un consumo principal asociado a manganeso y níquel (Ver Gráfico 21).

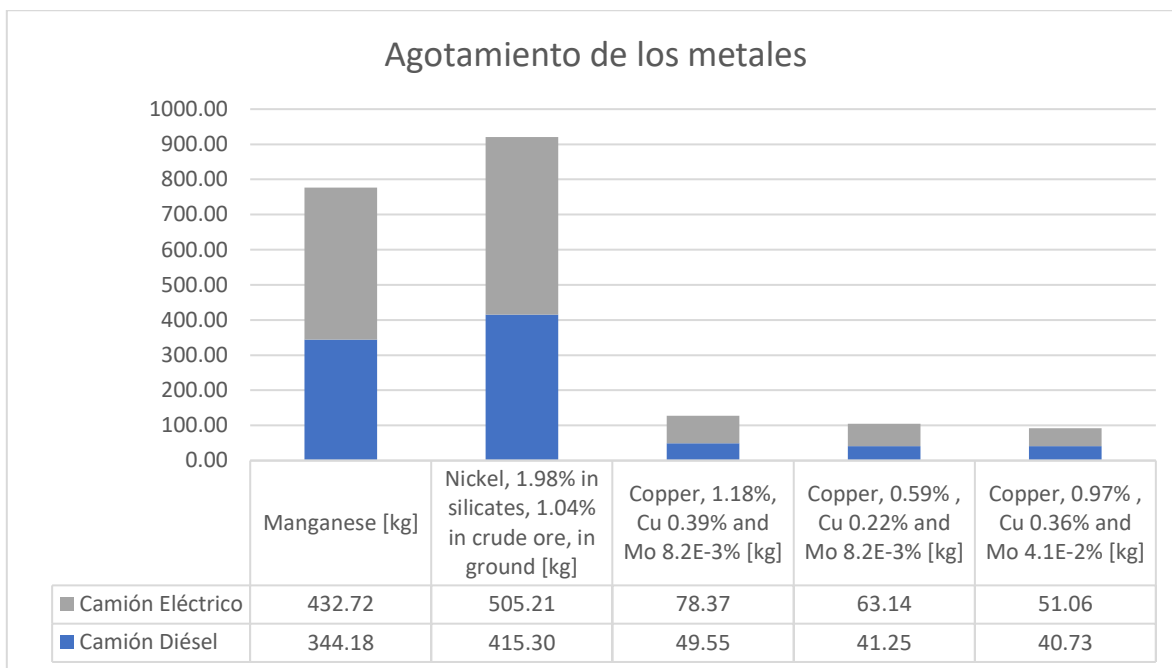


Gráfico 21. Emisiones con mayor aporte al potencial de agotamiento de los metales para la manufactura del vehículo diésel y eléctrico.

Es importante recalcar, que, si bien el consumo de níquel asociado a esta categoría es mucho mayor que el consumo de manganeso, el factor de impacto asociado al consumo de níquel (12.5 kg Fe-Eq/kg) es mucho menor que el factor de impacto del manganeso (76.6 kg Fe-Eq/kg), resultando en una contribución mucho mayor a esta categoría de impacto por parte del manganeso. En este sentido, el manganeso representa una contribución del 55.8% y 66.1% del total del potencial de agotamiento de los metales para la manufactura de los vehículos eléctrico y diésel, respectivamente.

6.3. Resultados y análisis de Impacto ambiental por Operación

En consideración con lo presentado en el inventario de operación (Ver subcapítulo 5.2.3), los resultados por concepto de operación envuelven el recambio de neumáticos, el cambio de aceite de motor en el caso diésel, y las emisiones por la propia combustión del diésel durante el ciclo de vida del vehículo diésel convencional. En este sentido, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 23. Resultados del análisis de impacto ambiental por concepto de operación de los vehículos diésel y eléctrico.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Camión Diésel	Camión Eléctrico
Ocupación de terreno agrícola	m2a	591.02	477.15
Cambio climático	kg CO2-Eq	3222573.04	14094.77
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	7964.69	5004.32
Ecotoxicidad de aguas frescas	kg 1,4-DCB-Eq	64.63	57.64
Eutroficación de aguas frescas	kg P-Eq	7.61	6.72
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	8407.13	7553.11
Radiación ionizante	kg U235-Eq	1410.50	834.53
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq	72.54	64.18
Eutroficación marina	kg N-Eq	2.67	2.17
Agotamiento de los metales	kg Fe-Eq	3524.75	3413.18
Transformación del terreno natural	m2	-0.86	-0.70
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	0.003	0.001
Formación de material particulado	kg PM10-Eq	229.84	29.91
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq	100.94	45.75
Acidificación terrestre	kg SO2-Eq	66.61	50.40
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	1.13	0.95
Ocupación de terreno urbano	m2a	118.26	94.29
Agotamiento del agua	m3 water-Eq	100.51	82.54

De acuerdo con lo obtenido, el vehículo diésel presenta mayores impactos en todas las categorías de impacto ambiental evaluadas (Ver Gráfico 22), siendo estas mayores en un promedio de 30.5% para cada categoría. Esta diferencia se ve reflejada principalmente por los aportes atribuidos a la manufactura del aceite de motor y de la propia combustión interna del vehículo diésel. En este sentido, la combustión del vehículo diésel, aporta en gran medida con el aumento de la formación de material particulado, al aumento del potencial de cambio climático y en un menor grado, a la formación de oxidantes fotoquímicos siendo la combustión del diésel un aporte del 84.2%, 99.5% y 1.6% al total de cada una de estas categorías, respectivamente.

Es importante mencionar que los impactos asociados al vehículo eléctrico se concentran en el recambio de neumáticos, y, por tanto, estos se encuentran determinados por los procesos “aguas arriba” en la manufactura de estos. En cuanto a esto, el recambio de neumáticos es considerado un elemento crucial en la operación del vehículo por lo que es incluido dentro de estos resultados.

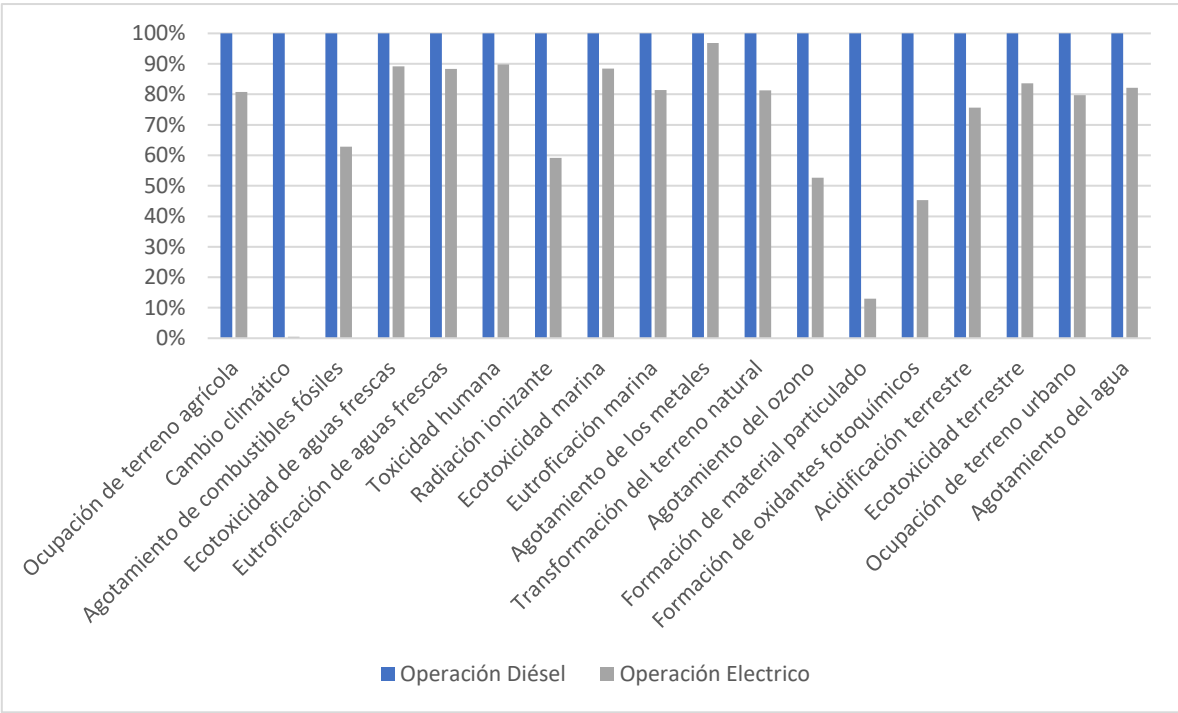


Gráfico 22. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno a la operación de cada vehículo.

Respecto a las categorías con un mayor impacto ambiental, en ambos vehículos el cambio climático se establece como el mayor impacto, seguido por el potencial de toxicidad humana y, por último, el agotamiento de combustibles fósiles. Dentro de estos, la categoría de potencial de cambio climático destaca por existir un 99.6% más de impacto en la operación del vehículo diésel, siendo la mayor diferencia porcentual dentro de las 18 categorías evaluadas.

Dentro de estas categorías de impacto ambiental, para la operación del vehículo diésel, el principal contaminante de la combustión es la generación de dióxido de carbono (CO₂), en donde este contaminantes presenta las mayores contribuciones a las categorías de impacto presentadas. Respecto, específicamente de la categoría de cambio climático, el proceso de

combustión del diésel se atribuye las mayores emisiones de CO₂, emisiones que se establece como la principal contribuyente en el aumento de esta categoría de impacto (aporte del 89.6% al total de esta categoría de impacto).

Por el lado de la operación del vehículo eléctrico, la manufactura de los neumáticos es el único contribuyente al aumento de los impactos ambientales, siendo el dióxido de carbono el manganeso, y el consumo de gas natural, las principales emisiones/consumos que afectan a las mayores tres categorías: cambio climático, toxicidad humana y agotamiento de los combustibles fósiles, respectivamente.

De cualquier forma, las contribuciones a la huella de carbono (emisiones principalmente de dióxido de carbono) de ambos ciclos de vida por concepto de operación tienen un impacto distinto, con una diferencia del 99.6% en torno a emisiones de CO₂, donde la operación del vehículo diésel presenta una mayor contribución de este contaminante. Como se mencionó anteriormente, por concepto de operación, el vehículo diésel emite 133.9 kilogramos de CO₂ por hora efectiva de operación, en cambio, el vehículo eléctrico emite 601.4 gramos, de donde este último, como se ha mencionado, es debido a la manufactura de los neumáticos de recambio.

6.4. Resultados y análisis procesos agregados

Los procesos agregados dan cuenta de los impactos asociados a todo el ciclo de vida del vehículo, por lo que es en este apartado donde se presentan los resultados generales para cada vehículo. En este sentido, los impactos ambientales para cada equipo durante su ciclo de vida son los siguientes:

Tabla 24. Resultados del análisis de impacto ambiental para el ciclo de vida de los vehículos diésel y eléctrico.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Camión diésel	Camión eléctrico
Ocupación de terreno agrícola	m2a	11254.24	23070.71
Cambio climático	kg CO2-Eq	3792906.01	1039902.60
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	1186914.55	173778.25
Ecotoxicidad de aguas frescas	kg 1,4-DCB-Eq	1028.92	4144.13
Eutroficación de aguas frescas	kg P-Eq	129.94	587.86
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	144477.75	482235.35
Radiación ionizante	kg U235-Eq	228243.13	22651.93
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq	1442.07	4493.40
Eutroficación marina	kg N-Eq	117.69	235.09
Agotamiento de los metales	kg Fe-Eq	50284.64	69682.31
Transformación del terreno natural	m2	-32.28	-69.72
Agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq	0.63	0.03
Formación de material particulado	kg PM10-Eq	1910.55	2427.42
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq	3422.02	3451.41
Acidificación terrestre	kg SO2-Eq	5038.80	6046.23
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	48.07	57.84
Ocupación de terreno urbano	m2a	6528.34	10727.76
Agotamiento del agua	m3 water-Eq	1828.68	4268.70

De acuerdo con los resultados, los mayores impactos para el ciclo de vida del camión diésel corresponden al potencial de cambio climático, el agotamiento de combustibles fósiles y el potencial de emisión de radiación ionizante. Por el lado del vehículo eléctrico, el mayor impacto es atribuible al potencial de cambio climático, seguido por el potencial de toxicidad humana y el agotamiento de los combustibles fósiles.

De acuerdo con lo anterior, los impactos ambientales del ciclo de vida del vehículo eléctrico presentan mayores resultados en 14 de las 18 categorías de impacto ambiental estudiadas

(Ver Gráfico 23). Por otro lado, las mayores diferencias en magnitudes de resultados se encuentran asociadas a las categorías de potencial de agotamiento de la capa de ozono, de emisión de radiación ionizante, el potencial de agotamiento de los combustibles fósiles y el potencial de cambio climático, con diferencias de 94.9%, 90.1%, 85.4% y 72.6%, respectivamente. Además, se considera que estas diferencias, se atribuyen a los mayores impactos obtenidos en el ciclo de vida de los vehículos convencionales diésel.

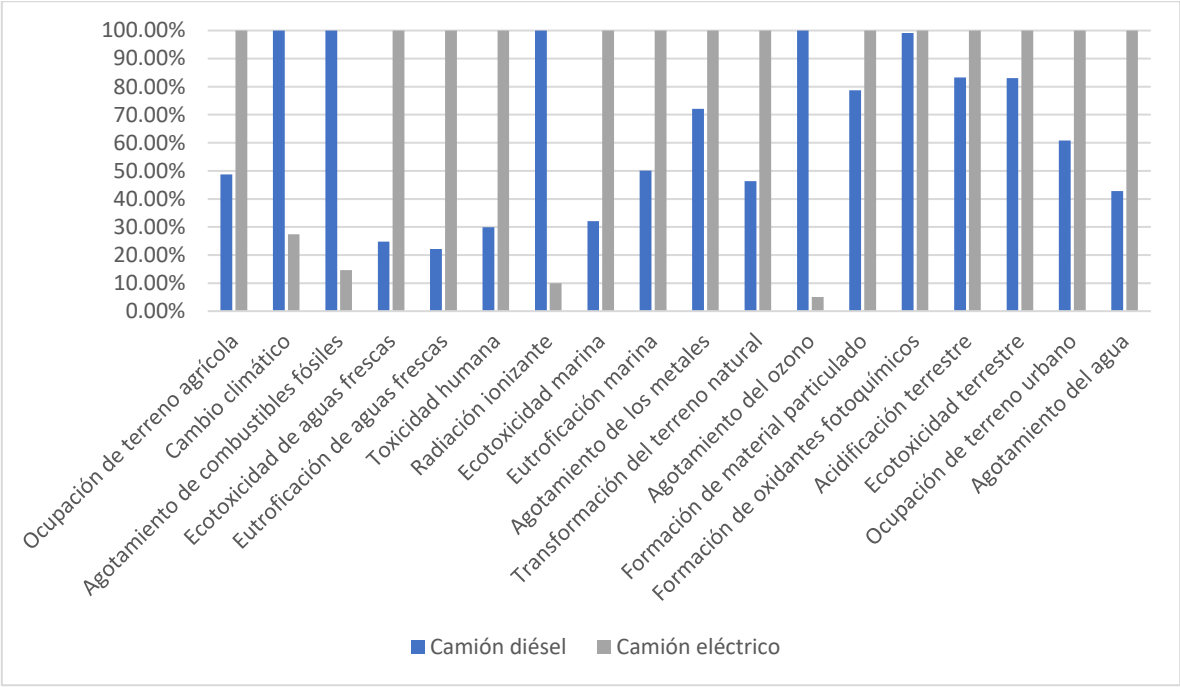


Gráfico 23. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría en torno al ciclo de vida de cada vehículo.

