

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA- FACULTAD DE CIENCIAS
MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE**



**“EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE CAMIONES A H2V: ANÁLISIS DE VARIABLES TÉCNICAS Y
ECONÓMICAS DE LOS CAMIONES A HIDRÓGENO VERDE RECIENTEMENTE INCORPORADOS EN CHILE
RESPECTO A CAMIONES DIESEL”**

MATÍAS LEÓN AYALA

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**

Director : Dr. Ricardo Lizana F.

Profesor Informante
Interno : Dr. Eduardo Espinosa.

Profesor Informante
Externo : Dr. Sebastián Rivera.

Concepción, enero de 2026

Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo constante, su paciencia y por estar siempre presentes a lo largo de este proceso.

A Constanza, por su compañía, comprensión y motivación permanente, incluso en los momentos más exigentes de este camino académico.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al Programa de Magíster en Medio Ambiente de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, por la formación entregada y por fomentar una mirada crítica y comprometida con los desafíos ambientales actuales.

Agradezco especialmente a mi profesor guía, Dr. Ricardo Lizana, por su orientación, disposición y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, así como a los profesores informantes, Dr. Eduardo Espinosa y Dr. Sebastián Rivera, por sus observaciones, comentarios y aportes técnicos que permitieron fortalecer el contenido de esta investigación.

Extiendo también mis agradecimientos a los profesores del programa, por los conocimientos compartidos y el rigor académico que contribuyeron de manera significativa a mi formación profesional.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y compañeras del magíster, por el intercambio de ideas, el apoyo mutuo y el aprendizaje colectivo, que hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora tanto en lo académico como en lo personal.

Resumen

El cambio climático, impulsado por la quema de combustibles fósiles, genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el CO₂, que en 2023 alcanzaron 37,01 mil millones de toneladas métricas a nivel global, con China y Estados Unidos como principales emisores (Statista, 2024; Parlamento Europeo, 2018). En Chile, el sector energético, especialmente el transporte terrestre, contribuye significativamente, con un 87,47% de las emisiones del sector transporte provenientes de camiones pesados y autobuses, que emitieron 9.766,2 kt CO₂ eq en 2020 (Inventario Nacional de GEI, 2022). Estas emisiones no solo aceleran el calentamiento global, sino que también deterioran la calidad del aire, aumentando riesgos de enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Torres Vázquez et al., 2023; Villanueva et al., 2019). Chile, altamente vulnerable al cambio climático, enfrenta desafíos como desertificación, pérdida de biodiversidad y olas de calor más intensas (ARCLim, 2025).

Para abordar esta problemática, Chile ha establecido metas ambiciosas hacia la carbono neutralidad al 2050, alineadas con el Acuerdo de París (2015) y su NDC 3.0 (2025), que priorizan la descarbonización del transporte y la energía (UNFCCC, 2025). La Estrategia Nacional de Electromovilidad (2021) impulsa la electrificación del transporte público y privado, mientras que la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020) promueve el uso de hidrógeno verde (H2V) en sectores de difícil descarbonización, como el transporte de carga pesada. Este combustible, producido mediante electrólisis con energías renovables, ofrece mayor autonomía y tiempos de recarga más cortos que los vehículos eléctricos a batería, siendo ideal para camiones de gran tonelaje (Ministerio de Energía, 2020). Proyectos como el camión H2V de Walmart Chile y Marval Clean Logistics, con 750 km de autonomía y cero emisiones, demuestran su viabilidad (H2 News, 2024).

Sin embargo, la adopción de camiones H2V enfrenta desafíos como altos costos iniciales, infraestructura limitada y necesidades de regulación (Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020). La Ley de Eficiencia Energética (2021) y el Plan Nacional de Eficiencia Energética (2022-2026) fomentan estándares más estrictos y la transición hacia tecnologías limpias (Ministerio de Energía, 2022). Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de camiones H2V frente a los diésel, analizando el Costo Total de Propiedad (TCO), autonomía y condiciones de mercado. Utilizando datos de fabricantes como Hyundai y modelaciones en Excel con Solver, se comparan escenarios con precios de H2V entre 1,5 y 5 USD/kg, identificando que flotas de más de 50 camiones y precios de H2V inferiores a 3 USD/kg son competitivos. El diagnóstico propone flotas piloto en regiones estratégicas, infraestructura de hidrolineras y políticas de incentivos para acelerar la transición, contribuyendo al cumplimiento de las metas climáticas de Chile y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13).

Abstract

Climate change, driven by the burning of fossil fuels, generates greenhouse gas (GHG) emissions such as CO₂, which reached 37.01 billion metric tons globally in 2023, with China and the United States as the main emitters (Statista, 2024; European Parliament, 2018). In Chile, the energy sector, especially land transport, contributes significantly, with 87.47% of transport sector emissions coming from heavy trucks and buses, which emitted 9,766.2 kt CO₂ eq in 2020 (National GHG Inventory, 2022). These emissions not only accelerate global warming, but also deteriorate air quality, increasing the risk of cardiovascular and respiratory diseases (Torres Vázquez et al., 2023; Villanueva et al., 2019). Chile, which is highly vulnerable to climate change, faces challenges such as desertification, biodiversity loss, and more intense heat waves (ARClm, 2025).

To address this problem, Chile has set ambitious goals for carbon neutrality by 2050, in line with the Paris Agreement (2015) and its NDC 3.0 (2025), which prioritize the decarbonization of transportation and energy (UNFCCC, 2025). The National Electromobility Strategy (2021) promotes the electrification of public and private transport, while the National Green Hydrogen Strategy (2020) promotes the use of green hydrogen (H₂V) in sectors that are difficult to decarbonize, such as heavy freight transport. This fuel, produced by electrolysis using renewable energy, offers greater range and shorter recharge times than battery electric vehicles, making it ideal for heavy-duty trucks (Ministry of Energy, 2020). Projects such as the H₂V truck from Walmart Chile and Marval Clean Logistics, with a range of 750 km and zero emissions, demonstrate its viability (H₂ News, 2024).

However, the adoption of H₂V trucks faces challenges such as high initial costs, limited infrastructure, and regulatory needs (National Green Hydrogen Strategy, 2020). The Energy Efficiency Law (2021) and the National Energy Efficiency Plan (2022-2026) promote stricter standards and the transition to clean technologies (Ministry of Energy, 2022). This study evaluates the technical and economic viability of H₂V trucks compared to diesel trucks, analyzing the Total Cost of Ownership (TCO), range, and market conditions. Using data from manufacturers such as Hyundai and Excel modeling with Solver, scenarios with H₂V prices between \$1,5 and \$5/kg are compared, identifying that fleets of more than 50 trucks and H₂V prices below \$3/kg are competitive. The diagnosis proposes pilot fleets in strategic regions, hydrogen refueling station infrastructure, and incentive policies to accelerate the transition, contributing to the fulfillment of Chile's climate goals and the Sustainable Development Goals (SDGs 7 and 13).

Contenido

1.	Introducción	11
1.1.	Descripción del problema ambiental	13
2.	Objetivos	19
	Objetivo General.....	19
	Objetivos específicos	19
3.	Antecedentes	20
3.1.	Relación del problema ambiental con la sociedad.....	20
3.2.	Impactos ambientales identificados.....	21
3.3.	Normativa Nacional e Internacional relacionada con el problema ambiental.....	25
3.3.1.	Normativa Internacional	26
3.3.2.	Normativa Nacional.....	26
3.3.3.	Transición a camiones de Hidrógeno verde: Electromovilidad e Hidrógeno Verde ...	28
4.	Metodología.....	31
4.1.	Objetivo Especifico 1	31
4.2.	Objetivo Especifico 2	32
	Diagnostico Técnico-Económico	33
5.	Resultados.....	34
5.1.	Desempeño Operativo y Económico	34
5.1.1.	Parámetros Base	34
5.1.2.	Cálculo TCO	35
5.2.	Análisis TCO por escenarios.....	35
5.2.1.	Escenario Actual (2025).....	35
5.2.2.	Escenario Intermedio (2027-2029)	36
5.2.3.	Escenario Meta 2030.....	37
5.3.	Efecto del tamaño de flota en viabilidad económica.	38
5.3.1.	Análisis de infraestructura: Break-even de Flota	38
5.3.2.	Efecto de Km/año en TCO	40
5.4.	Costo de Abatimiento de Emisiones CO ₂	41
5.5.	Proyección temporal TCO (2025-2035)	42
5.6.	Cálculo de precio de equilibrio del H2V.	43
5.7.	Análisis de Sensibilidad.....	45
5.8.	Necesidades para la implementación de medidas.....	46
5.8.1.	Recursos técnicos y tecnológicos	46

5.8.2. Recursos económicos y financieros	47
5.8.3. Recursos normativos y regulatorios.....	47
5.8.4. Recursos institucionales y coordinación	48
5.8.5. Condiciones ambientales y energéticas.....	48
6. Análisis crítico.	49
7. Conclusiones	51
Referencias Bibliográficas	53
Anexos.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales convenios internacionales suscritos por Chile sobre Cambio climático.	26
Tabla 2. Políticas Nacionales para reducción CO ₂ e impulso electromovilidad/H2V.	28
Tabla 3. Parámetros Base para cálculos de TCO	34
Tabla 4. TCO Por tipo y modelo de tractocamión (Escenario Actual 2025).....	35
Tabla 5. TCO escenario Actual 2025 (H2= 5 USD/kg, Diesel = 1,03 USD/L)	36
Tabla 6. TCO escenario intermedio (H2= 3 USD/kg, Diesel = 1,2 USD/L).....	37
Tabla 7. TCO escenario Meta 2030 (H2= 1,5 USD/kg, Diesel = 1,2 USD/L)	37
Tabla 8. Costo de abatimiento de CO ₂ según escenario en 10 años.	42
Tabla 9. Proyección costos para camiones Diesel e H2V, 2025-2035.....	42
Tabla 10. Precio de equilibrio H2V según combinación de parámetros operacionales.	44

Índice de Figuras

Figura 1. Transporte Terrestre: Emisiones de GEI(kt CO2 eq) por subcomponente, serie 1990-2020.....	13
Figura 2. Emisiones de CO2 (kt CO2 eq) por combustible, serie 1990-2020	14
Figura 3. Riesgos relativos climáticos para Fauna y Flora por cambios en precipitaciones y temperatura.....	15
Figura 4. Emisiones anuales de CO2 por región del mundo	22
Figura 5. Índice de disminución de precipitación e índice de riesgo de pérdida de la diversidad de flora (2035-2065)	23
Figura 6. Índice de aumento de temperatura media e índice de riesgo de pérdida de la diversidad de fauna (2035-2065)	24
Figura 7. Índice de cambio en olas de calor e índice relativo de cambio en riesgo (2035-2065).....	25
Figura 8. Comparación de TCO por escenario.	38
Figura 9. TCO según tamaño de flota en escenario intermedio	39
Figura 10. TCO según tamaño de flota en escenario optimista (Meta 2030).	40
Figura 11. TCO según Km anuales en escenario intermedio.	41
Figura 12. Proyección TCO diésel vs H2V, 2025-2035.....	43
Figura 13. Análisis de sensibilidad TCO H2V según variables ($\pm 10\%$)	45

Índice de Anexos

1. Potencial de energías renovables en Chile.	57
--	----

1. Introducción

Actualmente, el cambio climático es uno de los desafíos ambientales más relevantes. Este fenómeno se refiere a las variaciones a largo plazo en las temperaturas y los patrones climáticos del planeta. Desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal factor que ha acelerado este proceso, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. Esta quema libera gases de efecto invernadero (GEI) tales como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y otros, además de contaminantes locales como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el material particulado ($\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10}), que son partículas finas suspendidas en el aire, que actúan como una capa que envuelve la Tierra, atrapando el calor del sol y aumentando la temperatura global (Naciones Unidas, s.f.).

Estas emisiones no solo aceleran el cambio climático, sino que también afectan la salud pública, por ejemplo, un aumento en el material particulado $\text{PM}_{2,5}$, aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, accidente cerebrovascular y mortalidad por enfermedad cardiovascular. Además, genera un aumento en infecciones respiratorias infantiles como influenza y virus sincicial respiratorio (Oyarzun & Valdivia, 2021).

Estos impactos negativos han impulsado una transformación en los sistemas energéticos y productivos a nivel mundial, buscando alternativas más limpias y sostenibles que contribuyan a reducir la brecha de contaminación existente.