Tal y como se mencionó con anterioridad, las categorías de potencial de cambio climático, potencial de agotamiento de combustibles fósiles, de toxicidad humana y de radiación ionizante envuelven los 4 mayores resultados para ambos vehículos (Ver Tabla 25). Respecto del vehículo eléctrico, las mayores contribuciones a cada categoría de impacto son atribuidas al alcance de la matriz energética, siendo sus impactos, en promedio, 4.5 veces los impactos asociados a la manufactura para cada categoría evaluada y 54.3 veces los impactos asociados a la propia operación de este (para cada categoría). De cualquier forma, la categoría de potencial de agotamiento de los metales es la única categoría en donde se presenta una mayor contribución referente al proceso de manufactura del vehículo. Por parte del ciclo de vida del vehículo diésel, el proceso de manufactura presenta una mayor contribución en 3 de las 18

categorías de impacto, resaltando que dentro de estas se encuentra el potencial de toxicidad humana, considerándose a esta como las categorías de mayor impacto dentro del ciclo de vida.

Tabla 25. Resultados por alcance para las tres mayores categorías de impacto para ambos vehículos.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Manufactura	Matriz Energética	Operación
Eléctrico				
Cambio climático	kg CO2-Eq	117567.20	908240.63	14094.77
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	18824.77	149949.16	5004.32
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	129351.11	345331.12	7553.11
Radiación ionizante	kg U235-Eq	7897.24	13920.17	834.53
Diésel				
Cambio climático	kg CO2-Eq	74587.22	495745.75	3222573.04
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil-Eq	11269.39	1167680.47	7964.69
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq	79154.81	56915.81	8407.13
Radiación ionizante	kg U235-Eq	3673.23	223159.39	1410.50

A partir de la Tabla 25, se puede observar que la categoría con mayor resultado, tanto para el ciclo de vida del vehículo eléctrico como el ciclo de vida del vehículo diésel es el potencial de cambio climático, el cuál presenta como mayor contribución, para el caso eléctrico, a las emisiones generadas a partir de la generación de electricidad (matriz energética) con una contribución del 87.3%, en cambio, para el caso convencional diésel, es la operación la que representa las mayores contribuciones, con un aporte del 85% al total de la categoría (Ver Gráfico 24). Con esto, se obtiene que para el vehículo eléctrico, las mayores contribuciones a los impactos ambientales se encuentran en el alcance de la matriz energética, en segundo lugar, la manufactura del equipo, y por último la operación del propio vehículo, por otro lado, para el caso diésel, si bien la matriz energética continua como principal contribuyente al aumento de esta categoría, en segundo lugar se encuentra la operación, diferencia atribuida principalmente a la combustión del diésel y en último lugar, la manufactura del propio vehículo.

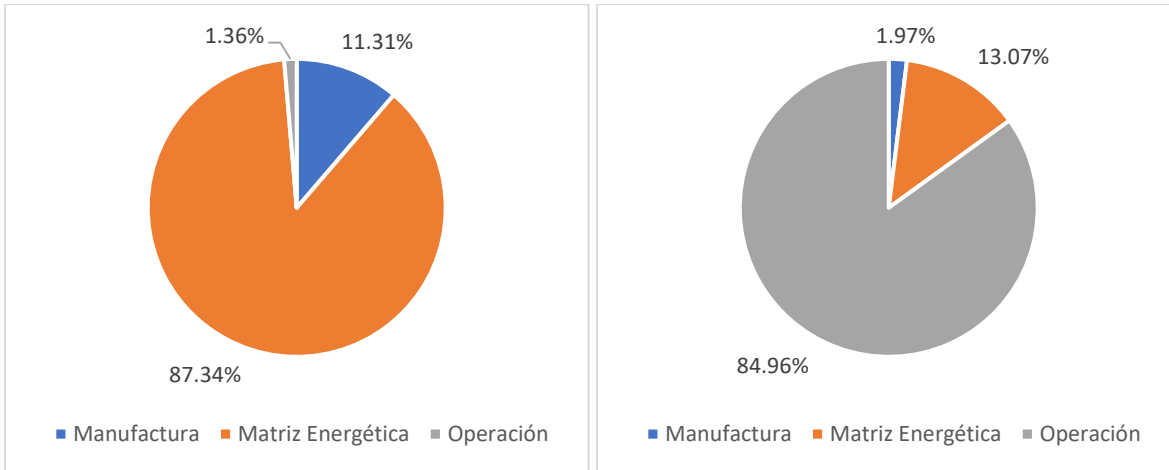


Gráfico 24. Contribuciones por alcance para las categorías de cambio climático del vehículo eléctrico (izquierda) y del vehículo diésel (derecha).

De acuerdo con lo anterior, y considerando los resultados obtenidos, un punto importante para analizar son las emisiones de CO₂ como indicadores de la huella ecológica del ciclo de vida de ambos equipos y en sí de cada alcance evaluado (Ver Tabla 26). En promedio, el ciclo de vida del vehículo diésel emite 158.6 kg de CO₂ por hora efectiva de operación, en cambio, el vehículo eléctrico presenta emisiones cercanas a los 45.9 kg de CO₂ por hora efectiva de operación, existiendo una diferencia del 71.1% en torno a emisiones de CO₂ por hora efectiva. En este sentido, en el caso del vehículo eléctrico, las emisiones de CO₂ se encuentran focalizadas en la generación eléctrica, en cambio, para el caso diésel, estas emisiones tienen como principal fuente la combustión del propio diésel.

Tabla 26. Emisiones de CO₂ por alcance para cada vehículo y su respectivo porcentaje relativo al máximo asociado.

Vehículo \ Alcance	Diésel [kg]	Eléctrico [kg]	Diésel [%]	Eléctrico [%]
Manufactura	67902.80	106051.30	64.03%	100.00%
Matriz	455470.60	866894.00	52.54%	100.00%
Operación	2878490.00	12929.20	100.00%	0.45%
Total	3410216.20	985874.50	100.00%	28.91%

6.5. Análisis de sensibilidad energética

El presente análisis busca evidenciar la sensibilidad de los resultados en torno al ciclo de vida de los vehículos eléctricos según sea la matriz energética que genere la electricidad consumida en operación. Tal y como se ha mencionado con anterioridad, distintos estudios han concluido en que la generación eléctrica es la que contribuye principalmente con las emisiones asociadas al uso de los vehículos eléctricos y para el caso del presente estudio, estos resultados fueron concordantes con lo mencionado. Si bien, con un enfoque netamente minero, el no tener emisiones en la propia operación representa una ventaja comparativa frente a la utilización de vehículos convencionales diésel, principalmente en minería subterránea, el enfoque integrador de los distintos alcances pretende evidenciar y cuantificar la totalidad de los impactos ambientales que envuelven el ciclo de vida de estos vehículos. Por tanto, es importante evaluar distintos escenarios energéticos los cuales presentan aportes diferenciados de acuerdo con distintas tecnologías de generación (Ver Tabla 27) que permitan vislumbrar el cambio de los impactos en función de la matriz energética.

Tabla 27. Porcentajes de contribución en la generación eléctrica para cada escenario por tecnología (E#: Escenario Sustentable número #).

	2020	2030 ³⁵	2050 ³⁵	Eólico	Solar	Hidráulico	E1	E2	E3	E4
Carbón	35.05%	3.39%	0.00%	-	-	-	-	-	-	-
Hidráulica de Pasada³⁶	14.45%	23.71%	15.26%	-	-	50.00%	-	25.00%	25.00%	25.00%
Gas Natural³⁷	17.63%	4.80%	4.37%	-	-	-	-	-	-	-
Hidráulica Embalse	12.11%	20.37%	13.12%	-	-	50.00%	-	25.00%	25.00%	25.00%
Solar Térmica	-	0.56%	0.33%	-	-	-	-	-	-	-
Solar Fotovoltaica	9.80%	22.99%	28.52%	-	100.00%	-	50.00%	-	50.00%	25.00%
Eólica	7.10%	20.99%	30.49%	100.00%	-	-	50.00%	50.00%	-	25.00%
Biomasa	2.42%	1.76%	1.02%	-	-	-	-	-	-	-
Geotérmica	0.32%	0.48%	0.29%	-	-	-	-	-	-	-
Cogeneración	0.24%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fuel Oil³⁸	0.89%	0.96%	0.56%	-	-	-	-	-	-	-
Almacenamiento	-	0.00%	6.03%	-	-	-	-	-	-	-

³⁵ Proyección contemplada con un 93% de energía desde fuentes renovables con el mínimo nivel de inversión Adaptado de Ministerio de Energía, (2019) y Ministerio de Energía, (2020).

³⁶ Esta categoría contempla las minihidráulicas de pasada dentro del aporte evaluado.

³⁷ Esta categoría contempla al GNL, pero no los procesos integrados de licuefacción.

³⁸ Esta categoría contempla las tecnologías en base a petróleo diésel.

Considerando lo anterior, se plantearon distintos inventarios de acuerdo con lo presentado en la Tabla 27 (Ver detalle en Anexo H: Análisis de sensibilidad) los cuales fueron modelizados en el software Openlca. Esta modelización fue realizada modificando el ciclo de vida del vehículo eléctrico en cuanto a la matriz energética se refiere (distintas fuentes de generación para la electricidad consumida). Las 4 categorías con mayores resultados fueron el cambio climático, el potencial de toxicidad humana, el agotamiento de combustibles fósiles y el agotamiento de los metales. Estas fueron las mayores categorías en 8 de los 9 escenarios, de donde la matriz energética con 100% de generación en base a energía solar, se diferenció de las otras en la categoría de impacto de agotamiento de combustibles fósiles, siendo desplazado a la quinta posición por la categoría de ocupación de terreno urbano.

Para cada categoría de impacto ambiental se compararon los resultados obtenidos en cada matriz generadora de electricidad. Considerando los resultados de las 4 categorías con mayor impacto anteriormente mencionadas (Ver Gráfico 25), se tiene que la mayor reducción de impactos en torno a estas categorías es la implementación de una matriz energética 100% eólica, que, además, al considerar las 18 categorías de impacto, resulta ser la que presenta los menores resultados de impacto ambiental. De cualquier forma, la segunda matriz con mayor reducción es aquella conformada por 50% energía eólica y 50% energía solar fotovoltaica (Matriz sustentable 1).

Dentro de las primeras 3 categorías con mayor resultado de impacto ambiental, la matriz actual (matriz 2020) presenta los mayores impactos ambientales en dos de estas, teniendo, además, los mayores resultados entre todos los escenarios en 8 de las 18 categorías de impacto evaluadas. En segundo lugar, se encuentra la matriz hidráulica, teniendo los mayores resultados de impacto en otras 7 de las 18 categorías de impacto.

De cualquier forma, los escenarios proyectados para los años 2030 y 2050 generarían una disminución de los impactos ambientales de los vehículos eléctricos, considerando principalmente que estos presentan una disminución progresiva del suministro eléctrico en base al carbón, concretando su disminución total para el año 2040 en el escenario planteado con anterioridad (Ministerio de Energía, 2019). De esto, considerando las proyecciones y los escenarios evaluados, se puede observar que si bien la matriz energética generadora actual no presenta los mejores resultados, en comparación tanto para los escenarios evaluados como

para su contraparte diésel, las políticas y legislaciones evolutivas hacia una generación más sustentable (fundamentado en el plan proyectivo energético hasta el año 2050 (Ministerio de Energía, 2019)) justifican las medidas actuales realizadas por distintas mineras y entidades gubernamentales que promueven el uso de vehículos eléctricos como una estrategia hacia la descarbonización (García Bernal, 2019).

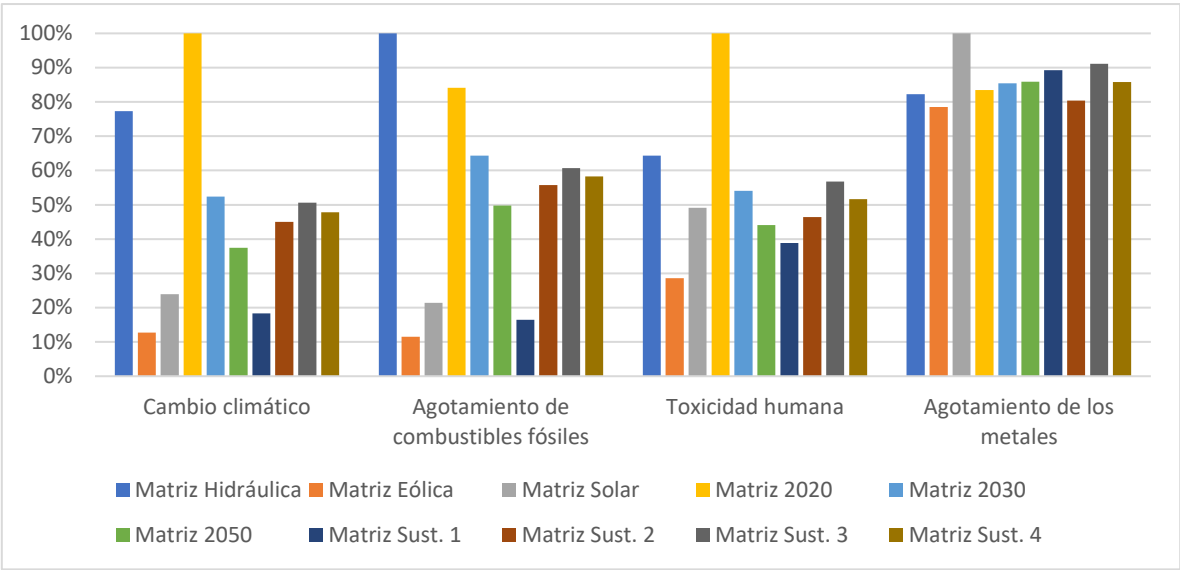


Gráfico 25. Ponderaciones relativas al máximo de cada categoría de impacto por escenario evaluado en torno al ciclo de vida del vehículo eléctrico.

En torno a las emisiones, para estas cuatro categorías de impacto, las mayores contribuciones corresponden a las emisiones de dióxido de carbono, el consumo de gas natural, las emisiones de manganeso y el consumo de manganeso terrestre para las categorías de cambio climático, agotamiento de los combustibles fósiles, toxicidad humana y agotamiento de los metales, respectivamente.

De acuerdo con los resultados, el impacto con mayor resultado en los escenarios evaluados es el potencial de cambio climático, el cual tiene a las emisiones de dióxido de carbono como el principal contribuyente al aumento de esta categoría. Considerando esta emisión, la variación de la matriz generadora de electricidad impacta directamente con la generación de este compuesto, siendo la matriz eólica la única matriz que representa cero emisión en este ámbito (Ver Gráfico 26), siendo seguida por la matriz compuesta de 50% energía solar fotovoltaica y 50% energía eólica.

En este sentido, es importante mencionar, que la matriz proyectada al año 2050 (cero aporte energético desde fuentes de carbón) representa el cuarto mejor escenario en torno a las emisiones de CO₂ dentro del análisis realizado. De cualquier forma, es importante tener en mente que el presente análisis se llevó a cabo con procesos disponibles en las bases de datos de libre acceso y de un ámbito global, por lo que no necesariamente puede reflejar la realidad chilena.

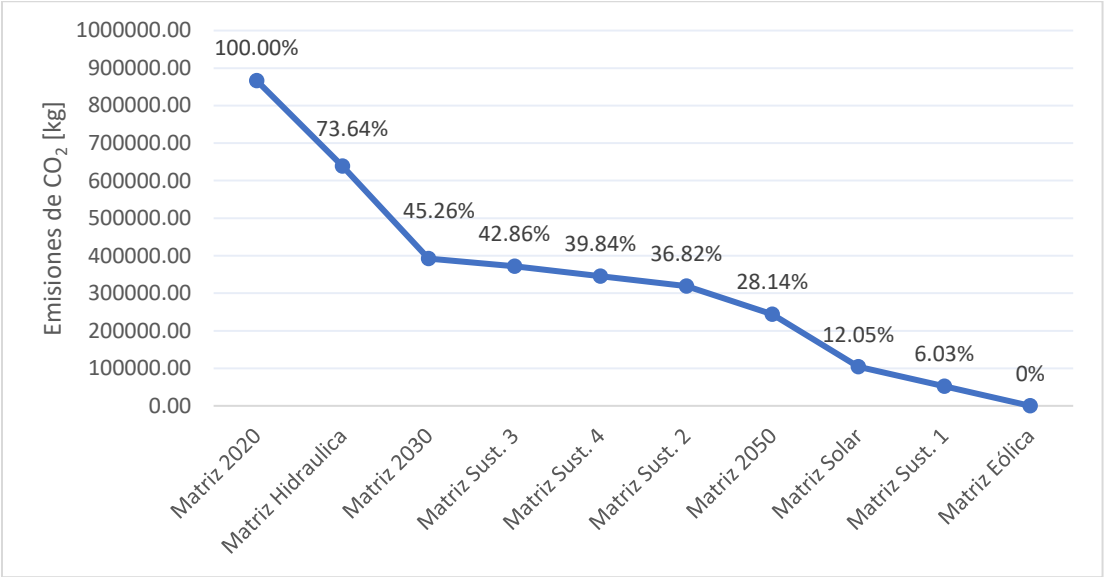


Gráfico 26. Cantidad y porcentaje relativo al máximo de emisiones de dióxido de carbono con aporte al aumento del potencial de cambio climático por escenario (sólo matriz energética).

Ahora, considerando los escenarios evaluados, si bien se obtienen menores resultados para la mayoría de las categorías de impacto respecto a la matriz eléctrica actual, es importante evidenciar el cambio respecto a los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida del vehículo diésel. Nuevamente, tomando como referencia a la categoría de impacto con los mayores resultados/magnitudes (potencial de cambio climático), el uso de una matriz sustentable, a lo menos en un 93% de acuerdo con los resultados obtenidos, disminuiría aún más los resultados obtenidos en torno a esta categoría (Ver Gráfico 27). De igual forma, esto nuevamente refuerza las estrategias gubernamentales, y en específico, mineras, en el fomento de la utilización de vehículos eléctricos, teniendo resultados positivos en materia ambiental en las proyecciones energéticas realizadas para los años 2030 y 2050.

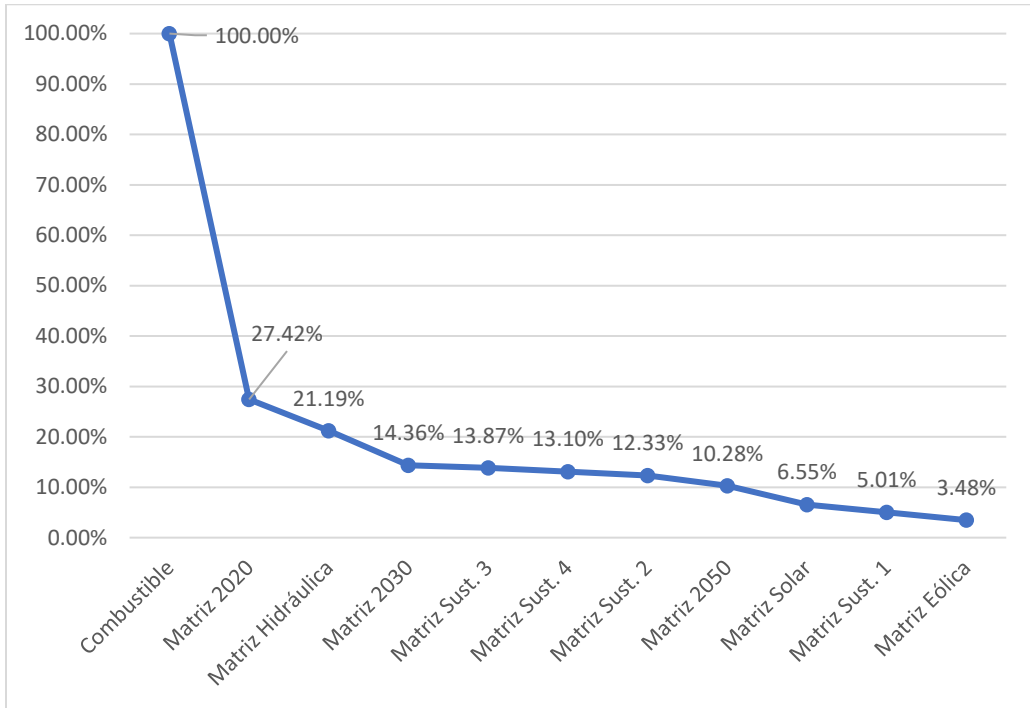


Gráfico 27. Porcentajes relativos al máximo resultado para la categoría de potencial de cambio climático por escenario evaluado.

7. Conclusiones

Al considerar el completo ciclo de vida del vehículo eléctrico, siendo este aquel que contempla la manufactura, operación y generación eléctrica, este tiene mayores impactos ambientales en 14 de las 18 categorías de impacto evaluadas en comparación a los impactos del ciclo de vida del vehículo diésel. Esta diferencia se refiere en gran medida a la matriz generadora eléctrica que rige actualmente en Chile, la cual presenta un 53.6% de su generación eléctrica en base a tecnologías que ocupan combustibles fósiles

Los impactos ambientales asociados a la operación minera subterránea de los vehículos diésel son, en promedio, 30.5% mayores que los impactos asociados a la operación de los vehículos eléctrico, esto, unido a que los vehículos eléctricos no presenta emisiones directas por la utilización y el consumo eléctrico, sino más bien, los impactos asociados a la operación se encuentran asociados a la manufactura de los insumos consumibles (por ejemplo los neumáticos) los que presentan el mayor impacto, los hacen una alternativa recomendada frente a la decisión de disminución de las emisiones dentro de la mina.

Respecto al análisis de sensibilidad, el escenario de suministro energético en base a energía eólica se presenta como una alternativa en donde los resultados de impacto ambiental se minimizan con respecto a los obtenidos del ciclo de vida del vehículo diésel, obteniéndose en 17 de las 18 categorías un impacto, en promedio, un 51.1% menor. Además, considerando la categoría de impacto ambiental de potencial de cambio climático como aquella en donde se obtuvieron los mayores resultados, el cambio de esta matriz energética, reduce considerablemente las emisiones de dióxido de carbono, principal precursor de esta categoría. Otra alternativa evaluada, es la modificación de la matriz energética hacia un suministro 100% solar en base al uso de paneles fotovoltaicos. Este escenario entregó resultados, en promedio, un 27.1% menores para las categorías evaluadas, en comparación a los resultados obtenidos de la matriz energética actual (2020). Esto da cuenta que la matriz energética nacional actual, no entrega los mejores resultados para la utilización de la maquinaria eléctrica, aún falta desarrollo en materia de suministro energético sustentable, siendo este el punto crítico diferenciador entre los impactos ambientales de los vehículos diésel versus los vehículos eléctricos. De cualquier forma, las proyecciones a los años 2030

y 2050 evaluadas en los escenarios anteriores, dan cuenta no sólo del compromiso a nivel país hacia un suministro sustentable, si no que los vehículo eléctricos se establecen como una alternativa potente en la descarbonización, que, unida a esta evolución energética, daría los mejores resultados y, por tanto, los menores impactos.

De acuerdo con lo obtenido del análisis de impacto ambiental por concepto de manufactura de los vehículos, el camión eléctrico presenta mayores resultados de impacto ambiental en la totalidad de las categorías de impacto evaluadas. Esto se debe principalmente a una mayor variedad de materiales en su matriz de composición y por ende un inventario más diversificado. El componente que presenta la principal diferencia entre ambos vehículos son las baterías, componente que contribuye, en promedio, con el 19.6% de todas las categorías de impacto en la manufactura del vehículo eléctrico. De cualquier forma, actualmente este elemento presenta alternativas para su fin de ciclo de vida como un elemento separado (alternativas de reciclaje y/o reutilización), el cual no fue integrado en el presente estudio y que pudiese modificar los resultados obtenidos.

Es importante considerar que no se estimó un valor unitario con el cuál se pudiera comparar fehacientemente cuál de los dos vehículos tiene un menor impacto general. Si no más bien, distintas categorías disgregadas que puedan permitir al lector discernir y decidir cuál presenta una mayor implicancia y relevancia para su análisis y toma de decisiones. Además, hay que mantener presente y considerar que el análisis fue realizado en función de la información disponible y de libre acceso, en este sentido, un análisis más detallado que considere un caso de estudio y un mayor acceso a la información reservada, es crucial para poder obtener resultados más exactos y precisos.

8. Recomendaciones

8.1. Respecto a los resultados

Considerando el análisis llevado a cabo, desde una perspectiva de la reducción de emisiones en operación mina resultando en un menor requerimiento de ventilación (por ende reducción de costos), es importante considerar las emisiones directa relacionadas a la propia combustión de los camiones bajo perfil diésel, por lo que en este sentido, se recomienda la preferencia de vehículos eléctricos para su utilización en labores subterráneas.

Considerando un análisis integrado del ciclo de vida y por tanto de la cadena de valor de la producción y operación de los vehículos, aún falta desarrollo en materia energética “verde”, por lo que se debe optar siempre la utilización de energía eléctrica desde fuentes sustentables, que, en función de lo obtenido, debiese ser con un enfoque hacia la energía eólica y solar.

8.2. Respecto a la información

Los inventarios de ciclo de vida no presentan un fácil acceso, menos así una fácil elaboración considerando la información disponible, o, por el contrario, conllevan un gasto monetario considerable a la hora de poder obtener inventarios previamente realizados con basta información fidedigna, por tanto, si los recursos lo permiten, se recomienda reevaluar los resultados utilizando datos específicos y con un mayor nivel de detalle en torno a cada proceso, optando por la utilización de bases de datos pagadas con un nivel de información y detalle mucho más elevado.

De cualquier forma, los datos recopilados, como se mencionó a lo largo del estudio, se establecen en base a fuentes bibliográficas, por lo que se recomienda realizar una validación exhaustiva por profesionales de cada área, sumado al contacto y participación de los proveedores en la elaboración de los inventarios ocupados, lo cual conllevaría a una evaluación más precisa.

8.3. Respecto a próximos estudios

Se recomienda considerar estudios específicos en materia de elaboración de inventarios enfocados a los equipos mineros. Además, elaborar un inventario específico acorde a la matriz energética nacional de libre acceso. Esto beneficiaría a todo tipo de análisis ambientales y próximos estudios de análisis de ciclo de vida que pudiesen realizarse a nivel nacional.

Además, se recomienda realizar un análisis de ciclo de vida, que integre las disposición final de los elementos consumibles (aceites, neumáticos, otros) y el propio final de ciclo de vida de los vehículos. Si bien, dentro del presente estudio no se consideró la disposición final de los equipos, es importante contemplar que se hará con ellos posterior a su vida en operación, lo cuál puede ser integrado en futuros análisis.

9. Referencias

- AB Volvo Penta. (2013). *Technical Specifications TAD1660-1662VE*. Volvo Penta.
- Acevedo Céspedes, J. C. (2017). *Simulación de sistema de transporte en Minería de Caving, aplicación al Proyecto Nuevo Nivel Mina de División El Teniente*.
- Andreas, R., Serenella, S., & Jungbluth, N. (2020). Normalization and weighting: The open challenge in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1859-1865. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01790-0>
- Annual and Sustainability Reports / Epiroc.* (2019). <https://www.epirocgroup.com/en/sustainability/annual-and-sustainability-reports>
- ARENAS, F. A. J. (2016). *Desarrollo de software de gestión de fallas de equipos móviles de producción mina subterránea (GEFEM) en Codelco Chile–División Andina* [PhD Thesis]. Pontificia Universidad Católica De Valparaíso.
- Artisan Vehicles System Inc. (2020). *Technical Specifications Battery Electric 50 Tonne Haul Truck*.
- Asif, Z., Chen, Z., & Zhu, Z. H. (2019). An integrated life cycle inventory and artificial neural network model for mining air pollution management. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 1847-1856.
- Awuah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1), 82-89.
- Awuah-Offei, K., Checkel, D., & Askari Nasab, H. (2008). *Life Cycle Assessment of Belt Conveyor and Truck Haulage Systems in an Open Pit Mine*.

- Barati, K., & Shen, X. (2015). Modeling Emissions of Construction and Mining Equipment by Tracking Field Operations. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 32, 1.
- Bertolatti, D., Rumchev, K., & Mullins, B. (2011). Assessment of diesel particulate matter exposure among underground mine workers. *Transactions of biomedicine and health*, 15, 11-20.
- Burchart-Korol, D., Fugiel, A., Czaplicka-Kolarz, K., & Turek, M. (2016). Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations. *Science of The Total Environment*, 562, 61-72.
- Burnham, A., Wang, M. Q., & Wu, Y. (2006). *Development and applications of GREET 2.7—The Transportation Vehicle-CycleModel*. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- Carmona-García, U., Cardona-Trujillo, H., & Restrepo-Tarquino, I. (2017). Environmental management, sustainability and competitiveness in mining. Contextualization of situation, and challenges of the approach through the life-cycle assessment. *Dyna*, 84(201), 50-58.
- Caterpillar / Annual Report & Sustainability Report*. (2019).
<https://www.caterpillar.com/en/investors/reports.html>
- Chang, P., & Xu, G. (2017). A review of the health effects and exposure-responsible relationship of diesel particulate matter for underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(5), 831-838.
- Chang, P., Xu, G., Mullins, B., Abishek, S., & Sharifzadeh, M. (2020). Numerical investigation of diesel particulate matter dispersion in an underground development

face during key mining activities. *Advanced Powder Technology*, 31(9), 3882-3896.