Según datos de Statista, las emisiones mundiales de CO_2 en 2023 alcanzaron los 37,01 mil millones de toneladas métricas. De acuerdo con el Parlamento Europeo, China fue el principal emisor, con 15.944 millones de toneladas de CO_2 equivalente, seguido por Estados Unidos, con 5.961 millones en el mismo año. En el caso de Chile, durante el 2022 el principal sector emisor fue el energético, con un 76% de las emisiones totales, seguido por agricultura (8%), residuos (8%) y procesos industriales (7%). Considerando el sector energía, que incluye el consumo de combustibles fósiles, las emisiones alcanzaron 84.791 kt CO_2 eq. El principal origen de estas emisiones proviene de la subcategoría de transporte con 35,4% del total del sector seguido consumo de carbón y gas para la generación eléctrica, que representa un 34,2% de la categoría. Dentro del transporte, el transporte terrestre concentra un 88,4% de las emisiones, y dentro de este, los camiones pesados y autobuses son los mayores emisores, con un 37,5% del total, seguidos por automóviles, camiones ligeros y motocicletas, respectivamente. (Inventario Nacional de GEI, 1990–2022).

Ante esta realidad, y según el Ministerio del Medio Ambiente, Chile ha definido una hoja de ruta ambiciosa hacia la carbono neutralidad al año 2050, como país firmante del Acuerdo de París (2015). Este acuerdo internacional busca que los países reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el calentamiento global, y en el caso de Chile, el compromiso se materializa a través de la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP). Dicha estrategia contempla metas a corto y mediano plazo, como retirar el 65% de la generación a carbón de la matriz energética nacional al 2025, lograr que al 2030 el 80% de la generación eléctrica provenga de fuentes renovables, e implementar flotas cero emisiones en el sector minero, entre otras. Además, se espera que al 2040 un 20% de la matriz de combustibles provenga del hidrógeno verde, y que el 100% del transporte público sea de emisión cero.

Uno de los avances más destacados ha sido en materia de electromovilidad, donde Chile cuenta con una Estrategia Nacional de Electromovilidad, desarrollada por el Ministerio de Energía. En 2017 se analizó el estado del sector transporte, con especial foco en las oportunidades que ofrece su electrificación. A partir de este diagnóstico y de un proceso participativo, se establecieron metas de largo plazo: alcanzar un 40% de vehículos particulares eléctricos y un 100% del transporte público urbano eléctrico al 2050. Sin embargo, en el caso del transporte de carga pesada, que recorre extensas distancias a lo largo del país, la adopción de vehículos eléctricos presenta desventajas importantes relacionadas con la autonomía, los costos de adquisición y los tiempos de carga.

En este contexto, el hidrógeno verde, producido a partir de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, se posiciona como una alternativa real para reemplazar combustibles fósiles en sectores de difícil descarbonización, como el transporte pesado y la industria minera. Su aplicación en camiones de gran tonelaje permitiría eliminar las emisiones locales, reducir el CO₂ operativo y diversificar la matriz energética nacional.

Según Juan Carlos Jobet, Chile posee condiciones naturales excepcionales para el desarrollo del hidrógeno verde. En el norte destacan los altos niveles de radiación solar, y en el sur, los fuertes vientos, lo que permitiría generar hasta 70 veces la capacidad eléctrica actual del país. Esta abundante disponibilidad de energía renovable posiciona a Chile como un potencial productor del hidrógeno verde más barato del mundo, consolidándolo como un actor estratégico en la producción y exportación de este energético (Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020).

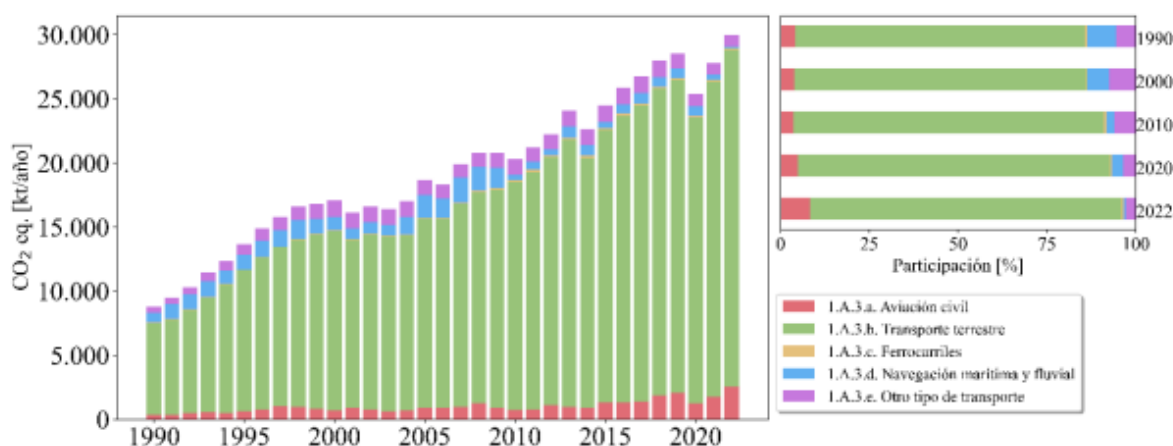
La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, publicada en 2020, establece metas concretas: producir el hidrógeno más barato del mundo antes de 2030 y convertirse en uno de los tres principales exportadores globales al 2040. No obstante, la aplicación de esta tecnología en el transporte nacional todavía enfrenta desafíos relevantes, especialmente en lo referido a infraestructura de abastecimiento, disponibilidad de camiones, seguridad en el almacenamiento y costos iniciales de inversión.

En este marco, la presente investigación busca evaluar técnica y económicamente la implementación de camiones a hidrógeno verde en el transporte de carga en Chile, con el objetivo de determinar su factibilidad bajo distintas condiciones operacionales y de mercado. Este análisis permitirá identificar los factores críticos que condicionan su competitividad frente a las alternativas diésel, aportando información clave para orientar políticas públicas, inversiones y decisiones industriales. El estudio cobra especial relevancia considerando que el transporte de carga es un componente estratégico de la economía chilena, directamente vinculado a sectores como la minería, la industria forestal y el comercio exterior. Reducir sus emisiones no solo contribuiría al cumplimiento de las metas climáticas nacionales, sino que también permitiría avanzar hacia un sistema logístico más eficiente, moderno y sustentable, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima). En términos generales, este estudio propone analizar los costos de inversión, operación y mantenimiento de camiones propulsados por hidrógeno verde, comparándolos con sus equivalentes diésel, desde una perspectiva técnica y económica.

1.1. Descripción del problema ambiental

Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI, 2024), el sector transporte en Chile generó 29.984,8 kilotoneladas de CO₂ equivalente (kt CO₂ eq), de las cuales el transporte terrestre aportó 26.278,7 kt CO₂ eq, siendo el principal emisor dentro del sector. Dentro de este subsector, destacan los camiones de servicio pesado y autobuses, definidos por el IPCC como vehículos de carga o transporte de personas con un peso bruto superior a 3.500 kg o capacidad para más de 12 pasajeros. Este subcomponente, correspondiente a vehículos de gran tamaño y potencia, emitió en el año 2020 un total de 10.049,3 kt CO₂ eq, lo que representa la segunda mayor parte de las emisiones del transporte terrestre nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

Figura 1. Transporte Terrestre: Emisiones de GEI(kt CO₂ eq) por subcomponente, serie 1990-2022

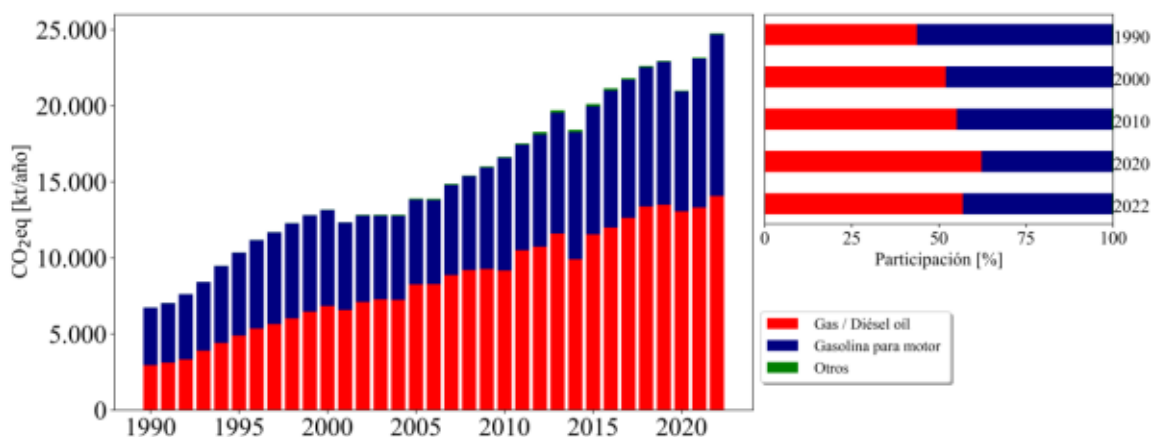


Fuente: Informe del Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile 1990-2022

La Figura 1 muestra la evolución de las emisiones del transporte terrestre entre 1990 y 2022, evidenciando un crecimiento sostenido hasta 2019, con una leve reducción en 2020 producto de las restricciones de movilidad durante la pandemia por COVID-19. En este período también se aprecia la influencia de políticas como el Decreto N.º 55 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (1994), que introdujo el uso de catalizadores en motores a gasolina, si bien estos dispositivos redujeron significativamente las emisiones de CH₄, las de CO₂ se mantuvieron estables, e incluso aumentaron las de N₂O, lo que demuestra que la mitigación de GEI en el transporte requiere más que mejoras tecnológicas parciales: exige cambios estructurales en la matriz energética del sector. (INGEI, 2022)

Las emisiones del transporte provienen de diversos tipos de combustibles. A pesar del aumento del parque automotor a gasolina, el diésel continúa siendo el principal energético en el transporte de carga debido a su mayor torque, autonomía y rendimiento por kilómetro recorrido, factores que lo hacen más eficiente económicamente para mover grandes volúmenes de carga. Sin embargo, este tipo de combustible es también uno de los mayores responsables de las emisiones de CO₂, NO_x y material particulado fino, con un fuerte impacto en la contaminación atmosférica urbana y regional.

Figura 2. Emisiones de CO₂ (kt CO₂ eq) por combustible, serie 1990-2022



Fuente: Informe del Inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile 1990-2022

Como se observa en la Figura 2, el diésel representa casi dos tercios del total de emisiones de CO₂ generadas por el transporte terrestre, este dato es clave ya que los camiones de carga pesada diésel constituyen el segmento con mayores emisiones del país. En Chile, esta situación se ve potenciada por su geografía extensa y dependiente de la conectividad terrestre, donde los camiones son un pilar logístico y económico fundamental.

Según datos de la Agenda Logística 2025, durante el primer trimestre del presente año transitaron 282.462 camiones por los distintos pasos fronterizos del país, lo que representa un aumento del 16,8% en comparación con el mismo período de 2024. En cuanto al volumen de carga, se transportaron 4.021.872.334 kilos, registrando un crecimiento del 16,9% respecto al año anterior. Así lo detalla el reporte elaborado por la Unidad de Análisis Estadístico y Económico del Servicio Nacional de Aduanas, el cual destaca que el tráfico terrestre por regiones fue liderado por Valparaíso, con 108.885 camiones que cruzaron el paso fronterizo Los Libertadores, alcanzando una participación del 38,5% del total nacional. En términos de carga movilizada, las regiones con mayores volúmenes fueron: Parícuta, con 901.162.404 kilos (22,4%); Magallanes, con 496.333.930 kilos (12,3%); Tarapacá, con 297.836.084 kilos (7,4%); La Araucanía, con 251.301.021 kilos (6,2%); Antofagasta, con 242.684.730 kilos (6%); y Los Lagos, con 136.559.681 kilos (3,4%). (Agenda Logística, 2025)