<https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.07.031>

Chen, J., Wang, Z., Wu, Y., Li, L., Li, B., Pan, D., & Zuo, T. (2019). Environmental benefits of secondary copper from primary copper based on life cycle assessment in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 35-44.

Chevalier, B., Reyes, T., & Laratte, B. (2011). Methodology for choosing life cycle impact assessment sector-specific indicators. *DS 68-5: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 5: Design for X/Design to X, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08. 2011*, 312-323.

Comisión Nacional de Energía. (2018a). Emisiones GEI Sector Energía por combustible · Comisión Nacional de energía. En *Comisión Nacional de Energía*. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/255021/emisiones-gei-sector-energia-por-combustible/>

Comisión Nacional de Energía. (2018b). Emisiones GEI Sector Energía por subsector · Comisión Nacional de energía. En *Comisión Nacional de Energía*. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/255020/emisiones-gei-sector-energia-por-subsector/>

Comisión Nacional de Energía. (2020a). *Generación Bruta Mensual SEN*.

Comisión Nacional de Energía. (2020b). Generación Bruta Mensual SIC por Tecnología · Comisión Nacional de energía. En *Comisión Nacional de Energía*. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/257057/generacion-bruta-mensual-sic-por-tecnologia/>

- Comisión Nacional de Energía. (2020c). Generación Bruta Mensual SING por Tecnología .
Comision Nacional de Energia. En *Comisión Nacional de Energía*.
<http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/257052/generacion-bruta-mensual-sing-por-tecnologia/>
- CSR & Environmental Report (Archive)*. (2020).
<https://komatsu.disclosure.site/en/themes/121>
- Dallmann, T., & Menon, A. (2016). Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. *International Council on Clean Transportation (ICCT): Washington, DC, USA*.
- Davies, C., Harnisch, J., Lucon, O., Scott, R., & Walsh, M. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 3 Combustión Móvil. *IPCC*, 2.
- Ditsele, O., & Awuah-Offei, K. (2012). Effect of mine characteristics on life cycle impacts of US surface coal mining. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(3), 287-294.
- Dönicke, D. B. (2017a). Cálculo del consumo de combustible y emisiones De co2 de camiones mineros, mediante simulación Discreta. *Revista Ingeniería Industrial*, 16(2), 151-168.
- Dönicke, D. B. (2017b). Cálculo del consumo de combustible y emisiones De co2 de camiones mineros, mediante simulación Discreta. *Revista Ingeniería Industrial*, 16(2), 151-168.
- Durucan, S., Korre, A., & Muñoz-Meléndez, G. (2006). Mining life cycle modelling: A cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry.

Journal of Cleaner Production, 14(12), 1057-1070.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.12.021>

ECORAE. (2013). *Informe de resultados del ACV del proceso*. Universidad de Vigo;

ENERGYLAB.

Environmental, K. (2019). Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed

in Electric Vehicles: The Technical, Environmental, Economic, Energy and Cost

Implications of Reusing and Recycling EV Batteries. *Kelleher Environmental*,

Toronto.

EPA. (2018). *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition*

Engines in MOVES2014b. U.S. Environmental Protection Agency.

Erkayaoğlu, M., & Demirel, N. (2016). A comparative life cycle assessment of material

handling systems for sustainable mining. *Journal of environmental management*, 174,

1-6.

Esfahanian, E., & Meech, J. A. (2013). Hybrid electric haulage trucks for open pit mining.

IFAC Proceedings Volumes, 46(16), 104-109.

Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. P. (2019). Life cycle assessment of cobalt extraction

process. *Journal of Sustainable Mining*, 18(3), 150-161.

Ferat Toscano, C., Martin-del-Campo, C., Moeller-Chavez, G., León de los Santos, G.,

François, J.-L., & Revollo Fernández, D. (2019). Life cycle assessment of a

combined-cycle gas turbine with a focus on the chemicals used in water conditioning.

Sustainability, 11(10), 2912.

Ferreira, H., & Leite, M. G. P. (2015). A Life Cycle Assessment study of iron ore mining.

Journal of cleaner production, 108, 1081-1091.

- Gabriel, J., Wellbrock, P., & Buchmann, M. (2014). Assessment of CO₂-Emissions from Electric Vehicles: State of the Scientific Debate. En *Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future* (pp. 225-241). Springer.
- García Bernal, N. (2019). *Electromovilidad. Tendencias y experiencia nacional e internacional*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27343/1/BCN__Electromovilidad_Experiencias_comparadas_.pdf
- Guerrero González, A. F. (2017). *Simulación de sistema LHD automatizado mediante eventos discretos-aplicación a minería de Caving Proyecto Nuevo Nivel Mina División El Teniente*.
- Gustavsson, F. (2020). *Simulation Study of Charging of EV-Fleets in Underground Mining*.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. (2018). Life cycle assessment. Springer.
- He, F. (2016). *Energy management system for underground mine electric vehicles*. Swinburne University of Technology.
- Hickey, K., & Dickson, N. (2021). *Mounting and dismounting system for a battery assembly* (United States Patent N.º US10926660B2). <https://patents.google.com/patent/US10926660B2/en?q=mounting,dismounting,batteries,vehicle&assignee=Artisan+vehicle>
- HITACHI Sustainability Report*. (2020). <https://www.hitachi.com/sustainability/download/index.html>
- Hollmotz, L. (2013). Safety of lithium ion batteries in vehicles: State of the art, risks and trends. *Proceedings of the 23 rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Seoul, South Korea*.
- Huff, B. (2018). *Heat Generation in battery electric underground haul trucks*.

- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., & Zijp, M. (2017). ReCiPe 2016 v1. 1-A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level: Report I. Characterization (No. RIVM Report 2016-0104a). *National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands*.
- Hyodo, T., Watanabe, D., & Wu, M. (2013). Estimation of energy consumption equation for electric vehicle and its implementation. *Proceedings of the World Conference on Transport Research*, 1-12.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 3: Combustion móvil*. (Vol. 2). IGES.
- Islam, K., Vilaysouk, X., & Murakami, S. (2020). Integrating remote sensing and life cycle assessment to quantify the environmental impacts of copper-silver-gold mining: A case study from Laos. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104630.
- ISO14040—*Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. (2006). <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Jacobs, W., Bräunl, T., & Hodkiewicz, M. (2013). Electric LHDs in Underground Hard Rock Mining: A Cost/Benefit Analysis. *School of Mechanical and Chemical Engineering University of Western Australia*.
- JRC-IES, E. (2010). *ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment*.
- Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O., & Hakkou, R. (2013). Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with

- numerical models. *Journal of Geochemical Exploration*, 125, 117-129.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.018>
- Kim, H. C., & Wallington, T. J. (2016). Life cycle assessment of vehicle lightweighting: A physics-based model to estimate use-phase fuel consumption of electrified vehicles. *Environmental science & technology*, 50(20), 11226-11233.
- Kjosevski, S., Kostikj, A., & Kochov, A. (2017). Risks and safety issues related to use of electric and hybrid vehicles. *Trans Motauto World*, 2(1), 37-40.
- Kotak, Y., Marchante Fernández, C., Canals Casals, L., Kotak, B. S., Koch, D., Geisbauer, C., Trilla, L., Gómez-Núñez, A., & Schweiger, H.-G. (2021). End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies*, 14(8), 2217.
- Liu, D., Xu, L., Sadia, U. H., & Wang, H. (2021). Evaluating the CO₂ emission reduction effect of China's battery electric vehicle promotion efforts. *Atmospheric Pollution Research*, 101115.
- Liu, L. (2020). *Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery pack for Energy storage Systems:-the environmental impact of a grid-connected battery energy storage system.*
- Matsubishi, R., Kudoh, Y., Yoshida, Y., Ishitani, H., Yoshioka, M., & Yoshioka, K. (2000). Life cycle of CO₂-emissions from electric vehicles and gasoline vehicles utilizing a process-relational model. *The international journal of life cycle assessment*, 5(5), 306-312.
- McEntee, J. C., & Ogneva-Himmelberger, Y. (2008). Diesel particulate matter, lung cancer, and asthma incidences along major traffic corridors in MA, USA: A GIS analysis. *Health & Place*, 14(4), 817-828. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2008.01.002>

- Menoufi, K. A. I. (2011). *Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: A state of the art*.
- Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., & Long, R. T. (2012). *Lithium-ion batteries hazard and use assessment*. Springer Science & Business Media.
- Ministerio de Energía. (2019). *Carbono neutralidad en el sector energía. Proyección de consumo energético nacional 2020*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf
- Ministerio de Energía. (2020). *Planificación energética de largo plazo. Informe de actualización de antecedentes 2020*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20201230_actualizacion_pelp_-_iaa_2020_1.pdf
- Mohankumar, S., & Senthilkumar, P. (2017). Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1227-1238.
- Morla, R., & Karekal, S. (2017). *Diesel particulate matter investigations in underground coal mines*.
- Moro, A., & Helmers, E. (2017). A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 4-14. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0954-z>
- Moscoso, R. O. A. (2018). La Industria y sus efectos en el cambio climático Global. *RECIAMUC*, 2(2), 595-611.

- Nealer, R., & Hendrickson, T. P. (2015). Review of recent lifecycle assessments of energy and greenhouse gas emissions for electric vehicles. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 2(3), 66-73.
- Ngele, A. (2017). *Review of Australian diesel particulate matter standard for underground coal mines*.
- OAM, L. S. (2012). Reducing emissions associated with electric vehicles. En *Sustainable Automotive Technologies 2012* (pp. 169-175). Springer.
- Orellana Oporto, B. A. (2019). *Modelación y estimación de esfuerzos en un camión tolva*.
- Parreira, J. (2013). *An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system* [PhD Thesis]. University of British Columbia.
- Pell, R., Tijsseling, L., Palmer, L. W., Glass, H. J., Yan, X., Wall, F., Zeng, X., & Li, J. (2019). Environmental optimization of mine scheduling through life cycle assessment integration. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 267-276.
- Pell, R., Wall, F., Yan, X., Li, J., & Zeng, X. (2019). Mineral processing simulation based-environmental life cycle assessment for rare earth project development: A case study on the Songwe Hill project. *Journal of environmental management*, 249, 109353.
- Petrauskienė, K., Skvarnavičiūtė, M., & Dvarionienė, J. (2020). Comparative environmental life cycle assessment of electric and conventional vehicles in Lithuania. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119042.
- Protocol, G. G., & Initiative, G. G. P. (2004). A corporate accounting and reporting standard. *World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development*.

- Prudencio Ríos, G. R., & Pino Carhuacho, D. J. (2021). *Propuesta de uso de equipo LHD a batería como alternativa competitiva frente al equipo diésel en el proceso de limpieza de labores subterráneas horizontales en una operación minera mecanizada.*
- Rafi, M. A. H., Rennie, R., Larsen, J., & Bauman, J. (2020). Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines. *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 1081-1087.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, *30*(5), 701-720.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- Reinhart, T. E. (2015). *Commercial medium-and heavy-duty truck fuel efficiency technology study-Report# 1.*
- Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A., & Ferguson, M. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*, *185*, 64-77.
- Rodríguez, B. I. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IiE*, 91-97.
- Saayman, F. R. (2006). Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *106*(2), 77-86.
- Sáez Garrido, K. T. (2019). *Diseño de nivel de producción alternativo en Block/Panel Caving.*

- Sandvik. (2011). *Technical Specification TH550*. Sandvik Mining and Construction.
- Sandvik Annual Report 2019—Home*. (2019). Sandvik Annual Report 2019.
<https://www.annualreport.sandvik/en/2019/>
- Schmidt, W.-P., & Sullivan, J. (2002). Weighting in Life Cycle assessments in a global context. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(1), 5.
<https://doi.org/10.1007/BF02978904>
- Science for Environment Policy. (2018). *Towards the battery of the future. Future Brief 20*. European Commission DG Environment by the Science Communication Unit
European Commission DG Environment by the Science Communication Unit.
<http://ec.europa.eu/science-environment-policy>
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of power sources*, 195(9), 2419-2430.
- Sobol, \Lukasz, & Dyjakon, A. (2020). The Influence of Power Sources for Charging the Batteries of Electric Cars on CO2 Emissions during Daily Driving: A Case Study from Poland. *Energies*, 13(16), 4267.
- Song, X., Pettersen, J. B., Pedersen, K. B., & Røberg, S. (2017). Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 164, 892-904.
- Sotos, M. (2015). GHG protocol scope 2 guidance. *An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*.
- Spitthoff, L., Shearing, P. R., & Burheim, O. S. (2021). Temperature, Ageing and Thermal Management of Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 14(5), 1248.
- Suárez Tamayo, S., & Molina Esquivel, E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista cubana de higiene y epidemiología*, 52(3), 357-363.

- Sullivan, J. L., Burnham, A., & Wang, M. (2010). *Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing*. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- Tornehed, P. (2010). *Particulate emissions associated with diesel engine oil consumption* [PhD Thesis]. KTH.
- Uribe Neira, P. A. (2014). *Análisis de la funcionalidad y desempeño de la operación semiautónoma en equipos de carga; acarreo y descarga en minería subterránea Load Haul-Dump Vehicle (LHD)*.
- Valenzuela Núñez, F. R. (2017). *Estimación de la producción en sector Diablo Regimiento, mina El Teniente, mediante simulación a eventos discretos*.
- Van Genderen, E., Wildnauer, M., Santero, N., & Sidi, N. (2016). A global life cycle assessment for primary zinc production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1580-1593.
- Van Mierlo, J., Messagie, M., & Rangaraju, S. (2017). Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. *Transp. Res. Procedia*, 25, 3435-3445.
- van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., van den Broek, M., & Faaij, A. (2011). Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2298-2310. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119>
- Varaschin, J. (2016). *The Economic Case for Electric Mining Equipment and Technical Considerations Relating to their Implementation* [PhD Thesis]. Queen's University (Canada).

- Wallace Jr, K. G., Prosser, B. S., Donoso, J. R., Guerrero, A. F., & Acevedo, J. C. (2012). Ventilation system design for the CODELCO New Level Project. *Proceedings of the 14th North American Mine Ventilation Symposium, Salt Lake City, UT.*
- Wang, J., Besselink, I., & Nijmeijer, H. (2018). Battery electric vehicle energy consumption prediction for a trip based on route information. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(11), 1528-1542.
- Weidema, B., Wenzel, H., Petersen, C., & Hansen, K. (2004). The product, functional unit and reference flows in LCA. *Environmental News*, 70, 1-46.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218-1230.
- Wolff, S., Seidenfus, M., Gordon, K., Álvarez, S., Kalt, S., & Lienkamp, M. (2020). Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production. *Sustainability*, 12(13), 5396.
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 52-67.
- Zhang, L., Wang, J., & Feng, Y. (2018). Life cycle assessment of opencast coal mine production: A case study in Yimin mining area in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8475-8486.
- Zheng, Y. (2011). *Diesel particulate matter dispersion analysis in underground metal/nonmetal mines using computational fluid dynamics.*

Zheng, Y., He, X., Wang, H., Wang, M., Zhang, S., Ma, D., Wang, B., & Wu, Y. (2020). Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(3), 355-370.