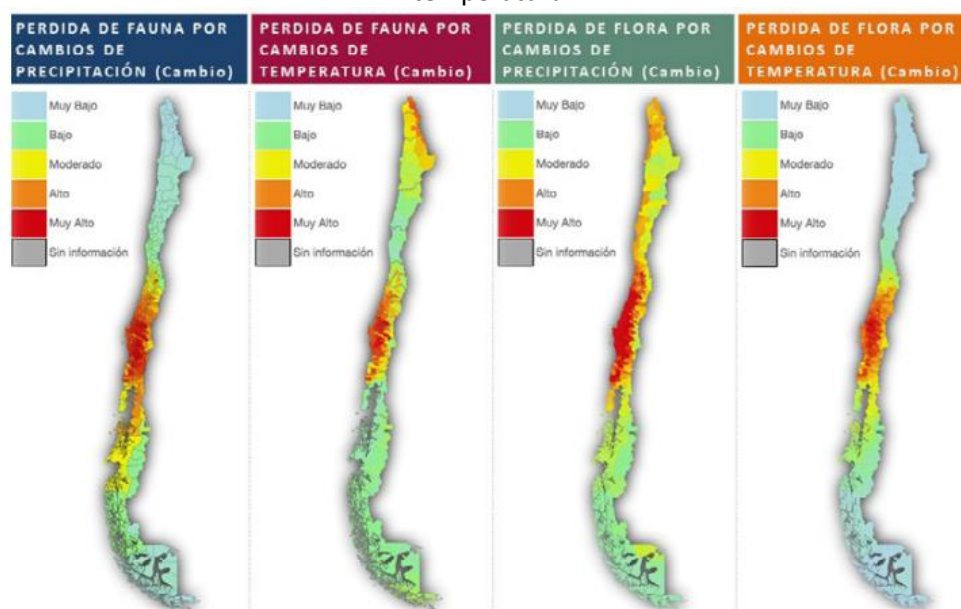
El transporte de carga pesada está directamente vinculado a la exportación de productos nacionales, especialmente frutas, madera y minerales, donde los camiones de alto tonelaje cumplen un rol clave en la logística desde los centros productivos hacia los puertos. Por ejemplo, los puertos de Valparaíso y San Antonio concentran más del 60% de los envíos frutícolas del país, con 270.000 toneladas de cerezas y más de 600.000 toneladas de uvas de mesa transportadas durante la última temporada (Puerto de Valparaíso, 2025). Esta alta demanda de transporte terrestre implica grandes distancias recorridas y altos consumos energéticos, incrementando directamente las emisiones de CO₂, principal gas de efecto invernadero del sector transporte, Aunque las normas Euro V y VI han reducido significativamente PM_{2,5} y NO_x, las emisiones de CO₂ persisten debido a la combustión inevitable del diésel. En este contexto, la dependencia del diésel

en el transporte de carga pesada constituye un problema ambiental de alta relevancia nacional, ya que no solo contribuye de manera significativa al cambio climático, sino que también deteriora la calidad del aire local y aumenta la vulnerabilidad energética del país frente a la volatilidad de los precios internacionales del petróleo. Desde el punto de vista de la salud, esto resulta crítico, pues la quema de diésel libera una mezcla de contaminantes atmosféricos, incluyendo partículas finas, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, que afectan directamente la salud de las personas.

La salud, del latín *salus*, -utis, puede entenderse como un estado de bienestar o equilibrio, que puede evaluarse de manera subjetiva, cuando un individuo percibe su estado general como aceptable, o de manera objetiva, constatando la ausencia de enfermedades o factores dañinos) En este sentido, la calidad de vida, definida por la OMS como la percepción que tiene el individuo sobre su posición en la vida dentro de su contexto cultural y social, se ve comprometida por la exposición a contaminantes generados por el transporte pesado (Duanis Torres Vázquez et al., 2023).

El impacto es especialmente relevante considerando que los camiones de gran tonelaje circulan frecuentemente por zonas urbanas o cercanas a centros poblados, aumentando la exposición de la población a emisiones nocivas. Además, las emisiones de GEI contribuyen al calentamiento global, el cual representa una amenaza directa para los ecosistemas y la salud humana. Entre sus consecuencias se incluyen la elevación del nivel del mar, la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos y la pérdida de biodiversidad, afectando especies de animales y plantas (Villanueva et al., 2019).

Figura 3. Riesgos relativos climáticos para Fauna y Flora por cambios en precipitaciones y temperatura



Fuente: Estrategia climática a Largo Plazo, 2021.

Chile es considerado un país altamente vulnerable al cambio climático de acuerdo a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), pues presenta siete de las nueve características definidas por este organismo: zonas costeras bajas; zonas áridas y semiáridas, zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal; zonas propensas a los desastres socio naturales; zonas expuestas a la sequía y a la desertificación; zonas de alta contaminación atmosférica urbana y zonas de ecosistemas frágiles, incluidos los ecosistemas montañosos. (Estrategia climática a Largo Plazo, 2021)

Desde el ámbito sanitario, el cambio climático puede favorecer el desarrollo y la propagación de enfermedades, incrementar la incidencia de golpes de calor y dificultar la prevención y tratamiento de diversas patologías, debido a la alteración de los ecosistemas y la degradación del medio ambiente (Villanueva et al., 2019). Por estas razones, la transición hacia alternativas energéticas limpias, como el hidrógeno verde, no solo representa un desafío técnico y económico, sino que también es una estrategia clave para proteger la salud pública y mejorar la calidad de vida de la población, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y mitigación de emisiones del país.

El transporte terrestre de carga pesada, al ser uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero en Chile, representa un desafío crítico para el cumplimiento de las metas nacionales de carbono neutralidad al 2050. Según la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP, 2020), para alcanzar la neutralidad de carbono es necesario reducir de manera sostenida las emisiones de todos los sectores, priorizando aquellos de difícil descarbonización, como el transporte de carga de gran tonelaje. Sin embargo, los datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI, 2022) muestran que las emisiones del transporte terrestre no se han reducido al ritmo requerido, manteniéndose prácticamente constantes durante las últimas décadas y evidenciando un crecimiento asociado al aumento del volumen de carga transportada.

En este contexto, políticas públicas como la Estrategia Nacional de Electromovilidad (2021) tienen como objetivo mitigar el cambio climático, especialmente en el sector transporte terrestre, en este sentido, Chile cuenta con un potencial de 2.375 GW en energías renovables a precios competitivos, equivalente a setenta veces la capacidad instalada actual del Sistema Eléctrico Nacional, lo que refuerza la viabilidad de avanzar en la descarbonización del transporte. Chile ha establecido la meta de reducir en un 30% las emisiones nacionales al 2030 y alcanzar la carbono neutralidad al 2050, donde los principales pilares para lograrlo son el retiro de centrales a carbón, la eficiencia energética, el hidrógeno verde y la electromovilidad. Esta última será responsable de cerca del 20% de la reducción total de emisiones del sector energía, se entiende por electromovilidad el uso de sistemas de tracción impulsados por energía eléctrica, aplicados a distintos medios de transporte. Actualmente se reconocen dos tecnologías principales: los motores eléctricos alimentados por baterías y aquellos que utilizan celdas de hidrógeno.

Por otra parte, la Ley de Eficiencia Energética (Ley N°21.305), que entrará en plena vigencia para camiones nuevos a partir de 2026, exigirá estándares mínimos de rendimiento y reportabilidad del consumo energético. Esta medida busca acelerar la transición hacia tecnologías vehiculares más limpias y eficientes, aunque enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura de carga, los altos costos iniciales de inversión y las limitaciones de autonomía, especialmente en el transporte de larga distancia.

En este escenario, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020) se presenta como una alternativa complementaria, promoviendo el uso de hidrógeno producido a partir de energías renovables para reemplazar progresivamente el diésel y reducir de forma sustantiva las emisiones del sector transporte. Su desarrollo no solo busca avanzar hacia la carbono neutralidad, sino también fortalecer la independencia energética del país y generar oportunidades industriales. Además, el hidrógeno verde ofrece ventajas frente a la electromovilidad basada en baterías, sobre todo en vehículos de alto tonelaje, al contar con mayor autonomía, menores tiempos de recarga y mejor desempeño en operaciones de larga distancia.

En el contexto internacional, y avalando el uso de camiones impulsados por hidrógeno verde, destaca la experiencia de Hyundai Motor Company con sus camiones eléctricos XCIENT Fuel Cell. En Suiza, esta flota, actualmente compuesta por 48 unidades, superó en 2024 los 10 millones de kilómetros recorridos en operación real, lo que demuestra la confiabilidad y el rendimiento sostenido de la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno. Cada camión está equipado con dos sistemas de pila de combustible de 90 kW (potencia total de 180 kW) y un motor eléctrico de 350 kW, alcanzando una autonomía superior a los 400 km por carga. En comparación, una flota equivalente de buses diésel emitiría alrededor de 6.300 toneladas de CO₂ en la misma distancia, mientras que los XCIENT Fuel Cell logran evitar dichas emisiones, lo que equivale a la captura anual de aproximadamente 700 mil pinos o la creación de un bosque de más de 500 hectáreas. Este modelo ya opera en 10 países, entre ellos Estados Unidos, Alemania, Francia, Corea y Nueva Zelanda, consolidándose como una referencia en la transición hacia un transporte pesado libre de emisiones.

En el caso de Chile, el avance más relevante se dio con la puesta en marcha del primer camión impulsado por hidrógeno verde, desarrollado por Marval Clean Logistics y Walmart Chile, en coordinación con entidades estatales para su certificación. Este hito marca un paso importante en la validación del hidrógeno verde como alternativa energética viable para el transporte de alto tonelaje, el vehículo puede almacenar hasta 75 kg de hidrógeno, otorgándole una autonomía cercana a los 750 km, y permite transportar hasta 49 toneladas de peso bruto combinado, igualando el rendimiento de un camión diésel, pero sin generar emisiones de gases de efecto invernadero. El tiempo de abastecimiento varía entre 20 minutos y 1 hora, lo que lo hace competitivo operativamente frente a tecnologías eléctricas de batería. El camión se abastece en la primera planta industrial de hidrógeno verde del país, inaugurada por Walmart Chile en su Centro de Distribución de Quilicura en agosto de 2023. Este proyecto, desarrollado junto a ENGIE, representó una inversión de aproximadamente USD 15 millones y tiene capacidad para generar 240 kg de H₂V por día, evitando la emisión de cerca de 1.600 toneladas de CO₂ anuales y mejorando la productividad en torno a un 5 %. Estos avances reflejan el potencial real del hidrógeno verde en la logística nacional, especialmente para el transporte de carga pesada, donde la autonomía, la rapidez de carga y la reducción de emisiones se vuelven factores determinantes para la transición energética del país.

En consecuencia, surge la necesidad de realizar un diagnóstico técnico–económico que evalúe la viabilidad real de implementar camiones a hidrógeno verde en el transporte de carga pesada en Chile, aunque esta tecnología se perfila como una alternativa clave para la descarbonización del sector energético y logístico, aún existen brechas técnicas, económicas y operativas que limitan su aplicación a gran escala. La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde reconoce su potencial

estratégico, pero los estudios disponibles se concentran principalmente en la producción y exportación del combustible, dejando de lado su uso interno en el transporte terrestre. Esta falta de análisis detallado genera incertidumbre sobre los costos reales, la infraestructura requerida y los beneficios ambientales y operativos que implicaría sustituir el diésel por hidrógeno verde en flotas de camiones pesados. Por lo tanto, el presente estudio busca cubrir ese vacío de conocimiento, desarrollando un diagnóstico técnico–económico que permita determinar la factibilidad práctica de esta tecnología en el contexto nacional. Su propósito es entregar una base sólida para futuras políticas públicas, programas de fomento y proyectos piloto, contribuyendo así a acelerar la transición hacia un transporte de carga más limpio, eficiente y coherente con las metas de carbono neutralidad al 2050.

2. Objetivos

Objetivo General

Realizar un diagnóstico técnico y económico que permita identificar los escenarios en los que la operación de camiones a hidrógeno verde resulta viable en comparación con camiones a diésel, considerando autonomía, costos de operación y condiciones del mercado energético en Chile.

Objetivos específicos

1. Analizar el desempeño operativo y económico de camiones a hidrógeno verde en comparación con camiones a diésel, evaluando autonomía, consumo, kilómetros recorridos, costos de combustible y escalas de flota necesarias para distintas condiciones de operación.
2. Determinar los precios y condiciones ideales de hidrógeno verde que maximicen la competitividad del sistema, identificando las variables críticas y escenarios que afectan la viabilidad técnica y económica.

3. Antecedentes

3.1. Relación del problema ambiental con la sociedad

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) contribuyen al calentamiento global al aumentar la retención de radiación térmica en la atmósfera. Este fenómeno es natural y necesario para mantener la temperatura de la Tierra, pero el problema radica en que las emisiones de gases como el metano y el óxido nitroso han aumentado significativamente respecto a los niveles de la era preindustrial, intensificando el efecto invernadero y acelerando el cambio climático (Vargas, 2024).

Una de las partes principales involucradas es el transporte, el cual es un subsector estratégico dentro del sector energético, donde sus emisiones de GEI provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles necesarios para el funcionamiento de vehículos de distinto tipo. Dentro de este subsector, el transporte pesado representa un desafío particular debido a sus elevados requerimientos de autonomía y potencia, lo que dificulta la transición hacia tecnologías bajas en carbono.

En Chile, un territorio extenso con múltiples puertos estratégicos, el transporte de carga pesada con un peso bruto máximo de 45 toneladas, según el Decreto Supremo 158/1980 del Ministerio de Obras Públicas (BCN, 2025), desempeña un rol crítico en la economía y la sociedad. A pesar de los desafíos regulatorios y logísticos, el mercado de vehículos pesados ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, entre 2018 y 2022, las ventas aumentaron en un 40%, reflejando tanto la recuperación económica como la creciente demanda de transporte eficiente y confiable (Centro de Movilidad Sostenible, 2024). No obstante, durante 2023, se registró un decrecimiento del 23% en la venta de camiones, atribuible a la coyuntura económica del país y a la desaceleración de sectores clave, particularmente la construcción. (Diario Financiero, 2024)

El enfoque de las operaciones del transporte pesado está cambiando hacia la sostenibilidad, priorizando la reducción de la huella de carbono y la transición hacia tecnologías limpias. Según expertos citados por Diario Financiero (2024), esta tendencia se mantendrá como eje central en las decisiones estratégicas del sector, adaptándose a las regulaciones ambientales y a la creciente demanda social por un transporte más responsable.

Al año 2023, la Confederación Nacional de Dueños de Camiones (CNDC) agrupaba a aproximadamente 250.000 trabajadores y a 2024 existían 21 mil plazas vacantes de conductores profesionales, su presidente destacó el papel fundamental del gremio durante la pandemia, cuando más de 100 asociaciones presentes en 16 regiones lograron mantener activa la cadena logística nacional (Diario Financiero, 2024). Este hecho evidencia la relevancia social y económica del transporte pesado en Chile, donde la geografía extensa y la dispersión de centros productivos y puertos hacen que los camiones sean esenciales para la conectividad y el abastecimiento del país.

Los camiones de carga no solo garantizan el transporte de alimentos, materias primas y productos manufacturados, sino que también permiten la integración logística con centros urbanos y puertos estratégicos, siendo un pilar para la exportación y el comercio exterior. Si bien Chile ha registrado avances en la reducción de emisiones vehiculares mediante la electromovilidad, estos esfuerzos se han concentrado principalmente en motores y no consideran de manera integral el rendimiento

operativo y social de los vehículos, dejando un vacío en la planificación de políticas y en la evaluación de impactos socioeconómicos (Centro de Movilidad Sostenible, 2024). No obstante, el tránsito de camiones pesados también genera impactos sociales y ambientales significativos, sus emisiones contribuyen a la contaminación del aire urbano, afectando directamente la salud de la población expuesta, e incrementando los costos en salud pública asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Oyarzun & Valdivia, 2021; Duanis Torres et al., 2023). Además, la exposición prolongada a ruidos y emisiones derivadas del transporte pesado reduce la calidad de vida de las comunidades cercanas y puede generar pérdidas económicas indirectas por disminución de productividad (OMS, 2018).

La transición hacia la electromovilidad y el hidrógeno verde en el transporte pesado se presenta como una alternativa con múltiples beneficios. Estas tecnologías permiten reducir las emisiones locales y la dependencia del diésel, al tiempo que promueven el desarrollo de energías limpias y la creación de empleos verde. No obstante, su implementación implica desafíos operativos y sociales relevantes, incluyendo la reconversión laboral de transportistas tradicionales y propietarios de flotas, la necesidad de infraestructura de carga y abastecimiento, y la formación técnica especializada para el manejo de estas nuevas tecnologías.

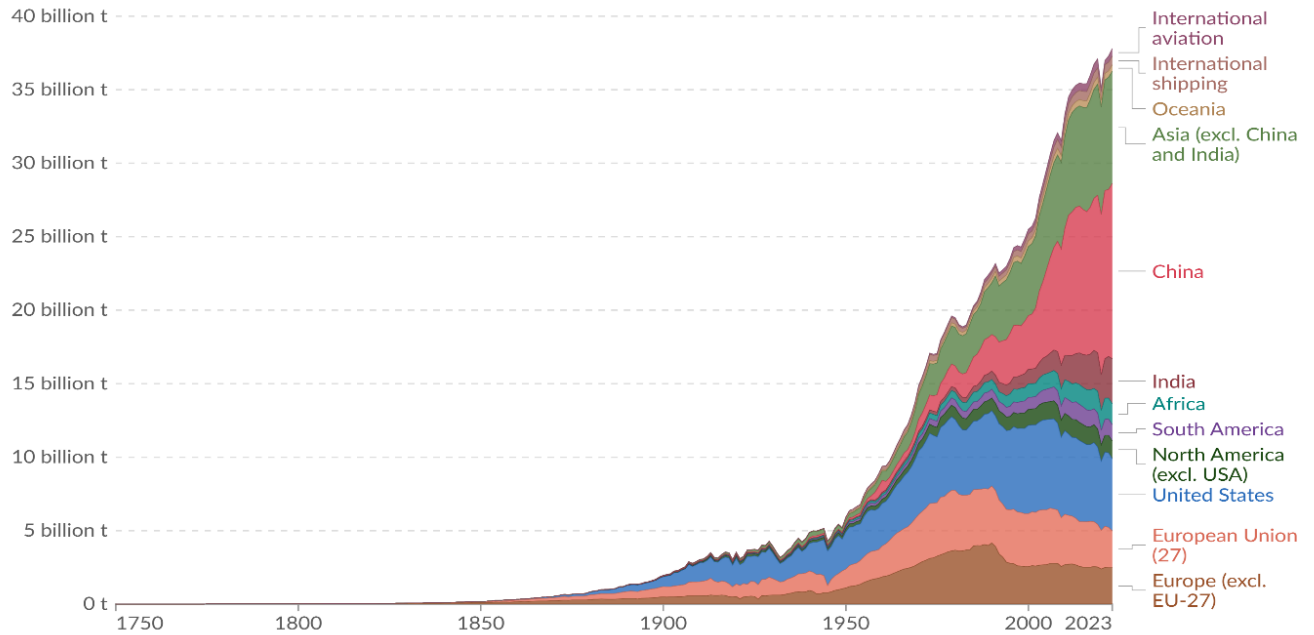
En este contexto, el despliegue de camiones a hidrógeno verde constituye un paso estratégico hacia el cumplimiento de las metas nacionales de carbono neutralidad al 2050, y su adopción requiere coordinación público–privada para garantizar que la transición tecnológica se traduzca en beneficios sociales, económicos y ambientales para la sociedad chilena (Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020)

Las nuevas normativas de eficiencia energética, que entrarán en vigor en 2028, representan una oportunidad única para transformar el sector del transporte pesado. Sin embargo, para que esta transformación sea exitosa, es necesario actuar ahora. La recopilación de datos, la caracterización del parque vehicular y la inversión en infraestructura serán pasos clave en este proceso. (Centro de Movilidad sostenible, 2024)

3.2. Impactos ambientales identificados

El cambio climático constituye una de las principales amenazas ambientales, sociales y económicas a nivel global. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), son responsables del aumento sostenido de la temperatura media del planeta, lo que altera de manera significativa el equilibrio de los ecosistemas. El calentamiento global se debe al incremento de la concentración de estos gases en la atmósfera, los cuales retienen la radiación térmica natural, intensificando el efecto invernadero. De acuerdo con datos del portal People in Need (2025), la temperatura promedio global ha aumentado en aproximadamente 1,1 °C desde 1880, mientras que el nivel del mar se ha elevado a una tasa media de 3,3 mm por año y se han perdido cerca de 418 mil millones de toneladas de hielo anualmente. Estos cambios se traducen en sequías más prolongadas, derretimiento de glaciares, incendios forestales más frecuentes y la degradación de hábitats naturales.

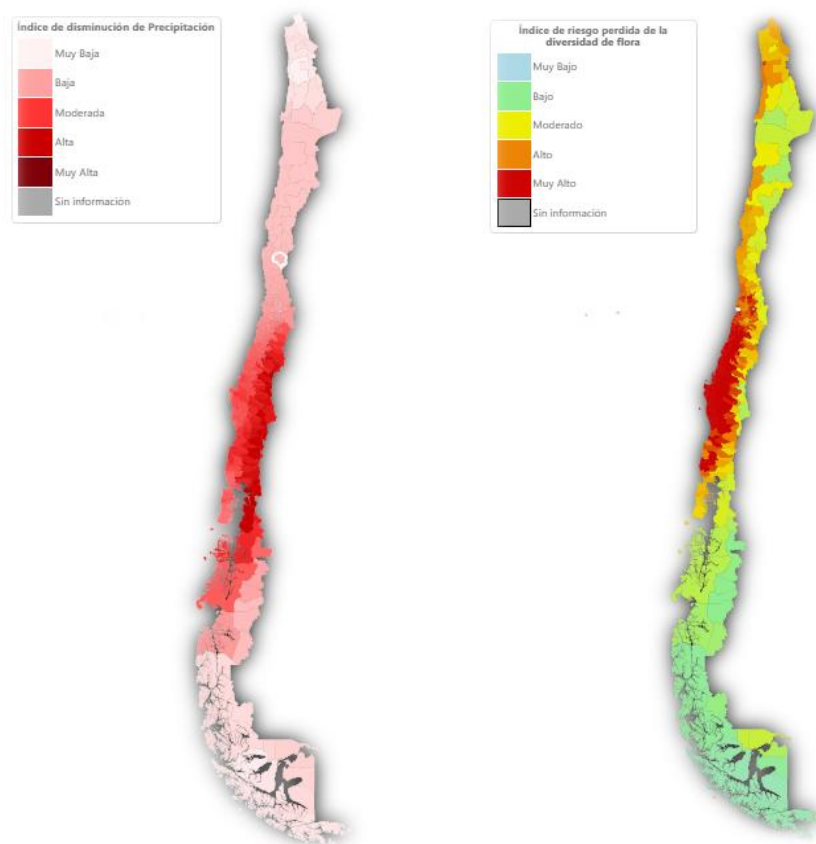
Figura 4. Emisiones anuales de CO₂ por región del mundo



Fuente. Ourworldindata, 2025

La figura anterior muestra el aumento exponencial de las emisiones de CO₂ a nivel global. Se observa que China lidera las emisiones, especialmente desde el año 2000, mientras que Estados Unidos mantiene niveles más estables. Este fenómeno se explica, en parte, por la densidad poblacional y el desarrollo industrial del país asiático, donde la actividad humana (efecto antrópico) representa la mayor fuente de emisiones. Según datos de Statista (2024), las emisiones globales alcanzaron 37,01 y 37,41 mil millones de toneladas métricas de CO₂ en 2023 y 2024, respectivamente, lo que demuestra que las medidas actuales aún no logran revertir la tendencia al alza. Estos incrementos afectan de forma directa la estabilidad del sistema climático y, por ende, a los ecosistemas naturales. El aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones modifican la disponibilidad hídrica, los patrones de vegetación y la distribución de especies animales y vegetales (MMA, 2022)

Figura 5. Índice de disminución de precipitación e índice de riesgo de pérdida de la diversidad de flora (2035-2065)

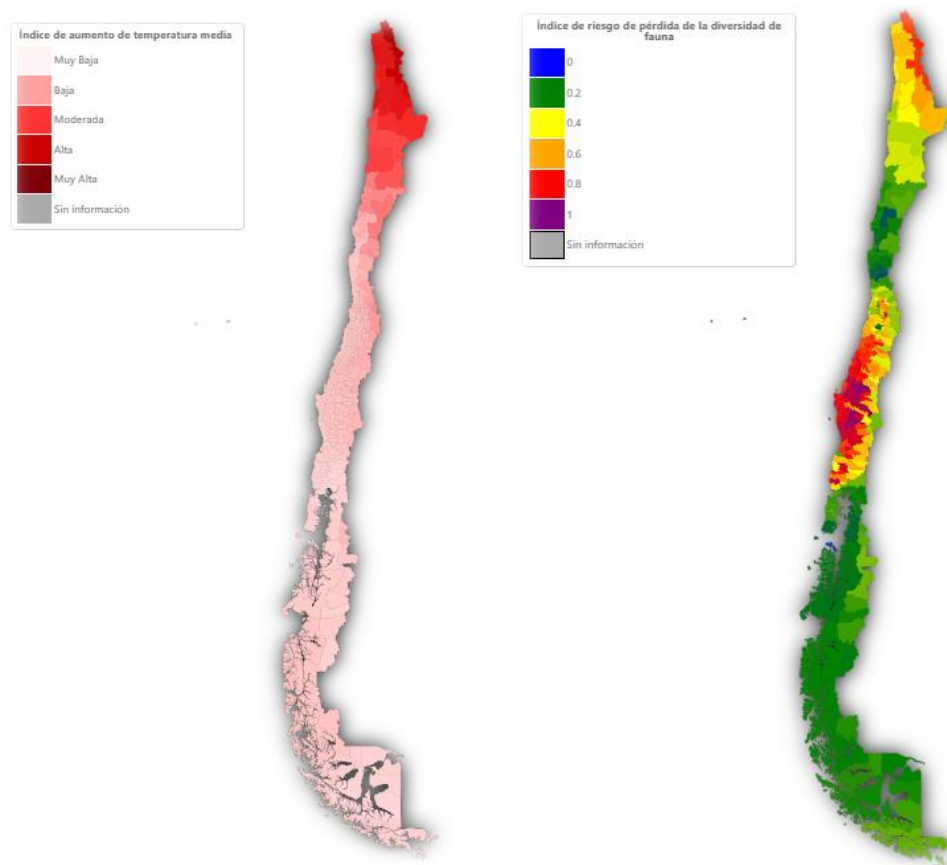


Fuente: Plataforma Atlas de riesgos climáticos ARClím, 2025.