10. Anexos

10.1. Anexo A: Metodología ReCiPe Midpoint (H)

La metodología ReCiPe fue desarrollada inicialmente el año 2008 para estimar, comparar o identificar fases en el proceso productivo que tomen lugar a un nivel relativamente alto de carga sobre el ambiente (Huijbregts et al., 2017). Esta metodología estima cuantitativamente los impactos (Ver ecuación (2)) en torno a tres áreas principales: salud humana, calidad de los ecosistemas y la escasez de los recursos. Esto lo hace por medio de distintos “mecanismos ambientales” los cuales define como categorías de impacto de punto medio (Midpoint) (Ver Tabla 28) las cuales son abarcadas en este estudio.

Tabla 28. Categorías de impacto y su descripción. Método ReCiPe Midpoint (H) v1.13. Adaptado de Ferat Toscano et al., (2019).

Categoría de impacto	Descripción
Cambio climático	Aumento de la temperatura en la atmósfera por la emisión de gases de efecto invernadero como CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, entre otros.
Agotamiento de los combustibles fósiles	Agotamiento de los recursos que contienen hidrocarburos, por ejemplo, materiales volátiles (metano, gasolina) y materiales no volátiles (antracita).
Radiación ionizante	La emisión de material radiactivo al medio ambiente que provoca efectos en la salud, dependiendo del nivel de exposición.
Ocupación de terreno urbano	La biodiversidad depende del tamaño de la zona y del uso del suelo. La fauna y la flora se ven afectadas por la ocupación de la tierra. La unidad utilizada se refiere a la superficie ocupada o transformada por unidad de tiempo.
Ocupación de terreno agrícola	
Agotamiento de los metales	Medida de agotamiento de metales y minerales metálicos.
Acidificación terrestre	Ácidos inorgánicos liberados a la atmósfera -como sulfatos, nitratos y fosfatos- que provocan cambios en la acidez del suelo.
Toxicidad humana	Medida de las sustancias peligrosas que son tóxicas o peligrosas para las personas y/o los ecosistemas. Los impactos sobre la salud dependen de cada sustancia la vía de exposición, la dosis recibida y las condiciones de salud de la persona expuesta, entre otros factores.
Ecotoxicidad terrestre	
Ecotoxicidad marina	
Ecotoxicidad de agua fresca	
Formación de oxidante fotoquímicos	Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno (NO _x) reaccionan con compuestos orgánicos volátiles (VOC) para producir ozono troposférico, que provoca el cambio climático.
Formación de material particulado	Las partículas muy pequeñas (menos de 10 micras de diámetro) de sustancias orgánicas e inorgánicas afectan a las vías respiratorias y a los pulmones cuando se inhalan.
Eutroficación marina	Medida de la acumulación de nutrientes (nitrógeno, fósforo u otros compuestos de carbono compuestos de carbono) en el agua que sobre estimulan el crecimiento de las plantas, lo que reduce el nivel de O ₂ .
Eutroficación de agua fresca	
Transformación de terreno natural	Transformación de terrenos o áreas naturales que tienen una alta intervención humana, como los terrenos urbanos y agrícolas.
Agotamiento del ozono	Es una medida de la capacidad de agotamiento de la capa de ozono por la emisión de sustancias antropogénicas, como los clorofluorocarbonos (CFC). Utiliza el CFC-11 (triclorofluorometano) como referencia.
Agotamiento del agua	Medida de la cantidad de agua utilizada.

Es importante mencionar, que, si bien la metodología entrega dos alcances en sus resultados, ambos presentan diferencias en torno a las incertidumbres asociadas y su interpretación, siendo los resultados intermedios (Midpoint) los que presentan una baja incertidumbre, pero ambiguos a la interpretación de personas no técnicas, y por el contrario, están los resultados finales (Endpoint), los que presentan una alta incertidumbre pero presentan mayor facilidad a la hora de interpretarlos (ECORAEE, 2013).

El método de cálculo de indicadores se resume a la multiplicación de las emisiones por un factor de caracterización, el cuál es único para cada emisión y cada categoría correspondiente. ReCiPe presenta tres factores de emisión para cada emisión y/o categoría de acuerdo con tres perspectivas que dan cuenta de aspectos que van desde el tiempo hasta aspectos como el espacio o el desarrollo tecnológico (Huijbregts et al., 2017):

- Perspectiva Individualista (I): basado en un interés de corto plazo (horizonte temporal de 20 años), con una visión optimista acerca del desarrollo tecnológico y la adaptación humana;
- Perspectiva Jerárquica (H): basada en un consenso científico respecto al tiempo no mayor a 100 años, usualmente usado como línea base;
- Perspectiva Igualitaria (I): la que es definida como la perspectiva más cautelosa, tomando en consideración un plazo de estimación no mayor a 1000 años y tomando en cuenta todas las vías de impacto de las que se disponen datos.

10.2. Anexo B: Antecedentes

Tabla 29. Normativas estandarizadas para la aplicación de Análisis de Ciclo de Vida.

Nomenclatura	Título	Año publicación
ISO 14040	Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.	2006
ISO 14044	Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices	2006
ISO 14045	Gestión Ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia de los sistemas de productos. Principios, requisitos y directrices.	2012
ISO 14046	Gestión medioambiental - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices.	2014
ISO 14047	Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar ISO 14044 a situaciones de evaluación de impacto.	2012
ISO 14048	Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Formato de documentación de datos.	2002
ISO 14049	Gestión medioambiental - Evaluación del ciclo de vida - Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar la ISO 14044 a la definición de objetivos y alcance y al análisis de inventario.	2012
ISO 14071	Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Procesos de revisión crítica y competencias del revisor: Requisitos y directrices adicionales a ISO 14044: 2006.	2014
ISO 14072	Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices para la evaluación del ciclo de vida de la organización.	2014
ISO 14073	Gestión medioambiental - Huella hídrica - Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar ISO 14046	2016

Tabla 30. Estudios de análisis de Ciclo de Vida realizados en la industria minera.

Autor / Año	Objetivo	Unidad funcional	Categorías de impacto
(Carmona-García et al., 2017)	Analizar cómo se involucra el concepto de sostenibilidad en las operaciones mineras, y como a través del ACV es posible demostrar el avance en este tema.	-	Agotamiento del recurso hídrico, agotamiento de los recursos abióticos.
(Ferreira & Leite, 2015)	Evaluar el efecto de las actividades mineras y del procesamiento de la cuna-a-la-tumba de una mina de hierro en Brasil.	Una tonelada de concentrado de hierro producido.	Salud humana, sustancias carcinógenas, material orgánico inhalable, cambio climático, radiación, agotamiento de ozono, daño al ecosistema, ecotoxicidad, acidificación, eutroficación, uso de terreno, agotamiento de recursos naturales, agotamiento de recursos minerales, agotamiento de combustible fósil, emisiones de gases de efecto invernadero.
(Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011)	Presentar una revisión de la aplicación actual de ACV en la industria minera.	Múltiples Unidades funcionales (6 en total): Awuah-Offei et al. (2008a) - 4,000 t/h de roca repartida. Bovea et al. (2007) - 1 t de arcilla producida.	Calentamiento global, agotamiento del ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática del agua fresca, acidificación y potencial de eutroficación.
(Asif et al., 2019)	Desarrollar el inventario de contaminación del aire utilizando el método de matriz inversa y la estimación de la evaluación de impacto de punto medio.	1278 t/h de metal producido durante el procesamiento.	Toxicidad humana, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre.
(Van Genderen et al., 2016)	Actualizar el ACV promedio de producción global de zinc primario.	Producción de 1 Mt de SHG zinc con una pureza de al menos 99.99% de zinc.	Calentamiento global, potencial de acidificación, potencial de eutroficación, potencial de creación de ozono fotoquímico y potencial de agotamiento de la capa de ozono.

Continuación **Tabla 30.** Estudios de análisis de Ciclo de Vida realizados en la industria minera..

Autor / Año	Objetivo	Unidad funcional	Categorías de impacto
(Burchart-Korol et al., 2016)	Formulación de un modelo de ACV computacional para las operaciones mineras de carbón y la aplicación del modelo desarrollado para la evaluación ambiental de los procesos de minería del carbón en el caso nacional.	1 Mg de carbón procesado.	Calentamiento global, cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, radiación ionizada, acidificación terrestre, eutroficación de agua fresca, eutroficación terrestre, ecotoxicidad de agua fresca, ecotoxicidad marina, ocupación de terreno agrícola, ocupación de terreno urbano, transformación de terreno natural, agotamiento de metal, agotamiento de fósiles.
(Ditsele & Awuah-Offei, 2012)	Entender el efecto de las características de la mina en los impactos del ciclo de vida desde la cuna a la tumba de la minería de carbón superficial en USA.	Una tonelada de carbón procesado.	Uso de agua, uso de terreno, uso de energía, agotamiento de recursos abióticos, cambio climático.
(Pell, Tijsseling, et al., 2019)	Medir el impacto al calentamiento global de la minería y el transporte de un bloque material para una mina de hierro.	Un bloque entregado en la mina, sin incluir chancado, molienda u otro procesamiento.	Calentamiento global.
(Song et al., 2017)	Evaluar los impactos ambientales de la mina de cobre Nussir e identificar puntos críticos ambientales. Comparar los impactos de las energías alternativas y las opciones de manejo de relaves en relación con el desempeño ambiental general de la mina.	Dos escenarios considerando como unidad funcional 1 kg de cobre en concentrado producido, y un tercer escenario considerando como unidad funcional 1 kg de cobre como suma del concentrado y el cobre recuperado desde el relave.	Cambio climático, agotamiento de ozono, acidificación terrestre, eutroficación de agua fresca, eutroficación marina, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua fresca, radiación ionizante, ocupación de terreno agrícola, ocupación de terreno urbano, transformación de terreno natural, agotamiento del agua, agotamiento de los recursos minerales y el agotamiento de los combustibles fósiles.

Continuación **Tabla 30.** Estudios de análisis de Ciclo de Vida realizados en la industria minera..

Autor / Año	Objetivo	Unidad funcional	Categorías de impacto
(Islam et al., 2020)	Cuantificar los impactos ambientales de la minería del cobre mediante el potencial de calentamiento global.	1 kg de cobre en concentrado.	Calentamiento global y requerimiento de energía bruta.
(Farjana et al., 2019)	Analizar el impacto medio ambiental, de la cuna a la tumba, de la producción de cobalto.	1 kg de cobalto	Cambio climático, ecotoxicidad, toxicidad humana, eutroficación, acidificación, uso de aguas y uso de terreno.
(Pell, Wall, et al., 2019)	Comparar los costos medioambientales de diferentes escenarios de ácidos y energía.	Producción de 1 kg de REO.	Acidificación, ecotoxicidad, eutroficación, calentamiento global, emisión de material particulado, toxicidad humana, formación de ozono.
(Zhang et al., 2018)	Analizar los impactos ambientales de la minería de carbón a cielo abierto, determinar la contaminación y el consumo energético e identificar el factor clave en el impacto ambiental de estas categorías, proponer medidas viables para reducir el impacto de la minería de carbón a cielo abierto.	Producción de 100 ton de carbón.	Consumo de recursos, acidificación, calentamiento global, desechos sólidos, eutroficación y emisión de polvos.
(Chen et al., 2019)	Evaluar el potencial de impacto ambiental de las tecnologías de producción de cobre primario y cobre secundario.	Producción de 1000 kg de cobre refinado (cátodo de 99.99% de cobre).	Potencial de agotamiento abiótico, potencial de acidificación, potencial de eutroficación, potencial de calentamiento global, toxicidad humana y potencial de creación de ozono fotoquímico.

Tabla 31. Estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a distintos vehículos y fuentes de impulsión.

Autor / Fecha	Objetivo	Unidad Funcional	Categorías de impacto
(Faias et al., 2014).	Comparar el consumo de energía y las emisiones de CO2 de distintos vehículos, asumiendo desde la manufactura de materiales hasta la disposición final del vehículo.	Energía: Consumo específico (L/100km o kWh/100km); CO2: emisión específica (CO2/km).	Consumo energético y emisiones de CO2.
(Van Mierlo et al., 2017).	Cuantificar y comparar los impactos ambientales del ciclo de vida de vehículos con impulsión eléctrica, Biogas, (plug-in) híbrido, y GNC.	1 km de distancia conducida.	Calentamiento global, formación de oxidantes fotoquímicos, formación de material particulado, toxicidad humanada y agotamiento de materiales.
(Hawkins et al., 2013).	Proporcionar un ACV comparativo a nivel de alcance de un ICEV convencional y un EV de baterías.	1 kilómetro conducido bajo condiciones promedio europeas.	Calentamiento global, acidificación terrestre, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua fresca, toxicidad terrestre, eutroficación de agua fresca, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de recursos fósiles.
(Helmers et al., 2020).	Proporcionar un ACV comparativo de un automóvil eléctrico frente a uno de combustión interna.	150 000 o 200 000 km conducidos.	18 categorías del método de caracterización ReCiPe 2012.
(Nordelöf et al., 2014).	Investigar el uso de diferentes estudios ACV para la electrificación de vehículos y examinar la inconsistencia de resultados observados de literatura general.	Vida útil de un vehículo especificado en kilómetros totales conducidos.	Calentamiento global, potencial de creación de foto-oxidantes, potencial de eutroficación, potencial de acidificación, potencial de agotamiento de recursos abióticos, potencial de toxicidad humana.

Continuación Tabla 31. Estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a distintos vehículos y fuentes de impulsión.

Autor / Fecha	Objetivo	Unidad Funcional	Categorías de impacto
(de Souza et al., 2018).	Evaluar el uso de combustible existente y fuentes alternativas de suministro de energía para vehículos en Brasil.	1 kilómetro conducido.	Calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de abiótico, agotamiento de combustible fósiles abióticos, toxicidad humana, formación de oxidantes fotoquímicos, potencial de acidificación y potencial de eutroficación.
(Desantes et al., 2020)	Estimar y comparar emisiones de GEI-100 y NOX entre vehículos en base a H2 frente a los vehículos convencionales, híbridos y eléctricos.	Producción de combustible: MJ de combustible; Ciclo de producción de vehículos: por vehículos manufacturado; Análisis de la cuna a la tumba: vida útil de vehículo de 150 000 km conducido.	Calentamiento global y emisiones de gases NOx.
(Marmiroli et al., 2020).	Comparar el desempeño de un vehículo eléctrico liviano frente a dos vehículos livianos, diésel y GNC.	1 km conducido en condiciones definidas.	Calentamiento global, demanda acumulada de energía, agotamiento abiótico, potencial de acidificación, formación de oxidantes fotoquímicos y potencial de eutroficación.
(Petrauskienė et al., 2020).	Evaluar y comparar los impactos ambientales asociados a la producción, uso y disposición de vehículos eléctricos y convencionales.	1 km de distancia conducida.	Cambio Climático, toxicidad humana, radiación ionizada, agotamiento de metales, agotamiento de fósiles, salud humana, calidad de ecosistema y escases de recursos.