De acuerdo con la figura 5, las zonas del centro del país presentan los mayores índices de disminución de precipitaciones y riesgo de pérdida de diversidad vegetal. Esta situación se relaciona con la desertificación progresiva y la degradación del suelo, fenómenos que comprometen servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica y la producción agrícola (ARClím, 2025).

Por otro lado, las olas de calor representan otro de los impactos más relevantes del cambio climático en Chile. Se estima que la temperatura media anual ha aumentado entre 1 y 2 °C, afectando directamente los hábitats naturales y forzando a muchas especies a desplazarse o adaptarse a condiciones térmicas extremas. (ECLP, 2021)

Figura 6. Índice de aumento de temperatura media e índice de riesgo de pérdida de la diversidad de fauna (2035-2065)

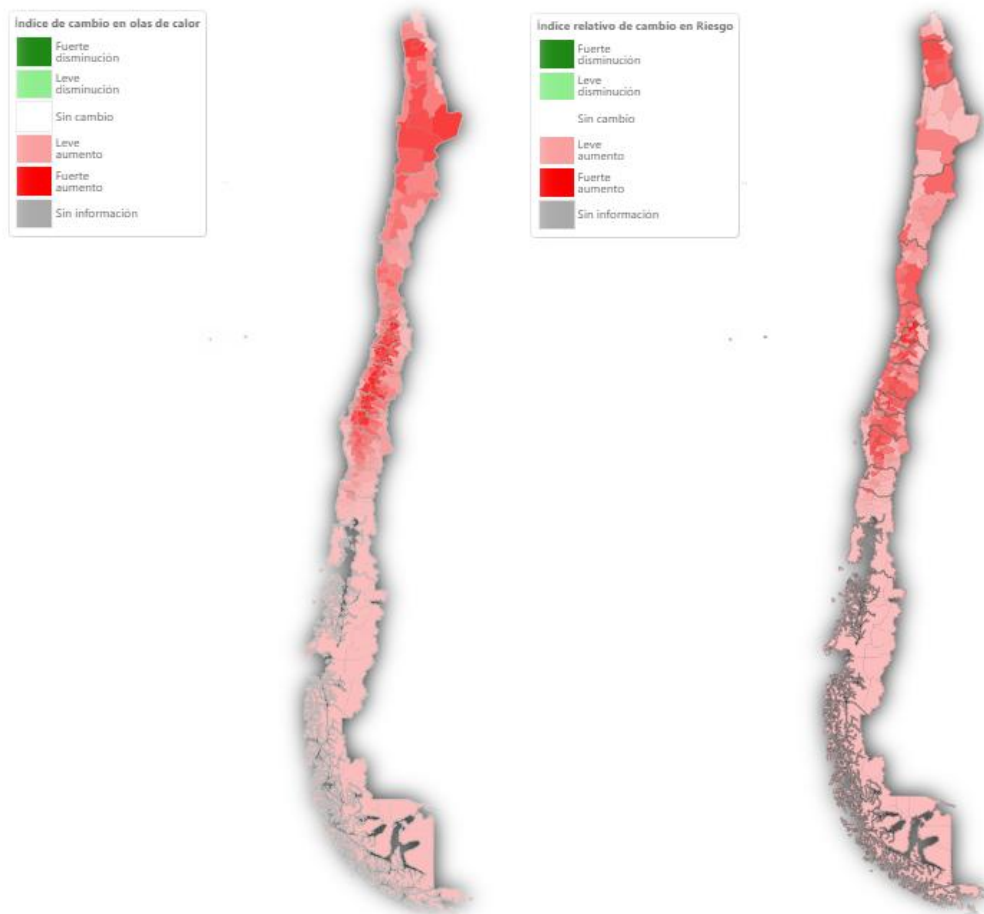


Fuente: Plataforma Atlas de riesgos climáticos ARClím, 2025.

La figura 6 evidencia un incremento notorio de la temperatura en el norte del país, acompañado de un mayor riesgo de pérdida de fauna en la zona centro, donde la biodiversidad es particularmente sensible al cambio de temperatura. La alteración térmica puede provocar migraciones de especies, pérdida de hábitats, e incluso extinciones locales, afectando la funcionalidad ecológica de los ecosistemas terrestres y acuáticos

Las olas de calor también tienen implicancias directas en la salud humana, aumentando la mortalidad y morbilidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Según ARClím (2025), y como se puede ver en la figura 7 se espera que la frecuencia e intensidad de las olas de calor aumenten en todo el territorio nacional, con mayor impacto en comunas del centro y norte del país. Estas variaciones representan un desafío para la adaptación de las comunidades y los ecosistemas, requiriendo estrategias de mitigación y resiliencia frente a los efectos del cambio climático.

Figura 7. Índice de cambio en olas de calor e índice relativo de cambio en riesgo (2035-2065)



Fuente: Plataforma Atlas de riesgos climáticos ARClím, 2025.

En síntesis, los impactos ambientales del cambio climático en Chile e intensificados por sectores emisores como el transporte pesado, se manifiestan en múltiples niveles: deterioro de la calidad del aire, pérdida de biodiversidad, desertificación, derretimiento de glaciares y afectaciones a la salud humana. Comprender estos efectos permite dimensionar la urgencia de avanzar hacia sistemas energéticos y de transporte más sostenibles, como la electromovilidad y el uso de hidrógeno verde, que reduzcan significativamente las emisiones de CO₂ y promuevan la adaptación climática del país.

3.3. Normativa Nacional e Internacional relacionada con el problema ambiental

El presente apartado describe las normativas nacionales e internacionales relevantes para abordar el problema ambiental de las emisiones de CO₂ en Chile, con un enfoque inicial en la reducción de gases de efecto invernadero provenientes del sector energético y de transporte. Posteriormente, se profundiza en las regulaciones específicas que promueven la electromovilidad y el hidrógeno verde, particularmente en buses y camiones, como alternativas sostenibles al diésel. Esta normativa

apoya la transición hacia una economía baja en carbono, alineada con los objetivos de carbono neutralidad al 2050.

3.3.1. Normativa Internacional

Chile ha suscrito varios convenios internacionales para combatir el cambio climático, enfocados en la reducción de emisiones de CO₂, siendo el principal es el Acuerdo de París (2015), ratificado por Chile en febrero de 2017 mediante el Decreto Supremo N° 30 del Ministerio de Relaciones Exteriores. Este acuerdo compromete a las partes a limitar el calentamiento global por debajo de 2°C, preferentemente 1.5°C, mediante Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC). En abril 2020 y en respuesta a las exigencias del acuerdo de París de actualizar los compromisos cada cinco años, Chile presentó formalmente la actualización de su NDC, donde estableció un objetivo incondicional de reducir las emisiones a 95 MtCO₂eq para 2030. (Ministerio de Hacienda)

En septiembre de 2025, se presentó la NDC 3.0 (2025-2035), que reafirma estos compromisos y enfatiza sectores como energía y transporte, con metas de reducción absoluta y adaptación. (United Nations Climate Change). Otros convenios incluyen el Protocolo de Kyoto (ratificado en 2002 pero que entró en vigor el 2005) que estableció mecanismos de mercado para reducir GEI, y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, ratificada en 1994). Estos abordan emisiones de CO₂ mediante informes bianuales y estrategias de largo plazo. (Ministerio del Medio Ambiente)

A continuación, se presenta una tabla resumen con los convenios internacionales y sus principales objetivos.

Convenio Internacional	Fecha Ratificación	Objetivos Principales
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	1994	Establece el marco para estabilizar concentraciones de GEI, incluyendo CO ₂ , para prevenir interferencias antropogénicas peligrosas en el clima.
Protocolo de Kyoto	2002	Compromisos cuantificados de reducción de emisiones (5% promedio global 2008-2012 vs. 1990), con mecanismos flexibles como comercio de emisiones.
Acuerdo de París	2017	Limitar calentamiento menor a 2°C
NDC 3.0 (2025-2035)	2025	Reducción de emisiones, carbono neutralidad 2050, enfoque en transporte y energía.

Tabla 1. Principales convenios internacionales suscritos por Chile sobre Cambio climático.

3.3.2. Normativa Nacional

- Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP)

Publicada en 2021 bajo el título “Camino a la carbono neutralidad y resiliencia al 2050”, esta estrategia establece el marco de descarbonización de Chile con metas a mediano y largo plazo.

Define los lineamientos generales para transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones, reducir la vulnerabilidad frente a los efectos adversos del cambio climático y aumentar la resiliencia del país, alineándose con los compromisos internacionales asumidos (Estrategia climática de largo plazo, 2021).

- Política Energética Nacional 2050 (PEN)

Actualizada en 2022 mediante el Decreto Supremo N°10, la PEN establece objetivos para un sector energético confiable, inclusivo, competitivo y sostenible. Entre sus principales compromisos está la revisión quinquenal de la política, para incorporar avances tecnológicos, cambios externos y nuevas prioridades sociales, la PEN se estructura sobre cuatro pilares: (i) seguridad y calidad de suministro, (ii) energía como motor de desarrollo, (iii) compatibilidad con el medio ambiente, y (iv) eficiencia y educación energética. Sobre estas bases se desarrollan las medidas y planes de acción proyectados hasta 2050 (Ministerio de energía, 2022)

- Planificación Energética de Largo Plazo (PELP)

Aprobada en agosto de 2025 mediante el Decreto 203 para el período 2023-2027, la PELP proyecta el sector energético con un horizonte de 30 años, integrando los objetivos de la NDC y la ECLP. Este plan contempla el retiro progresivo de centrales a carbón, el impulso al almacenamiento energético como soporte para la integración de energías renovables, el fomento de la electromovilidad y el desarrollo del hidrógeno verde como vector clave para alcanzar la carbono neutralidad. Además, la PELP incluye un mapa de potenciales energéticos del país para 2023-2070, donde la energía solar lidera con un potencial de 2.086 GW (Anexo 1). La PELP proporciona escenarios energéticos fundamentales para planificar la infraestructura necesaria, asegurar la integración de ERV de forma eficiente, orientar a los diversos sectores hacia alternativas limpias y garantizar un sistema energético confiable, en línea con los objetivos nacionales de cero emisiones y descarbonización del transporte y la industria (Ministerio de Energía, 2025).

- Ley de Eficiencia Energética (Ley N° 21.305)

Promulgada en 2021, establece estándares para vehículos nuevos, gestión energética en grandes consumidores y planes quinquenales, con el objetivo de reducir la intensidad energética en un 10% hacia 2030, generar ahorros económicos significativos y mitigar emisiones de CO₂. La normativa obliga a grandes empresas a reportar sus consumos y, si superan cierto umbral, implementar un Sistema de Gestión de la Energía (SGE). Además, promueve la renovación del parque vehicular con modelos más eficientes, especialmente eléctricos, apoyando la transición hacia la electromovilidad y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de carbono neutralidad y eficiencia energética establecidos en la Política Energética Nacional y la Estrategia Climática de Largo Plazo (Ministerio de Energía, 2022).

- Plan Nacional de Eficiencia Energética (2022-2026)

El Plan Nacional de Eficiencia Energética, desarrollado en el marco de la Ley 21.305, establece un programa que busca formalizar la estrategia del país en eficiencia energética, promoviendo ahorros sostenibles e impulsando la adopción de vehículos más eficientes y la electromovilidad. Este plan contempla medidas en diversos ámbitos: transporte, edificación, eficiencia energética residencial, estándares y etiquetado de artefactos, eficiencia en los sectores productivos, ciudades inteligentes, así como educación y capacitación en eficiencia energética.