Continuación Tabla 31. Estudios de análisis de ciclo de vida aplicados a distintos vehículos y fuentes de impulsión.

Autor / Fecha	Objetivo	Unidad Funcional	Categorías de impacto
(Yang et al., 2018).	Evaluar las emisiones de GEI y el TCO de camiones diésel, camiones eléctricos plug-in y camiones eléctricos battery-swap.	Unidad de indicador por camión, limitado a una vida útil de 10 años y 240 000 km conducidos.	Calentamiento global.
(Del Pero et al., 2018).	Evaluar el perfil medioambiental de un auto de referencia con configuración ICE y eléctrico.	150 000 km conducidos por el auto.	Acidificación, Cambio climático, Ecotoxicidad del agua fresca, eutroficación del agua fresca, eutroficación marina, eutroficación terrestre, toxicidad humana, radiación ionizada, uso de terreno, agotamiento de ozono, material particulado/inorgánicos respirables, formación de ozono fotoquímico, agotamiento de recursos de agua, agotamiento de recursos minerales, fósiles y renovables.
(Jwa & Lim, 2018).	Comparar los efectos en la reducción de emisión de gases de efecto invernadero en buses eléctricos a batería frente a buses diésel.	Km conducidos por el bus.	Calentamiento global y consumo energético.
(Rupp et al., 2018).	Comparación de impactos ambientales del ciclo de vida asociados a camión pesado convencional frente a una impulsión híbrida.	El transporte de 1 tonelada por una distancia de 1 kilómetro.	Calentamiento global y agotamiento abiótico.
(Sen et al., 2020).	Cuantificar, evaluar y comparar los macro impactos ambientales de equipos pesados automátatas.	Unidad de indicador por camión (Por ejemplo, GWP/camión)	Calentamiento global, formación de material particulado, formación de oxidantes fotoquímicos, escasez de recursos minerales.
(El Hannach et al., 2019).	Evaluar el beneficio potencial derivado de la introducción del concepto combustible dual hidrógeno/diésel como solución de retrofitting.	Km conducidos en la Vida útil de un equipo, considerado como 287 278 km por año.	Calentamiento global, cambio climático, calidad del aire y salud pública.

10.3. Anexo C: Planteamiento de caso base – “Mina Tipo”

Tabla 32. Modelos de camiones de bajo perfil ofrecidos por los principales proveedores del mercado. Elaboración propia.

OEM*	Modelos	Capacidad [ton]	Capacidad Tolva [m ³]	Potencia de motor [kW]
Caterpillar	AD22	22	9	242
	AD30	30	14.4	305
	AD45/B	45	21.3	420
	AD60	60	26.9	600
	AD63	63	26.9	593
Sandvik	TH315	15	7.5	185
	TH320	20	10.5	240
	TH430L	30	15	310
	TH430	30	14.5	310
	TH330	30	16.5	240
	TH540	40	22	405
	TH545	45	22	450
	TH550	50	20	450
	TH551	51	28	515
	TH663	63	36	565
	TH680	80	37	317
Fambition	FT12	12	6	136
	FT15	15	7.5	136
	FT20	20	10	224
	FT30	30	15	315
Komatsu	Joy 7TD	6.6	3.3	72
	Joy 16TD	16	8	179
	Joy DT3504	31.7	17.4	298
Epiroc	MT2010	20	7.1	224
	MT2200	22	9	242
	MT431B	28.1	12.3	298
	MT436LP	32.6	12.6	298
	MT436B	32.6	10.5	298
	MT42	42	15	399
	MT5020	50	18.5	485
	MT54	54	18.2	567
	MT65	65	22.1	567
	MT6020	60	26.6	567

*OEM: Original Equipment Manufacturer (Fabricante de equipo original)

10.4. Anexo D: Inventario Matriz Energética

Tabla 33. Inventario de producción de combustible [1 kg] y generación eléctrica [1 kWh].

Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Diésel			
Diésel grado B	1	kg	Diesel, low-sulfur {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Electricidad - Chile (2020). Adaptado de Comisión Nacional de Energía, (2020).			
Energía eólica	0.070984753	kWh	electricity from wind power
Energía geotérmica	0.003177468	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, deep geothermal Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía carbón	0.350547344	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hard coal Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (represa)	0.121076847	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	0.144466298	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía gas natural + LNG	0.176328045	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fuel oil	0.008860286	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fotovoltaica	0.098008569	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent

10.5. Anexo E: Inventario Manufactura equipo Diesel

Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente base de datos</i>
Tolva. Adaptado de Sandvik, (2011), Komatsu America, (2007) y Skone, (2010).			
Steel Mass	3284.78	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Ejes+Upbox+Dropbox. Adaptado de Sandvik, (2011), Atlas Copco, (2010), Avikal et al., (2020) y Azom, (2012).			
Steel Mass	6598.00	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Suspensión. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Burnham et al., (2006).			
Steel Mass	832.60	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Iron Mass	289.60	kg	Cast iron {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	36.20	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Iron milling - Electricity	42.86	kWh	Electricidad - Chile
Escape. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Burnham et al., (2006).			
Steel Mass	949.60	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Platinum Mass	0.15	kg	Platinum
Steel - Electricity	450.18	kWh	Electricidad - Chile
Alternador. Adaptado de Sandvik, (2011), Iskra,(s. f.),Sawyer-Beaulieu, (2009), Sullivan et al., (2010b) y S. S. Yang et al., (2015).			
Steel	8.00	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aluminium	2.00	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Iron	8.00	kg	Cast iron {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Copper	12.00	kg	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aceite de Motor. Adaptado de Atlas Copco, (2010) y Yanmar, (2015)			
Aceite lubricante	46.38	kg	Lubricating oil {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.

Componente	Masa	Unidad	Fuente base de datos
<i>Motor. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006) y AB Volvo Penta, 92013).</i>			
Steel Mass	480.00	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Iron Mass	720.00	kg	Cast iron [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	72.00	kg	Synthetic rubber [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Aluminium Mass	240.00	kg	Aluminium, cast alloy [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	7.704	kg	Epoxy liquid, from Bisphenol A; technology mix; production mix, at plant
Plastic Mass	5.112	kg	Ethylene propylene diene elastomer (EPDM)
Plastic Mass	0.792	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Plastic Mass	5.04	kg	nylon 66 granulate (PA 66)
Plastic Mass	2.52	kg	Polycarbonate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.224	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.008	kg	Polyethylene, high density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.008	kg	Polyethylene, linear low density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.008	kg	Polyethylene, low density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	0.504	kg	Polystyrene production, high impact
Plastic Mass	0.504	kg	Polystyrene, general purpose [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic Mass	8.784	kg	Polyurethane, flexible foam [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic Mass	8.352	kg	Polyurethane, rigid foam [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	9.936	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	13.032	kg	Propylene [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Primary Copper Mass	13.60	kg	Copper [RER] production, primary Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Secondary Copper Mass	2.40	kg	Clean scrap
Assembly	1032.30	kWh	Electricidad - Chile
Iron milling	106.53	kWh	Electricidad - Chile
Tanque Combustible. Adaptado de Wolff et al., Nunes de Brito, (2018), (2020), Burnham et al., (2006) y Komatsu America, (2007)			
Steel low alloyed	86.82	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Chromium steel (18/8)	173.64	kg	
Production	254.93	kWh	Electricidad - Chile

Continuación **Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente base de datos</i>
Transmisión. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006), Sandvik, (2011), Dana, (2013) y Atlas Copco, (2010).			
Steel Mass	1025.40	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	85.45	kg	Synthetic rubber [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Aluminium Mass	512.70	kg	Aluminium, cast alloy [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	6.4942	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Plastic Mass	9.14315	kg	Epoxy liquid, from Bisphenol A; technology mix; production mix, at plant
Plastic Mass	6.06695	kg	Ethylene propylene diene elastomer (EPDM)
Plastic Mass	0.93995	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Plastic Mass	5.9815	kg	nylon 66 granulate (PA 66)
Plastic Mass	2.99075	kg	Polycarbonate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.45265	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.1963	kg	Polyethylene, high density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.1963	kg	Polyethylene, linear low density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	1.1963	kg	Polyethylene, low density, granulate [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	0.59815	kg	Polystyrene production, high impact
Plastic Mass	0.59815	kg	Polystyrene, general purpose [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic Mass	10.4249	kg	Polyurethane, flexible foam [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic Mass	9.9122	kg	Polyurethane, rigid foam [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	11.7921	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic Mass	15.46645	kg	Propylene [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Assembly	3892.77	kWh	Electricidad - Chile
Aluminium	182.57	kWh	Electricidad - Chile
Steel	485.62	kWh	Electricidad - Chile
Heat	2923.70	kWh	Heat, district or industrial, natural gas [RoW] market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, S - Copied from Ecoinvent

Continuación **Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente base de datos</i>
Batería. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006) y Volvo Truck, (2009).			
Lead, primary Mass	18.69	kg	Lead (99.995%)
Lead, secondary Mass	42.06	kg	Lead sheet
Copper Mass	0.89	kg	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Fiberglass Mass	1.78	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Sulfuric acid Mass	7.12	kg	Sulfuric acid {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Water Mass	12.46	kg	Water
Antimony Mass	0.63	kg	Antimony
Arsenic Mass	0.03	kg	arsenic
Polyethylene Mass	0.76	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polypropylene Mass	2.80	kg	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Oxygen Mass	2.01	kg	oxygen
Diesel	2.55	kWh	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
LPG	3.47	kWh	Liquefied petroleum gas (LPG; 70% propane; 30% butane)
Electricity	121.17	kWh	Electricidad - Chile
Heat	42.24	kWh	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Neumáticos. Adaptado de Sandvik, (2011), Doublecoin, (2021), Grammelis et al., (2021), Pizarro Valenzuela, (2013), Vargas & Campos, (2015) y Pehlken & Essadiqi, (2005).			
Natural Rubber	1066.00	kg	Natural rubber_production mix_at plant_ World_S
Synthetic Rubber (SBR)	266.50	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Carbon Black	572.00	kg	Carbon black, general purposes
Silica	78.00	kg	Silica sand {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Steel	599.30	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Zinc Oxide	13.00	kg	Zinc oxide {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Assembly - Electricity	1102.28	kWh	Electricidad - Chile
Heat	4518.82	kWh	Heat, central or small-scale, natural gas {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 34. Inventario de manufactura de vehículo diésel.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fuente base de datos</i>
Chasis. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Burnham et al., (2006).			
Steel Mass	11716.45	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aluminium Mass	2184.42	kg	Aluminium, cast alloy [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cilindros. Adaptado de Atlas Copco, (2010) y Jun et al., (2019).			
Nitrile Butadiene Rubber (NBR)	0.16	kg	Nitrile rubber (NBR)
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.11	kg	Polytetrafluoroethylene granulate (PTFE)
Urethane	1.46	kg	Polyurethane, rigid foam [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rolled steel material for the general structure (reinforcing steel)	24.31	kg	Reinforcing steel [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Bronze	8.93	kg	Bronze [RoW] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Chrome molybdenum steel (Chromium steel 18/8)	573.64	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Carbon Steel	657.38	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cabina. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006), Atlas Copco, (2010) y Sandvik, (2011).			
Steel Mass	1255.43	kg	Steel, low-alloyed [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	4.29	kg	Synthetic rubber [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Aluminium Mass	37.25	kg	Aluminium, cast alloy [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Duroplast Mass	80.91	kg	Phenolic resin [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Thermoplast Mass	97.97	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Copper Mass	11.54	kg	Copper [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Magnesium Mass	1.97	kg	Magnesium ingot
Zinc Mass	0.82	kg	Zinc [GLO] market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Glass Mass	60.61	kg	Flat glass, uncoated [RER] production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Assembly	943.18	kWh	Electricidad - Chile
Heat	2351.95	kWh	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Water	31453.87	kg	Water
Oxygen	0.12	kg	oxygen
Nitrogen	0.25	kg	dinitrogen
Carbon dioxide	0.54	kg	Carbon dioxide (land use change)

10.6. Anexo F: Inventario Manufactura equipo eléctrico

Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Controlador. Adaptado de Burnham, (2012).			
Steel	0.22	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cast Al	2.07	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Copper	0.36	kg	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber	0.16	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic	0.079587	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Plastic	0.11205	kg	Epoxy liquid, from Bisphenol A; technology mix; production mix, at plant
Plastic	0.074351	kg	Ethylene propylene diene elastomer (EPDM)
Plastic	0.011519	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Plastic	0.073304	kg	nylon 66 granulate (PA 66)
Plastic	0.036652	kg	Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.017802	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.014661	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.014661	kg	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.014661	kg	Polyethylene, low density, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.00733	kg	Polystyrene production, high impact
Plastic	0.00733	kg	Polystyrene, general purpose {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic	0.127758	kg	Polyurethane, flexible foam {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic	0.121475	kg	Polyurethane, rigid foam {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.144514	kg	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Plastic	0.189543	kg	Propylene {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Motores. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Wolff et al., (2020) y Nordelöf et al., (2019).			
Aluminum - Inflow	523462.8	g	Aluminum, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Copper - Inflow	160173.6	g	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Liquid enamel, polyester share - Inflow	7129.371	g	Polyester resin, unsaturated {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Liquid enamel, xylene solvent share - Inflow	3821.6	g	Xylene
Liquid epoxy resin - Inflow	9955.428	g	epoxy resin
Liquid varnish, solvent share - Inflow	5330.971	g	Naphtha {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Low-alloy carbon steel - Inflow	83015.42	g	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Magnet fixation resin, methacrylate ester - Inflow	1798.4	g	Polymethylmethacrylate granulate (PMMA)
Mica tape, glass fiber cloth content - Inflow	224.8	g	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Mica tape, mica content - Inflow	834.9714	g	Silica sand {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Mica tape, silicone bond content - Inflow	128.4571	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Nickel - Inflow	417.4857	g	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Nylon lacing cord - Inflow	192.6857	g	Nylon 6 granulate (PA 6)
PBT granulates - Inflow	4463.885	g	Polybutylene terephthalate granulate (PBTP)
PET granulates - Inflow	4785.028	g	Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Phenolic resin - Inflow	1252.457	g	Phenolic resin {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Silica filler in epoxy resin - Inflow	3147.2	g	Silica sand {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Silicone granulates - Inflow	899.1999	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Stainless steel, 18/8 grade - Inflow	32435.43	g	Steel, chromium steel 18/8 {RER} steel production, converter, chromium steel 18/8 Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Unalloyed steel - Inflow	1438720	g	Steel, unalloyed {RER} steel production, converter, unalloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Electricity, die casting - Inflow	1268.514	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, electrical steel - Inflow	790.0114	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, enameling - Inflow	83.49714	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, magnet production chain - Inflow	770.7428	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, motor factory - Inflow	497.7714	kWh	Electricidad - Chile