A continuación, se presenta una tabla resumen con las principales políticas y normativas relacionadas con eficiencia energética, destacando su vinculación con la electromovilidad y el hidrógeno verde, debido a que el transporte es responsable de las mayores emisiones GEI en Chile

Política Nacional	Año Publicación	Metas claves	Relación con electromovilidad / H2V
ECLP	2021	Carbono Neutralidad 2050	Base para transición a transporte limpio
PEN	2022	80% generación de energías renovables al 2050	Fomenta electrificación del transporte y generación de H2V
		Promover electrificación del transporte y producción de hidrógeno verde	
PELP	2023 (Aprobada 2025)	Proyecciones energéticas a 30 años	Prioriza H2V y electromovilidad, planificación de infraestructura
		Planificación infraestructura Electromovilidad	
Ley 21.305	2021	Estándares de eficiencia energética para vehículos nuevos	Renovación del parque vehicular; impulso a vehículos eléctricos
		Reducción del 10% en intensidad energética para grandes consumidores al 2030	
Plan Nacional EE	2022-2026	Promoción electromovilidad	Incentivos para vehículos eléctricos y eficiencia energética en transporte
		Ahorro energético acumulado	
		Eficiencia energética en sectores residenciales, productivos y transporte	

Tabla 2. Políticas Nacionales para reducción CO₂ e impulso electromovilidad/H2V.

3.3.3. Transición a camiones de Hidrógeno verde: Electromovilidad e Hidrógeno Verde

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020), actualizada en 2025, posiciona a Chile como un actor clave en la producción global de hidrógeno verde, con metas de alcanzar 5 GW de capacidad de electrólisis al 2025 y expandir las exportaciones. El país ha asumido un compromiso decidido y ambicioso con la acción climática (Ministerio de Energía, 2020). Esta estrategia incorpora al sector transporte mediante el desarrollo de buses y camiones impulsados por celdas de combustible (FCEV). En 2025, se lanzó además un Plan de Acción Nacional del Hidrógeno Verde, que contempla

incentivos tributarios de hasta US\$ 2.800 millones para productores y proyectos asociados (Ministerio de Hacienda, 2025).

El hidrógeno verde (H2V) representa la evolución sostenible de un gas industrial ampliamente utilizado desde hace siglos: el hidrógeno elemental (H2). Actualmente, se produce a partir del agua mediante un proceso de electrólisis que separa hidrógeno y oxígeno utilizando energía eléctrica renovable, lo que permite generar un vector energético limpio, versátil y sin emisiones de gases de efecto invernadero. Este combustible puede reemplazar fuentes fósiles en la generación eléctrica, térmica e incluso en procesos industriales como la industria química, petroquímica, calderas, redes de gas y agricultura, además de su creciente aplicación en transporte.

Chile posee uno de los mayores potenciales mundiales para el desarrollo del hidrógeno verde, con más de 1.800 GW de recursos energéticos renovables, equivalentes a 70 veces la demanda eléctrica nacional (Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020). Según proyecciones al 2060, el país podría alcanzar un costo nivelado de producción entre 0,8 y 1,1 USD/kg H2, lo que lo posiciona como el más competitivo a nivel global. El potencial de producción alcanza los 160 millones de toneladas anuales, destacando el Desierto de Atacama y la Región de Magallanes como zonas con los menores costos de generación al 2030, gracias a la calidad de sus recursos solares y eólicos.

La descarbonización energética y la competitividad en energías renovables permiten a Chile crear un nuevo sector económico capaz de equiparar en magnitud a la minería, transitando de una economía basada en recursos no renovables hacia una nación exportadora de energéticos limpios con alto valor agregado (Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020).

En materia de electromovilidad, el Acuerdo por la Electromovilidad 2025 impulsa la expansión de flotas de buses eléctricos e híbridos H2V hacia regiones como Biobío y Atacama. Este acuerdo busca articular a empresas e instituciones públicas y privadas activas en la materia, fomentando la colaboración y la coordinación para consolidar un ecosistema tecnológico y normativo sólido. Entre los compromisos actuales destacan:

- **Infraestructura de carga:** desarrollo de una red pública robusta y segura para vehículos eléctricos a nivel nacional.
- **Transporte público y descentralización:** mejora y ampliación del transporte público con cobertura regional.
- **Educación y capacitación:** formación de técnicos especializados en las nuevas cadenas de valor.
- **Seguridad vial:** establecimiento de estándares técnicos y protocolos de seguridad para la operación y mantenimiento de vehículos eléctricos.
- **Regulación:** actualización del marco legal y reglamentario para facilitar la adopción tecnológica.

Actualmente, 175 empresas e instituciones integran este acuerdo público-privado, consolidando una base colaborativa para la transición hacia un transporte sostenible (Acuerdo por la Electromovilidad, 2025).

El hidrógeno verde complementa las tecnologías de baterías, especialmente en vehículos de carga pesada, donde los buses FCEB alcanzan autonomías superiores a 300 km sin emisiones y con tiempos de recarga significativamente menores. Esta tecnología se perfila como el complemento estratégico a los vehículos eléctricos a baterías (BEV) (Ministerio de Energía, 2025). Un ejemplo destacado es el primer camión de hidrógeno certificado en Chile, con capacidad de 49 toneladas, desarrollado por Walmart y Marval, el cual ofrece un desempeño equivalente al diésel, pero con emisiones netas de CO₂ iguales a cero.

En el ámbito normativo, el Estudio de Transporte de Hidrógeno 2025 establece las bases regulatorias para la operación de buses y camiones a hidrógeno, abordando aspectos de seguridad, homologación y estándares técnicos. En paralelo, la Hoja de Ruta de Electromovilidad fija como meta que el 100 % del transporte público sea de cero emisiones al 2050, promoviendo el uso del hidrógeno en rutas de larga distancia. A ello se suman iniciativas como HyVolution Chile 2025, que fomentan inversiones y alianzas estratégicas para acelerar la movilidad basada en hidrógeno.

4. Metodología

La metodología de este estudio se centra en evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de camiones a hidrógeno verde en comparación con camiones a diésel en el contexto chileno, considerando el rendimiento operativo, los costos de propiedad, la infraestructura y las condiciones del mercado energético. El enfoque aplicado busca integrar información técnica, económica y normativa para identificar los escenarios donde la adopción de camiones a H2V resulta competitiva frente a las tecnologías convencionales.

El estudio se desarrolló como una investigación técnico-económica de carácter aplicado, estructurada en dos etapas principales asociadas a los objetivos específicos: el análisis comparativo del desempeño técnico y económico entre camiones H2V y diésel, y la determinación de los precios y condiciones óptimas que permitan la competitividad del hidrógeno verde en el transporte pesado nacional. La información fue recopilada principalmente a partir de fuentes oficiales, literatura técnica e informes especializados del Ministerio de Energía, CORFO, AgenciaSE, Hydrogen Council, y estudios internacionales de la Agencia Internacional de Energía (IEA). Complementariamente, se incorporaron datos técnicos de fabricantes como Hyundai, Toyota y Volvo sobre consumo, autonomía y eficiencia de vehículos de carga pesada tipo FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle).

La modelación de los escenarios y los cálculos comparativos se desarrollaron en Microsoft Excel, utilizando Solver para la optimización de variables económicas.

4.1. Objetivo Específico 1

Para evaluar el desempeño operativo y económico de camiones H2V frente a camiones diésel, se realizará un análisis comparativo considerando autonomía, consumo energético, kilómetros recorridos, costos de combustible y escalas de flota. Se definirá un caso base representativo: un camión de carga de 49 toneladas (clase N3) en transporte interurbano, recorriendo 100,000 km/año. Los datos se obtendrán de fabricantes (Hyundai, Toyota, Nikola, Volvo, Scania), reportes de la IEA y CORFO. Se compararán tres escalas de flota (10, 50 y 100 camiones) para evaluar economías de escala.

La información utilizada para la estimación de parámetros provendrá de fuentes nacionales e internacionales. Para los camiones diésel, se adoptará un rendimiento promedio equivalente a 2,5 km/L, valor consistente con el consumo medio de 39 L/100 km utilizado en la Tabla 4 para los modelos diésel evaluados, y con los parámetros detallados por vehículo en la Tabla 5, ambos parámetros representan la misma base operativa expresada en unidades inversas. Para los camiones H2V (FCEV), se considerará un consumo promedio de 8,5 kg H2/100 km, parámetro coherente con los valores promedio de la Tabla 4 y el desglose por modelo en la Tabla 5. Los precios de combustible varían por escenario: (1) Actual 2025: H2 = USD 5,00/kg, Diésel = USD 1,03/L; (2) Intermedio: H2 = USD 3,00/kg (producción local creciente), Diésel = USD 1,20/L; (3) Meta 2030: H2 = USD 2,00/kg (Estrategia Nacional), Diésel = USD 1,20/L.

El cálculo del consumo anual de combustible se realizará mediante la ecuación:

$$E_{total} = \frac{D_{anual}}{R} \quad (1)$$

Donde E_{total} representa el consumo total de combustible (kg H₂ o L diésel/año), D_{anual} corresponde a la distancia recorrida anualmente (km/año), y R es el rendimiento energético (km/kg o km/L).

Posteriormente, se determinará el costo anual de combustible mediante:

$$C_{comb} = E_{total} * P \quad (2)$$

Donde P corresponde al precio unitario del combustible, luego para obtener una evaluación integral de la competitividad de ambas tecnologías, se calculará el Costo Total de Propiedad (TCO), el cual integra tanto la inversión inicial como los costos operativos en un horizonte de 10 años, este se expresa como:

$$TCO = \frac{CAPEX + OPEX * n}{D_{anual} * n} \quad (3)$$

Donde CAPEX incluye vehículo, OPEX son costos operacionales anuales (combustible + mantenimiento), n es vida útil (10 años), y D_{anual} es kilometraje anual. El TCO se expresa en USD/km para comparación directa entre tecnologías bajo diferentes condiciones operacionales.

Lo anterior, se complementa con cálculo del costo de abatimiento (CAC) de emisiones, el cual es un indicador de viabilidad climática:

$$CAC = \frac{\text{Costo extra H2V (10 años)}}{\text{Ton CO2 evitadas (10 años)}} \quad (4)$$

donde el numerador es la diferencia de costo total entre H₂V y diésel, el denominador es consumo diésel anual × factor emisión (2,74 kg CO₂/L, para combustión móvil diésel, según HuellaChile, Ministerio de medio Ambiente) × 10 años. Un CAC positivo indica costo económico para reducir emisiones; un CAC negativo indica win-win: más barato y menor emisiones simultáneamente.

4.2. Objetivo Especifico 2

El segundo objetivo específico tiene como propósito determinar los precios, condiciones de operación y variables críticas que permiten alcanzar la competitividad del hidrógeno verde frente al diésel en el transporte de carga pesada. Para ello, se desarrollará una modelación y análisis de sensibilidad que considerará diferentes combinaciones de variables operativas y de mercado.

Las principales variables modeladas respecto a H₂V serán el precio, la autonomía, kilómetros anuales recorridos y el CAPEX de los camiones. Se utilizará Microsoft Excel con solver para identificar el precio de equilibrio del hidrógeno.

La función objetivo para solver es:

$$TCO_{H2V}(P_{H2}) - TCO_{Diésel} = 0 \quad (5)$$

Solver optimizará el precio de equilibrio del H2, definido como el valor donde TCO H2V = TCO diésel bajo condiciones fijas, configurando como celda objetivo la diferencia entre ambos TCO sea igual a 0, con el precio del H2 como variable de decisión sujeta a restricciones realistas: 1,5 USD/kg ≤ precio ≤ 10 USD/kg.

Posteriormente, se aplicará análisis determinista variando 4 parámetros un ±10 (Precio H2, Consumo, Km anuales, CAPEX) respecto al caso base para identificar qué variables tienen mayor impacto en TCO. El cálculo del coeficiente de sensibilidad se realizará mediante la siguiente expresión:

$$S_i = \frac{\Delta TCO / TCO_{base}}{\Delta X_i / X_{i_{base}}} \quad (5)$$

donde S_i es la sensibilidad del TCO ante un cambio porcentual en la variable X_i . Los resultados se representarán mediante gráficos tipo tornado, los cuales muestran visualmente la magnitud e influencia de cada parámetro.

Diagnostico Técnico-Económico

La integración de los análisis de ambos objetivos específicos permitirá construir un diagnóstico técnico-económico completo que identificará los escenarios en los cuales los camiones de hidrógeno verde (H2V) son competitivos frente a los camiones diésel en Chile. Este diagnóstico considerará tanto los costos operativos, a través del Costo Total de Propiedad (TCO), como los beneficios ambientales asociados a la reducción de emisiones de CO₂, alineándose con los objetivos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y la Ley de Eficiencia Energética (Ley N° 21.305). A partir del primer objetivo específico, se obtendrán comparaciones detalladas de TCO y emisiones, destacando escenarios donde el H2V resulta competitivo, como precios de hidrógeno verde inferiores a 3 USD/kg y flotas superiores a 50 camiones. Del segundo objetivo específico, se definirán las condiciones óptimas para maximizar la viabilidad económica.

El diagnóstico final servirá como base para formular recomendaciones prácticas, incluyendo:

- **Escenarios de adopción tecnológica:** Proyecciones a corto (2026-2030) y mediano plazo (2030-2035) para la incorporación de camiones H2V en rutas logísticas y mineras.
- **Lineamientos para flotas piloto:** Implementación de flotas piloto.
- **Umbrales de precios y condiciones regulatorias:** Definición de precios objetivo del H2V y políticas de incentivos basadas en normativas como la Ley 21.305 y el Estudio Transporte H2, que promuevan la seguridad y adopción del hidrógeno verde.

Estas recomendaciones facilitarán la introducción del hidrógeno verde como una alternativa sostenible en el transporte pesado, contribuyendo a la reducción de emisiones y al cumplimiento de los compromisos climáticos de Chile hacia la carbono neutralidad al 2050.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del análisis técnico-económico de camiones a hidrógeno verde frente a camiones diésel en Chile. El análisis se organiza en tres ejes principales: (1) desempeño operativo y económico comparativo entre tecnologías, con enfoque en Costo total de propiedad (TCO), (2) análisis de TCO por escenarios macroeconómicos que reflejan la evolución de precios esperada, (3) efecto del tamaño de flota en viabilidad económica, (4) análisis de sensibilidad para identificar variables críticas, y (5) costo de abatimiento de emisiones como indicador de viabilidad climática.

La evaluación se basó en datos operacionales de vehículos comercialmente disponibles: Hyundai XCIENT Fuel Cell (48 unidades operando en Suiza con 10+ millones de km acumulados), Walmart-Marval H2V (primer camión H2V operativo en Chile, 2024) y camiones diésel de referencias internacionales (Mercedes-Benz Actros, Volvo FH540, Scania R500). Estos datos fueron validados contra literatura internacional (ICCT 2022, Burke 2022, ADB 2024) y alineados con la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile y la NDC 3.0 (2025).

Los resultados permiten identificar puntos de equilibrio económico donde la tecnología H2V se vuelve competitiva, así como las condiciones operacionales y de política pública necesarias para acelerar la transición hacia un transporte de carga pesada descarbonizado.

5.1. Desempeño Operativo y Económico

5.1.1. Parámetros Base

El análisis se fundamentó en parámetros técnicos de dos grupos de referencia, los camiones diésel convencionales (Mercedes-Benz Actros, Volvo FH540, Scania R500, Chevrolet EXZ) y camiones a H2V con celda de combustible (Hyundai XCIENT Fuel Cell, Walmart-Marval, Toyota T680, Nikola TRE FCEV). Todos los vehículos corresponden a la clasificación Clase 8 (Tractocamiones 40-49 toneladas, según decreto supremo 158/1980).

Parámetro	Unidad	Diesel (ref)	H2V (ref)
Consumo	L/100 km o kg/100 km	39	8,5
Mantenimiento	USD/km	\$ 0,123	\$ 0,093
Vida útil	Años	10	10
km/año operación	km	100000	100000
Capex Promedio	USD	\$ 150.000	\$ 420.000

Tabla 3. Parámetros Base para cálculos de TCO

Los parámetros utilizados se encuentran dentro de rangos reportados por literatura internacional y coinciden con especificaciones operacionales de vehículos comercialmente disponibles en Chile. El consumo H2V de 8,5 kg/100 km es consistente con datos operacionales del Hyundai XCIENT en Suiza (2024) y especificaciones técnicas del prototipo Walmart-Marval (2024). El CAPEX de USD 420.000 para H2V refleja precios de lista 2024 de fabricantes (rango: Nikola USD 390.000–Toyota USD 450.000); el de USD 150.000 para diésel es promedio de industria latinoamericana.

5.1.2. Cálculo TCO

El costo total de propiedad (TCO) se define como el costo completo de operación de un vehículo durante su vida útil, expresado en USD/km. Por ejemplo, para un escenario actual 2025, un camión diésel Mercedes Actros, se tiene lo siguiente:

- CAPEX: USD 150.000
- Consumo Anual: 39 L/100 km * 100.000 km = 39.000 L
- Costo combustible 10 años: 39.000 L/año * 1,03 USD/L * 10 años= USD 401.700
- Costo mantenimiento 10 años: 1.000.000 km * 0,123 USD/km = USD 123.000
- OPEX total: USD 401.700 + USD 123.000 = USD 524.700
- Costo Total 10 años: USD 150.000 + USD 524.700 = 674.700
- TCO = USD 674.700/1.000.000 km = USD 0,674/km

Este cálculo se replicó para 8 modelos de vehículos en tres escenarios macroeconómicos, permitiendo comparaciones, se consideró los precios de combustible 2025 de 1,03 USD/L para el diésel y 5 USD/kg para el H2V.

Tipo	Marca	Modelo	Consumo (100km)	Unidad	Precio Camión (USD)	TCO (USD/km)
Diésel	Mercedes Benz	Actros 2651 LS	39	L/100 KM	\$145.000	0,67
	Chevrolet	Serie EXZ	38	L/100 KM	\$115.000	0,63
	Volvo	FH540	40	L/100 KM	\$175.000	0,71
	Scania	R500/R540	39	L/100 KM	\$165.000	0,69
H2V	Nikola	TRE FCEV	9	kg/100km	\$390.000	0,93
	Hyundai	XCIENT	8,5	kg/100km	\$420.000	0,94
	Toyota	T680	8,1	kg/100km	\$450.000	0,95
	Walmart Marval		10	kg/100km	\$400.000	0,99

Tabla 4. TCO Por tipo y modelo de tractocamión (Escenario Actual 2025)

En el escenario actual, el rango de TCO es 0,63–0,71 USD/km para diésel y 0,93–0,99 USD/km para H2V. El promedio ponderado por tipo de combustible es 0,68 USD/km (diésel) vs 0,95 USD/km (H2V).

5.2. Análisis TCO por escenarios

5.2.1. Escenario Actual (2025)

En el escenario actual, que refleja la situación de Chile en 2025 con producción de H2 limitada (principalmente piloto o importado, USD 5,00/kg), se observa una brecha significativa y no viable de competitividad económica entre H2V y diésel.

Concepto	Diesel	H2V	DIFERENCIA
Capex Camión (USD)	\$ 150.000	\$ 420.000	\$ 270.000
Costo Combustible anual (USD)	\$ 40.208	\$ 44.502	\$ 4.294
Mantenimiento anual (USD)	\$ 12.300	\$ 9.300	\$ -3.000
OPEX anual (USD)	\$ 52.508	\$ 53.802	\$ 1.294
OPEX total 10 años (USD)	\$ 525.080	\$ 538.020	\$ 12.940
Costo total 10 años(USD)	\$ 675.080	\$ 953.000	\$ 277.920
TCO (USD/km)	0,68	0,95	39,71%

Tabla 5. TCO escenario Actual 2025 (H2= 5 USD/kg, Diesel = 1,03 USD/L)

Existe una diferencia del 39,71 % en el TCO entre H2V respecto al Diesel. Esto implica que el camión a hidrógeno verde presenta un costo por kilómetro operativo un 39,71 % superior al de su equivalente diésel, lo que se traduce en una diferencia acumulada aproximada de USD 277.200 en un horizonte de 10 años.

1. **Costo de capital (Capex):** Explica USD 270.000 (103% del diferencial total). El H2V cuesta USD 420.000 vs USD 150.000 del diésel (2,8 veces más caro).
2. **Costo de combustible:** Aunque el H2V consume menos energía por km el precio del H2 es 4,85 veces superior al diésel resultando en costo total superior.
3. **Costo de mantenimiento:** Ahorro de USD 3.000 para H2V (USD 0,093/km vs USD 0,123/km diésel), reflejando menor desgaste por ausencia de combustión interna. Sin embargo, este ahorro es marginal frente al premium de CAPEX.
4. **Neto OPEX:** Ambas tecnologías tienen OPEX similar (USD 52.470 diésel vs USD 51.800 H2V), demostrando que operacionalmente son equivalentes; la brecha es puramente de CAPEX.

El Hidrógeno verde no económicamente competitivo en 2025 sin subsidios significativos en CAPEX del vehículo. Los operadores logísticos elegirían diésel a menos que existan subvenciones directas como de CORFO, restricciones a vehículos diésel o presiones corporativas. Este escenario refleja la realidad de 2024–2025 en Chile, donde el hidrógeno verde aún está en fase de producción piloto y los precios no han alcanzado los niveles de competitividad que se proyectan para 2030.

5.2.2. Escenario Intermedio (2027-2029)

El escenario intermedio, alineado con proyecciones de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020), asume una producción local creciente de Hidrógeno verde en el 2027–2029, reduciendo su precio a 3,00 USD/kg (desde 5,00 actual).

Concepto	Diesel	H2V	DIFERENCIA
Capex Camión (USD)	\$ 150.000	\$ 420.000	\$ 270.000
Costo Combustible anual (USD)	\$ 46.800	\$ 25.500	\$ -21.300
Mantenimiento anual (USD)	\$ 12.300	\$ 9.300	\$ -3.000
OPEX anual (USD)	\$ 59.100	\$ 34.800	\$ -24.300
OPEX total 10 años (USD)	\$ 591.000	\$ 348.000	\$ -243.000
Costo total 10 años(USD)	\$ 741.000	\$ 768.000	\$ 27.000
TCO (USD/km)	0,74	0,77	3,64%

Tabla 6. TCO escenario intermedio (H2= 3 USD/kg, Diesel = 1,2 USD/L)

La reducción de brecha es dramática: de +39% (2025) a apenas +3,6% (2027–2028), equivalente a USD 27.000 en 10 años.

Desglose de Cambios:

1. **Precio H2:** Baja de 5,00 a 3,00 USD/kg (–40%)
2. **Costo combustible 10 años:** Ahorro H2V de USD 19.002 (de USD 44.502 a USD 25.500)
3. **Precio diésel:** Sube a 1,20 USD/L (inflación estimada 3% anual 2025–2029), aumentando costo diésel de USD 40.208 a USD 46.800
4. **Neto OPEX:** H2V es ahora 41% más barato en operación (USD 34.800 vs USD 59.100 diésel)

El escenario muestra un punto de inflexión económico: aunque los camiones a hidrógeno (H2V) siguen siendo un 3,6% más caros por kilómetro en costo total, esa diferencia es tan pequeña que factores externos podrían inclinar la balanza a su favor. La regulación ambiental (Ley 21.305), la presión de objetivos corporativos, el acceso a financiamiento verde y los contratos de suministro estables reducen el riesgo y mejoran su atractivo. Con un precio estimado de H2 de 3 USD/kg para 2027–2028 (coherente con el ritmo de expansión nacional y la baja de costos de producción), los H2V alcanzarían viabilidad marginal sin depender de subsidios, abriendo la puerta para una adopción sostenida entre empresas con compromisos ambientales o de exportación.

5.2.3. Escenario Meta 2030

Si se alcanzan los objetivos explícitos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (Ministerio de Energía 2020), el hidrógeno verde bajará menor a 1,5 USD/kg al 2030, haciendo H2V claramente competitivo económicamente.