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Motores. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Wolff et al., (2020) y Nordelöf et al., (2019).			
Heat, from natural gas - Inflow	5266.742	MJ	Heat, central or small-scale, natural gas {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Argon shielding gas - Inflow	802.8571	g	argon, liquid
Caustic soda - Inflow	32.11428	g	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cutting fluid - Inflow	15157.94	g	Naphtha {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Quenching fluid, concentrated - Inflow	67439.99	g	Propylene glycol, liquid {RoW} market for propylene glycol, liquid Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Quicklime powder - Inflow	1573.6	g	Quicklime, milled, packed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rolling/lubricating oil - Inflow	10148.11	g	Lubricating oil {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Sulfuric acid - Inflow	23828.8	g	Sulfuric acid {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Water - Inflow	905205.3	g	Tap water {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aluminum - Outflow	195.8971	g	Aluminium
Carbon dioxide - Outflow	59090.28	g	Carbon dioxide
Dust (neodymium oxide) - Outflow	64.22857	g	Particulates, > 2.5 um, and < 10um
Hydrocarbons - Outflow	513.8285	g	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated
Hydrogen fluoride - Outflow	96.34285	g	Hydrogen fluoride
Nickel - Outflow	0.170206	g	Nickel
Nitrogen oxides - Outflow	125.2457	g	Nitrogen oxides
Sulfur oxides - Outflow	73.86285	g	Sulphur dioxide
VOC - Outflow	5812.685	g	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Xylene - Outflow	3821.6	g	Xylene
Nickel sulfamate - Outflow	0.205531	g	Nickel, ion
Aluminum scrap - Outflow	26719.08	g	Scrap aluminium {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CH
Copper scrap - Outflow	2776.922	g	Scrap copper {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CH
Neodymium-iron-boron scrap - Outflow	8028.571	g	Iron scrap

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Batería principal. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Zackrisson et al., (2010), Olofsson & Romare, (2013), Gelpke, (2018), Zhu & Chen, (2020) y Liu, (2020).			
Steel scrap - Outflow	777165.7	g	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Waste aluminum, not recovered - Outflow	29288.23	g	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Waste oil, concentrated share in dilution - Outflow	15157.94	g	Waste mineral oil {RoW} market for waste mineral oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
LiOH - Inflow	436.5515	kg	lithium hydroxide
H3PO4 - Inflow	588.3955	kg	Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
FeSO4 - Inflow	911.064	kg	Iron (II) sulphate
water - Inflow	0.013506	m3	Water, well, in ground
graphite containing rock - Inflow	484.0028	kg	Metamorphous rock, graphite containing, in ground
Land use - Inflow	0.039089	m2a	Occupation, mineral extraction site
Land transformation - Inflow	0.003005	m2a	Transformation, to mineral extraction site
Land transformation - Inflow	0.003005	m2a	Transformation, from forest
Recultivation, limestone mine - Inflow	0.003005	m2a	Recultivation, limestone mine {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Mine, limestone - Inflow	0.035632	kg	Blasting {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Diesel - Inflow	8.29719	MJ	Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Particulates < 2.5um - Outflow	0.004089	kg	Particulates, < 2.5 um
Particulates > 2.5 um < 10 um - Outflow	0.022034	kg	Particulates, > 10 um
Particulates > 10 um - Outflow	0.055776	kg	Particulates, > 2.5 um, and < 10um
Waste heat to air - Outflow	1714.753	MJ	Heat, waste
Copper foil - Inflow	284.7075	kg	Copper sheet
Aluminum foil - Inflow	135.575	kg	Aluminium foil
Aluminum film - Inflow	94.9025	kg	Aluminium foil
Polypropylene - Inflow	67.7875	kg	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polyethylene - Inflow	67.7875	kg	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Dimethyl carbonate (DMC) - Inflow	162.69	kg	dimethyl carbonate

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Batería principal. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Zackrisson et al., (2010), Olofsson & Romare, (2013), Gelpke, (2018), Zhu & Chen, (2020) y Liu, (2020).			
Ethyl methyl carbonate (EMC) - Inflow	135.575	kg	dimethyl carbonate
Ethylene carbonate (EC) - Inflow	162.69	kg	ethylene carbonate
HF - Inflow	85.6834	kg	hydrogen fluoride
Carbon black - Inflow	54.23	kg	Carbon black, general purposes
Polyvinylidene fluoride (PVDF) - Inflow	27.115	kg	Polyvinylidene fluoride (PVDF)
Total fasteners, steel - Inflow	121.1757	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Washer, nylon - Inflow	5.301436	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Production of fasteners - Inflow	121.1757	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of nylon washer - Inflow	5.301436	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Cassette outside frame, zytel - Inflow	378.674	kg	Nylon 6-6 {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Heat transfer plate, anodized aluminum - Inflow	883.5726	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of cassette outside frame - Inflow	378.674	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Cassette outside frame, zytel - Inflow	368.1553	kg	Nylon 6-6 {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Heat transfer plate, anodized aluminum - Inflow	683.7169	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of cassette outside frame - Inflow	368.1553	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Busbar and washer, aluminum (30%) - Inflow	22.35228	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Busbar and washer, copper (70%*85%, primary) - Inflow	43.81048	kg	copper, primary, at refinery - RER
Double busbar holder - Inflow	15.19955	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Production of Al part of busbar - Inflow	22.35228	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of double busbar holder - Inflow	15.19955	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Endbusbar, aluminum - Inflow	3.828815	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Endbusbar holder, ABS - Inflow	0.382881	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Production of aluminum parts - Inflow	3.828815	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of endbusbar holder - Inflow	0.382881	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Batería principal. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Zackrisson et al., (2010), Olofsson & Romare, (2013), Gelpke, (2018), Zhu & Chen, (2020) y Liu, (2020).			
Endbusbar, primary copper - Inflow	10.56606	kg	copper, primary, at refinery - RER
Endbusbar holder, ABS - Inflow	0.399448	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Production of endbusbar holder - Inflow	0.399448	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic lid - Inflow	73.63105	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Production of lid - Inflow	73.63105	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Screws, bolts, and retainer plate - Inflow	20.90061	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Straps - Inflow	5.54506	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Bracket - Inflow	16.20864	kg	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of steel products - Inflow	20.90061	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of straps and bracket - Inflow	21.7537	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Lower retention, steel - Inflow	171.5978	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of restraints and bolt - Inflow	171.5978	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Heat transfer plate, steel - Inflow	225.5285	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of heat transfer plate - Inflow	225.5285	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Foam_retention - Inflow	49.02794	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Battery tray and fixings, steel - Inflow	1056.329	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of tray and fixings - Inflow	1056.329	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Tray lid, polypropylene - Inflow	280.7964	kg	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of lid - Inflow	280.7964	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Tray seal, butyl acrylate - Inflow	0.548222	kg	butyl acrylate
Production of seal - Inflow	0.548222	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
BMB - Inflow	45.86619	kg	printed wiring board, through-hole mounted, unspc., Pb free, at plant/ GLO/ kg
BMS_GLAND_O-RING - Inflow	0.049474	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Batería principal. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Zackrisson et al., (2010), Olofsson & Romare, (2013), Gelpke, (2018), Zhu & Chen, (2020) y Liu, (2020).			
BMS printed circuit board - Inflow	27.21051	kg	printed wiring board, through-hole mounted, unspec., Pb free, at plant/ GLO/ kg
BMS_FIRMWARE - Inflow	0.004205	kg	integrated circuit, IC, logic type, at plant/ GLO/ kg
Components, steel - Inflow	210.263	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Crimp housing - Inflow	1.682104	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Standoffs, nylon part - Inflow	0.47	kg	Nylon 6 granulate (PA 6)
Standoffs, brasspart - Inflow	1.409999	kg	Brass {CH} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CH
Production of steel products - Inflow	210.263	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of nylon and plastics - Inflow	2.176841	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of bolt for micro stan - Inflow	1.409999	kg	Brass Casting
Fixings - Inflow	1.546052	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of fixings - Inflow	1.546052	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Steel products - Inflow	0.216447	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
HVC and lid - Inflow	18.55262	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Clips & fasteners - Inflow	6.802627	kg	Nylon 6-6 {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Neoprene gasket - Inflow	0.556579	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Plastic - Inflow	8.812494	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Intermodule Fuse - Inflow	35.55918	kg	copper, primary, at refinery - RER
Intermodule Fuse - Inflow	4.947365	kg	Polyphenylene sulfide granulate (PPS)
Intermodule Fuse - Inflow	2.473682	kg	Tin (99,92%)
Production of steel products - Inflow	0.216447	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of aluminum products - Inflow	18.55262	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Production of plastic products - Inflow	21.64472	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehiculo eléctrico.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Bateria principal. Adaptado de Artisan Vehicles System Liu, (2020).			Inc., (2020), Zackrisson et al., (2010), Olofsson & Romare, (2013), Gelpke, (2018), Zhu & Chen, (2020) y Liu, (2020).
Production of tin product - Inflow	2.473682	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Clips - Inflow	1.942871	kg	Nylon 6-6 {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Production of clips - Inflow	66.99557	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Manifolds - Inflow	21.70043	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
proxy for production - Inflow	21.70043	kg	Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Clamps & fasteners - Inflow	13.13447	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
proxy for production - Inflow	13.13447	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Pipe Fitting rubber - Inflow	0.137055	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
proxy for production - Inflow	0.548222	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Thermal pad, glass fibre - Inflow	0.054822	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Thermal pad, silicon - Inflow	0.164466	kg	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Thermal pad, ABS - Inflow	0.328933	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
proxy for production - Inflow	0.548222	kg	Injection moulding {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Coolant - Inflow	27.41108	kg	diethylene glycol

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

<i>Componente</i>	<i>Masa</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Inversor. Adaptado de Faria et al., (2013), Nordelöf, Alatalo, et al., (2019).			
Unmounted printed circuit board panel - Inflow	16.12425	dm ²	Populated Printed wiring board (PWB) 8-layer
Aluminum - Inflow	14.65841	g	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aluminum - Inflow	46540.45	g	Aluminium, primary, ingot {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Aluminum oxide - Inflow	146.5841	g	aluminium oxide
Brass - Inflow	5192.999	g	Brass {CH} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CH
Conformal coating, thinner - Inflow	3664.602	g	butyl acetate
Copper - Inflow	16905.04	g	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Diantimony trioxide - Inflow	40.25901	g	Antimony {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Glass fiber - Inflow	324.4316	g	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Gold - Inflow	1.099381	g	Gold
Liquid varnish, solvent share - Inflow	740.2496	g	Naphtha {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Low-alloy carbon steel - Inflow	2156.985	g	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Nickel - Inflow	139.2549	g	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Nylon 6, mixed with glass fiber - Inflow	58.51554	g	Nylon 6 granulate (PA 6)
Polycarbonate - Inflow	117.7437	g	Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polyethylene terephthalate (PET) - Inflow	2485.7	g	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polyethylene terephthalate (PET) - Inflow	168.3276	g	Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polyphenylene sulfide, powder - Inflow	752.0914	g	Polyphenylene sulfide granulate (PPS)
Polypropylene - Inflow	3820.128	g	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Silicone adhesive - Inflow	2.469942	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Silicone granulates - Inflow	174.8413	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Silicone potting gel - Inflow	620.7836	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
TIM - aluminium oxide - Inflow	74.90447	g	aluminium oxide
TIM - zinc oxide - Inflow	16.05096	g	Zinc oxide {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
TIM - silicone oil - Inflow	16.05096	g	Silicone product {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Tin - Inflow	484.0573	g	Tin (99.92%)
Zinc - Inflow	975.7736	g	Zinc {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Inversor. Adaptado de Faria et al., (2013), Nordelöf, Alatalo, et al., (2019).			
Electricity, assembly and building services - Inflow	34.69722	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, casing production - Inflow	126.7952	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, electroplating - Inflow	3.884478	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, power module production - Inflow	25.04016	kWh	Electricidad - Chile
Electricity, printed circuit board assembly - Inflow	7.475788	kWh	Electricidad - Chile
Heat, from natural gas - Inflow	474.1995	MJ	Heat, central or small-scale, natural gas {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Alkoxypropanol - Inflow	24.99563	g	dipropylene glycol monomethyl ether
Amino alcohol - Inflow	3.732725	g	monoethanolamine
Ammonium polyacrylate - Inflow	2.272053	g	Acrylic dispersion
Caustic soda - Inflow	58.63363	g	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Chlorine gas - Inflow	31.7461	g	Chlorine, gaseous {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Cutting fluid - Inflow	1062.735	g	Naphtha {RoW} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Flux, aqueous, dicarboxylic acid share - Inflow	0.051304	g	adipic acid
Flux, aqueous, deionized water share - Inflow	0.92348	g	Water, deionised, from tap water, at user {RoW} market for water, deionised, from tap water, at user Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Glycerin - Inflow	10.99381	g	Glycerine {BR} esterification of soybean oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - BR
Hydrochloric acid - Inflow	38.43373	g	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Isopropanol - Inflow	93.04309	g	isopropanol
Lubricating oil - Inflow	879.5045	g	Lubricating oil {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Nitric acid - Inflow	88.68337	g	Nitric acid, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Nitrogen - Inflow	31625.52	g	Nitrogen, liquid {RER} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Photoresist - Inflow	29.31682	g	Chemical, organic {GLO} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Polyvinyl alcohol - Inflow	8.795045	g	Acrylic binder, without water, in 34% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Potassium carbonate - Inflow	80.62125	g	Potassium carbonate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Inversor. Adaptado de Faria et al., (2013), Nordelöf, Alatalo, et al., (2019).			
Potassium hydroxide - Inflow	80.62125	g	Potassium hydroxide {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Pure water - Inflow	80.62125	g	Water, ultrapure {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Sulfuric acid - Inflow	102.6089	g	Sulfuric acid {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Water (deionised) - Inflow	134291.3	g	Water, deionised, from tap water, at user {RoW} market for water, deionised, from tap water, at user Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Water (tap) - Inflow	19788.85	g	Tap water {RoW} market for
Aluminum - Outflow	17.59009	g	Aluminum compounds, unspecified
Ammonia - Outflow	0.454411	g	Ammonia
Carbon dioxide - Outflow	4.983859	g	Carbon dioxide
Carbon monoxide - Outflow	3.151558	g	Carbon monoxide
Cyanide - Outflow	6.3E-05	g	Cyanide
Ethanol - Outflow	11.91362	g	Ethanol
Nickel - Outflow	0.00513	g	Nickel
VOC - Outflow	810.9911	g	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Cyanide - Outflow	0.002639	g	Cyanide
Nickel, in sulfamate - Outflow	0.002199	g	Nickel, ion
Zinc - Outflow	2.05E-05	g	Zinc, ion
Aluminum scrap - Outflow	2213.42	g	Scrap aluminium {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - CH
Filter waste - Outflow	21.12277	g	Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Slurry waste - Outflow	24.18637	g	Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland} market for hazardous waste, for incineration Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Waste aluminum - Outflow	2638.514	g	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Waste oil, diluted - Outflow	1062.735	g	Waste mineral oil {RoW} market for waste mineral oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Wastewater - Outflow	132.3654	dm³	Wastewater, average {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Suspensión. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Burnham et al., (2006).			
Steel Mass	832.60	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Iron Mass	289.60	kg	Cast iron {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	36.20	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Iron milling	42.86	kWh	Electricidad - Chile
Conversor DC-DC. Adaptado de Payet & Greffe, (2019), Laudon & Inzunza Soriano, (2012), Artisan Vehicles System Inc., (2020) y Nordelöf, (2017).			
Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	0.006154	kg	Capacitor ceramic
Tantalum, powder, capacitor-grade {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	0.000319	kg	Capacitor tantal SMD E (500mg) 7.3x4.3x4.1
Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	0.000456	kg	Capacitor film type
Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	0.304601	kg	Diode mMELF (40mg) D1.6x3.8
Tin {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	1.193961	kg	Tin (99.92%)
Polycarbonate {GLO} market for Alloc Def, U - Inflow	0.604184	kg	Polycarbonate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
market for printing wiring board, surface mounted, unspecified Alloc Def, U - Inflow	0.954927	kg	Populated Printed wiring board (PWB) 8-layer
Water (process) - Inflow	2.809143	m3	Water, unspecified natural origin
Water (ultrapure) - Inflow	548.7394	kg	Water, ultrapure {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
electricity - Inflow	164.1184	kWh	Electricity, medium voltage {UCTE} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
cores (incl. Composite) - Inflow	0.493865	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
pregreg - Inflow	0.457115	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
copper foil (process) - Inflow	0.916244	kg	Sheet rolling, copper {RER} processing Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
resist - Inflow	0.084073	kg	Phenolic resin {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
hydrochloric acid - Inflow	6.846657	kg	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER

Continuación Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Conversor DC-DC. Adaptado de Payet & Greffe, (2019), Laudon & Inzunza Soriano, (2012), Artisan Vehicles System Inc., (2020) y Nordelöf, (2017).			
sodium hydroxide - Inflow	3.508912	kg	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
hydrogen peroxide - Inflow	0.891072	kg	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
salt - Inflow	0.257253	kg	Sodium chloride, powder {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
iron III chloride - Inflow	0.433454	kg	Iron (III) chloride, without water, in 40% solution state {RoW} iron (III) chloride production, product in 40% solution state Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Nickel - Inflow	0.00224	kg	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
tin - Inflow	0.003816	kg	Tin (99.92%)
solder mask - Inflow	0.023359	kg	Phenolic resin {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
dangerous waste - Outflow	7.00E+00	kg	disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration - CH
municipal waste - Outflow	2.33E-02	kg	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration - CH
plastic dispersion - Outflow	9.16E-02	kg	disposal, emulsion paint, 0% water, to municipal incineration - CH
waste heat - Outflow	5.94E+02	MJ	Heat, waste
C, organic, to air - Outflow	2.15E-02	kg	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
acidic / basic aerosols, to air - Outflow	1.44E-03	kg	Hydrogen chloride
acidic / basic aerosols, to air - Outflow	7.45E-04	kg	Sodium hydroxide
acidic / basic aerosols, to air - Outflow	1.74E-04	kg	Hydrogen peroxide
acidic / basic aerosols, to air - Outflow	1.24E-04	kg	Sulfuric acid
copper, to air - Outflow	2.51E-03	kg	Copper
lead, to air - Outflow	7.80E-04	kg	Lead
dust, to air - Outflow	1.70E-04	kg	Particulates, < 2.5 um
dust (II), to air - Outflow	5.64E-05	kg	Particulates, > 2.5 um, and < 10um
arsenic, to water - Outflow	1.10E-06	kg	Arsenic, ion
cadmium ion, to water - Outflow	9.26E-06	kg	Cadmium, ion
chromium ion, to water - Outflow	2.63E-05	kg	Chromium, ion
copper ion, to water - Outflow	8.81E-05	kg	Copper, ion
mercury ion, to water - Outflow	3.07E-07	kg	Mercury
nickel ion, to water - Outflow	3.07E-05	kg	Nickel, ion
lead ion, to water - Outflow	2.77E-05	kg	Lead
zinc ion, to water - Outflow	2.59E-05	kg	Zinc, ion

Continuación Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Conversor DC-DC. Adaptado de Payet & Greffe, (2019), Laudon & Inzunza Soriano, (2012), Artisan Vehicles System Inc., (2020) y Nordelöf, (2017).			
AOX - Outflow	6.75E-05	kg	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl
COD - Outflow	4.11E-02	kg	COD, Chemical Oxygen Demand
BOD - Outflow	4.11E-02	kg	BOD5, Biological Oxygen Demand
fluoride, to water - Outflow	1.89E-04	kg	Fluoride
Epoxy resin in substrate - Inflow	0.038294	kg	epoxy resin
Copper in substrate - Inflow	0.011215	kg	copper, primary, at refinery - RER
Nickel in substrate - Inflow	0.00041	kg	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Resist in substrate - Inflow	0.005471	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Sb2O3 in encapsulation - Inflow	0.001094	kg	Zinc {RoW} primary production from concentrate Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Die attach material Epoxy - Inflow	0.000342	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Die attach material Ag - Inflow	0.001094	kg	Silver
Solderballs Sn - Inflow	0.008616	kg	Tin (99.92%)
Solderballs Pb - Inflow	0.00506	kg	Lead {GLO} primary lead production from concentrate Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Assembly energy electricity - Inflow	91.4413	kWh	Electricity, medium voltage {UCTE} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
lead - Inflow	8.48E-05	kg	Lead {GLO} primary lead production from concentrate Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
iron - Inflow	0.000453	kg	Pig iron {GLO} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
nickel - Inflow	0.000318	kg	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
copper - Inflow	7.13E-05	kg	copper, primary, at refinery - RER
tin - Inflow	0.000226	kg	Tin (99.92%)
silicium - Inflow	1.93E-06	kg	MG-silicon, at plant/kg/NO U
silver - Inflow	0.000193	kg	Silver
Aluminium oxide - Inflow	0.013475	kg	aluminium oxide
Silicium oxide - Inflow	0.003854	kg	Silica sand {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
glass - Inflow	0.000127	kg	Glass tube, borosilicate {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
epoxy resin - Inflow	0.000182	kg	epoxy resin
polyacrylate - Inflow	0.000123	kg	polymethyl methacrylate (PMMA) beads

Continuación Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Chasis. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Burnham et al., (2006).			
Steel Mass	17582.24	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Aluminium Mass	3278.04	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Neumáticos. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Tire Industry Association, (2019), Grammelis et al., (2021), Pizarro Valenzuela, (2013), Vargas & Campos, (2015) y Pehlken & Essadiqi, (2005).			
Natural Rubber	1143.08	kg	Natural rubber_production mix_at plant_World_S
Synthetic Rubber (SBR)	285.77	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Carbon Black	613.36	kg	Carbon black, general purposes
Silica	83.64	kg	Silica sand {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Steel	642.634	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Zinc Oxide	13.94	kg	Zinc oxide {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Assembly	1181.98	kWh	Electricidad - Chile
Heat	4845.568	kWh	Heat, central or small-scale, natural gas {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cilindros. Adaptado de Atlas Copco, (2010) y Jun et al., (2019).			
Nitrile Butadiene Rubber (NBR)	0.16	kg	Nitrile rubber (NBR)
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.11	kg	Polytetrafluoroethylene granulate (PTFE)
Urethane	1.46	kg	Polyurethane, rigid foam {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rolled steel material for the general structure (reinforcing steel)	24.31	kg	Reinforcing steel {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Bronze	8.93	kg	Bronze {RoW} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Chrome molybdenum steel (Chronium steel 18/8)	573.64	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Carbon Steel	657.38	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Cabina. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006) y Atlas Copco, (2010).			
Steel Mass	1683.75	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Rubber Mass	5.75	kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Aluminium Mass	49.96	kg	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Duroplast Mass	108.52	kg	Phenolic resin {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Thermoplast Mass	131.40	kg	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
Copper Mass	15.48	kg	Copper {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Magnesium Mass	2.64	kg	Magnesium ingot
Zinc Mass	1.09	kg	Zinc {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

Continuación **Tabla 35. Inventario de manufactura vehículo eléctrico.**

Componente	Masa	Unidad	Flujo base de datos
Cabina. Adaptado de Wolff et al., (2020), Burnham et al., (2006) y Atlas Copco, (2010).			
Glass Mass	81.28	kg	Flat glass, uncoated {RER} production Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Assembly	1264.96	kWh	Electricidad - Chile
Heat	3154.36	kWh	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Water	42184.98	kg	Water
Oxygen	0.17	kg	oxygen
Nitrogen	0.33	kg	dinitrogen
Carbon dioxide	0.73	kg	Carbon dioxide (land use change)
Tolva. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Komatsu America, (2007) y Skone, (2010).			
Acero	3284.78	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Ejes. Adaptado de Artisan Vehicles System Inc., (2020), Atlas Copco, (2010), Avikal et al., (2020) y Azom, (2012).			
Acero	5792.00	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Gearbox. Adaptado de Wolff et al., (2020) y Artisan Vehicles System Inc., (2020).			
Chromium Steel	152.55	kg	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Electric Steel	152.55	kg	steel hot rolled section
Converter Steel	152.55	kg	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER
Iron Mass	152.55	kg	Cast iron {GLO} market for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO
Assembly	1177.62	kWh	Electricidad - Chile
Heat	1107.60	kWh	Heat, central or small-scale, natural gas {GLO} market group for Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO

10.7. Anexo G: Inventario de Operación

Tabla 36. Parámetros técnico-operacionales de los vehículos ocupados.

Parámetro	Diesel	Eléctrico	Unidad	Fuentes (Diesel / Eléctrico)
Capacidad Tolva	19.88	22.71	m3	Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Factor de llenado	92.50%	92.50%	%	Orellana Oporto, (2019) y Varaschin, (2016)
Tiempo Carga	24.36	27.83	s	Estimado de Acevedo Céspedes, (2017)
Tiempo Descarga	14.00	17.00	s	Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Aceleración	0.87	1.30	m/s2	Estimados de Parreira, (2013) y Rafi et al., (2020)
Desaceleración	0.89	1.10	m/s2	Estimados de Parreira, (2013) y Rafi et al., (2020)
Velocidad Cargado	Triangular(Min=7; Moda=12,0085; Max=17.6849)	Triangular(Min=7; Moda=12,0085; Max=17.6849)	km/h	Acevedo Céspedes, (2017) y Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Velocidad Descargado	Triangular(Min=8; Moda= 19,3681; Max= 25,3514)	Triangular(Min=5; Moda= 16,3681; Max= 20)	km/h	Acevedo Céspedes, (2017) y Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Consumo promedio (ciclo)	60	-	L/h	Contacto especialista Codelco.
Área frontal Aproximada	7.66	7.59	m2	Estimado de Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Coefficiente resistencia aerodinámica	0.32	0.32	-	Rafi et al., (2020)
Densidad del aire	0.85	0.85	kg/m3	Wallace Jr et al., (2012)
Velocidad aire	1.00	1.00	m/s	Wallace Jr et al., (2012)
Eficiencia de combustión	30.00%	-	%	Contacto especialista Codelco.
Eficiencia transmisión mecánica	90.00%	-	%	Matsushita et al., (2000)
Poder calorífico	42705.36	-		AB Volvo Penta, (2013)
Densidad diésel Grado B	840.00	-		Estimado.
Peso camión vacío	35.90	48.15	ton	Sandvik, (2011)/Artisan Vehicles System Inc., (2020)
Tiempo carga combustible/recambio	600.00	155	s	Estimado de Saayman, (2006) / Huff, (2018)
Tamaño Tanque Combustible	700.00	-	L	Sandvik, (2011)
Tiempo de maniobra	20.00	20.00	s	Valenzuela Núñez, (2017)
Eficiencia sistema eléctrico	-	95.00%	%	Prudencio Ríos & Pino Carhuancho, (2021)
Eficiencia de regeneración	-	80.00%	%	Gustavsson, (2020)
Energía máxima batería	-	1045008.00	kJ	Artisan Vehicles System Inc., (2020)

Tabla 37. Frecuencia y duración de mantenimientos programados. Extraído de ARENAS, (2016).

Frecuencia de mantenimiento [h effc.]	Duración [h]
Cada 125 h	12
Cada 250 h	18
Cada 500 h	24
Cada 1000 h	42
Cada 2000 h	42

10.8. Anexo H: Análisis de sensibilidad

Tabla 38. Inventario de generación eléctrica [1 kWh] proyecciones 2030 y 2050.

<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Flujo base de datos</i>
Electricidad - Chile (2030). Adaptado de Ministerio de Energía, (2020) y Ministerio de Energía, (2019).			
Energía eólica	0.209865702	kWh	electricity from wind power
Energía Solar - Torre	0.005588843	kWh	electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW - MA
Energía geotérmica	0.004834711	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, deep geothermal Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía carbón	0.033853306	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hard coal Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (represa)	0.203739669	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	0.237086777	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía LNG	0.047975207	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fotovoltaica	0.229886364	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fuel oil	0.009566116	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Electricidad - Chile (2050). Adaptado de Ministerio de Energía, (2020) y Ministerio de Energía, (2019).			
Energía eólica	0.304912789	kWh	electricity from wind power
Energía Solar - Torre	0.003322328	kWh	electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW - MA
Energía geotérmica	0.002931062	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, deep geothermal Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (represa)	0.131245667	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	0.152552495	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía LNG	0.043677624	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fotovoltaica	0.285246532	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fuel oil	0.005608144	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, oil Cut-off, S - Copied from Ecoinvent

Tabla 39. Inventario de generación eléctrica, escenarios sustentables. Elaboración propia.

Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Electricidad - Energía Eólica			
Energía eólica	1539190.25	kWh	electricity from wind power
Electricidad - Energía Solar			
Energía fotovoltaica	1539190.25	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Electricidad - Energía Hidráulica			
Energía hidroeléctrica (represa)	769595.12	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	769595.12	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Electricidad - Matriz Sustentable 1			
Energía fotovoltaica	769595.12	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía eólica	769595.12	kWh	electricity from wind power
Electricidad - Matriz Sustentable 2			
Energía eólica	769595.12	kWh	electricity from wind power
Energía hidroeléctrica (represa)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Electricidad - Matriz Sustentable 3			
Energía fotovoltaica	769595.12	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (represa)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Electricidad - Matriz Sustentable 4			
Energía eólica	384797.56	kWh	electricity from wind power
Energía hidroeléctrica (represa)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, pumped storage Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía hidroeléctrica (de pasada)	384797.56	kWh	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, S - Copied from Ecoinvent
Energía fotovoltaica	384797.56	kWh	Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, S - Copied from Ecoinvent