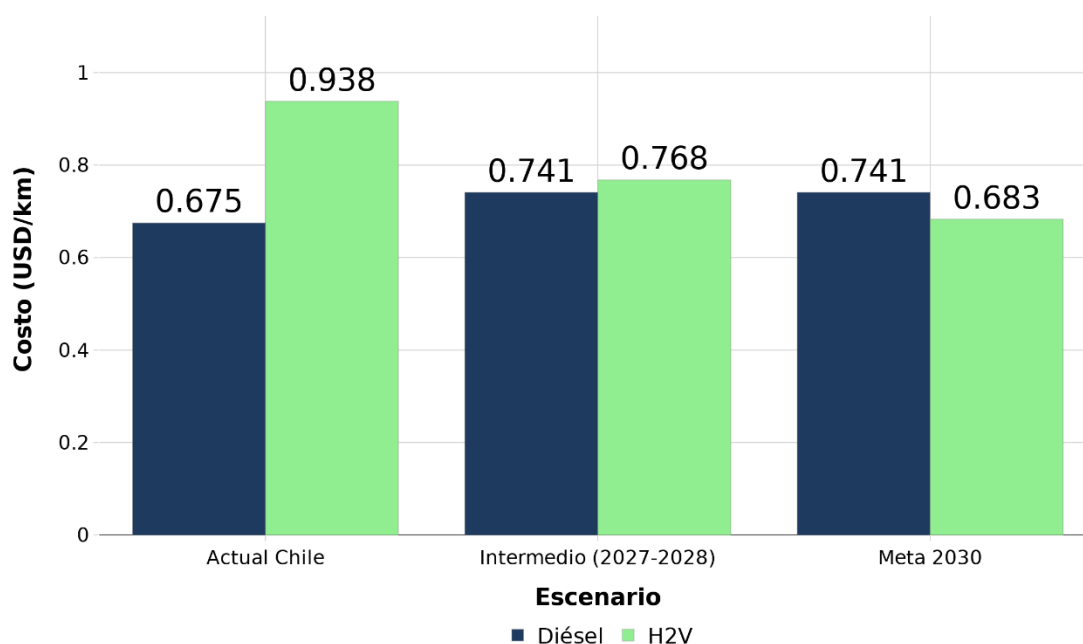
Concepto	Diesel	H2V	DIFERENCIA
Capex Camión (USD)	\$ 150.000	\$ 420.000	\$ 270.000
Costo Combustible anual (USD)	\$ 46.800	\$ 17.000	\$ -29.800
Mantenimiento anual (USD)	\$ 12.300	\$ 9.300	\$ -3.000
OPEX anual (USD)	\$ 59.100	\$ 26.300	\$ -32.800
OPEX total 10 años (USD)	\$ 591.000	\$ 263.000	\$ -328.000
Costo total 10 años(USD)	\$ 741.000	\$ 683.000	\$ -58.000
TCO (USD/km)	0,74	0,68	-7,83%

Tabla 7. TCO escenario Meta 2030 (H2= 1,5 USD/kg, Diesel = 1,2 USD/L)

El análisis de costo total muestra que los camiones a hidrógeno alcanzan USD 0,68/km frente a USD 0,74/km del diésel, logrando un ahorro del 7,8% sin necesidad de subsidios adicionales después de 2030. Este resultado permite justificar la inversión inicial, ya que los ahorros operativos cubrirían el sobre costo de capital, y respalda las metas NDC 3.0 al hacer económicamente viable que la carga pesada sea a hidrógeno en 2050. Con su potencial renovable de 1.800 GW y costos proyectados de H2 verde bajo 2 USD/kg, Chile podría operar con costos inferiores a cualquier país de la OCDE, abriendo espacio a nuevas industrias de manufactura y exportación de vehículos a celda de combustible. La meta 2030 es alcanzable y deseable, siempre que exista una coordinación público-privada enfocada en infraestructura de producción y recarga, fabricación local y políticas que impulsen flotas piloto.

A continuación, se presenta un gráfico el cual muestra las 3 opciones con sus respectivos TCO, donde se puede apreciar la diferencia en la meta 2030 y la diferencia mínima en el escenario intermedio.

Figura 8. Comparación de TCO por escenario.



Fuente: Elaboración propia.

5.3. Efecto del tamaño de flota en viabilidad económica.

Un hallazgo crítico, pero frecuentemente omitido en evaluaciones de H2V es que el costo de infraestructura de recarga (hidrolinera) impacta significativamente el TCO, especialmente en flotas pequeñas. A diferencia de combustibles convencionales, H2 requiere infraestructura dedicada que debe dimensionarse para volúmenes específicos.

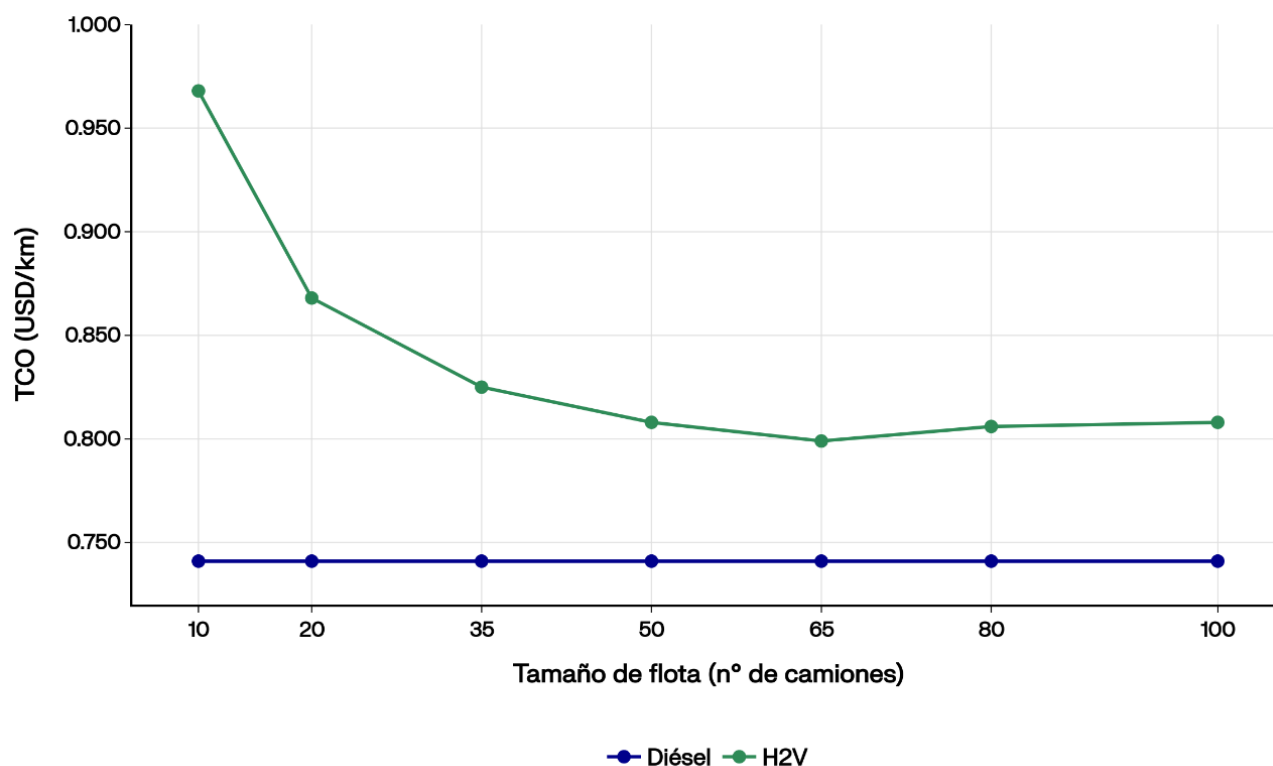
5.3.1. Análisis de infraestructura: Break-even de Flota

Se adopta una capacidad de 800 kg H2/día para una hidrolinera con un CAPEX de USD 2,0 millones, valor intermedio coherente con el rango de 670–1.000 kg/día que se obtiene al aplicar los factores de costo por kg/días reportados por el DOE Hydrogen Program y NREL para estaciones de media

escala. Con un consumo de 8 kg/100 km (0,08 kg/km), esta estación puede suministrar alrededor de 10.000 km/día de operación total; si se asume un uso típico de 200 km/día por camión, la infraestructura resulta suficiente para una flota máxima de 50 camiones, equivalente a 16 kg/día por vehículo. En los escenarios de tamaño de flota 10, 20, 35, 50, 65, 80 y 100 camiones, la misma capacidad de 800 kg/día implica autonomías efectivas cercanas a 1.000, 500, 286, 200, 154, 125 y 100 km/día por vehículo, de modo que una flota de 100 camiones podría operar solo a 100 km/día por camión, quedando subabastecida respecto de un caso base de 200 km/día por camión.

Para el análisis del TCO por tamaño de flota, se utilizan dos escenarios de precios: un escenario intermedio, con precio del hidrógeno de 3,0 USD/kg y diésel de 1,2 USD/L, y un escenario optimista alineado con la meta 2030, que proyecta hidrógeno verde por debajo de 2,0 USD/kg, manteniendo los parámetros base definidos en la Tabla 3. El CAPEX de la hidrolinera se modela como USD 2,0 millones para flotas entre 10 y 65 camiones, USD 3,0 millones para una flota de 80 camiones y USD 4,0 millones para una flota de 100 camiones, reflejando el aumento de capacidad necesario para sostener mayores volúmenes de demanda de hidrógeno.

Figura 9. TCO según tamaño de flota en escenario intermedio

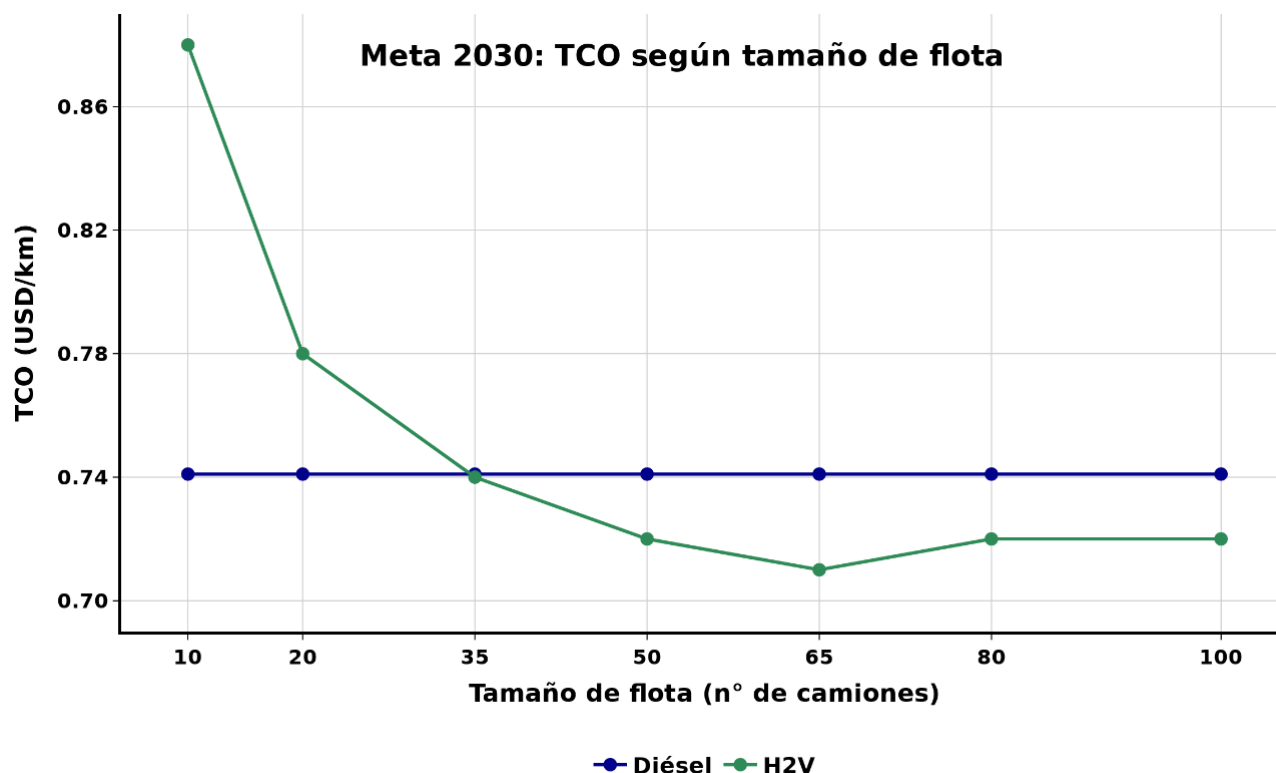


Fuente: Elaboración propia.

A un precio intermedio del hidrógeno y manteniendo un CAPEX de USD 420.000 por camión H2V, la flota a hidrógeno no llega a igualar el TCO del diésel en ninguno de los tamaños analizados. El punto de mayor acercamiento se observa con una flota de 65 camiones, asociada a una hidrolinera de 800 kg/día que permite una autonomía efectiva de unos 154 km/día por vehículo, donde la

brecha se reduce a aproximadamente 7,8% a favor del diésel. Para una flota de 50 camiones la diferencia de TCO ronda el 9%, pero la tendencia descendente del TCO H2V a medida que aumenta el tamaño de flota sugiere que, en el largo plazo y con mejoras adicionales de costos, la alternativa a hidrógeno podría volverse competitiva.

Figura 10. TCO según tamaño de flota en escenario optimista (Meta 2030).



Fuente: Elaboración propia.

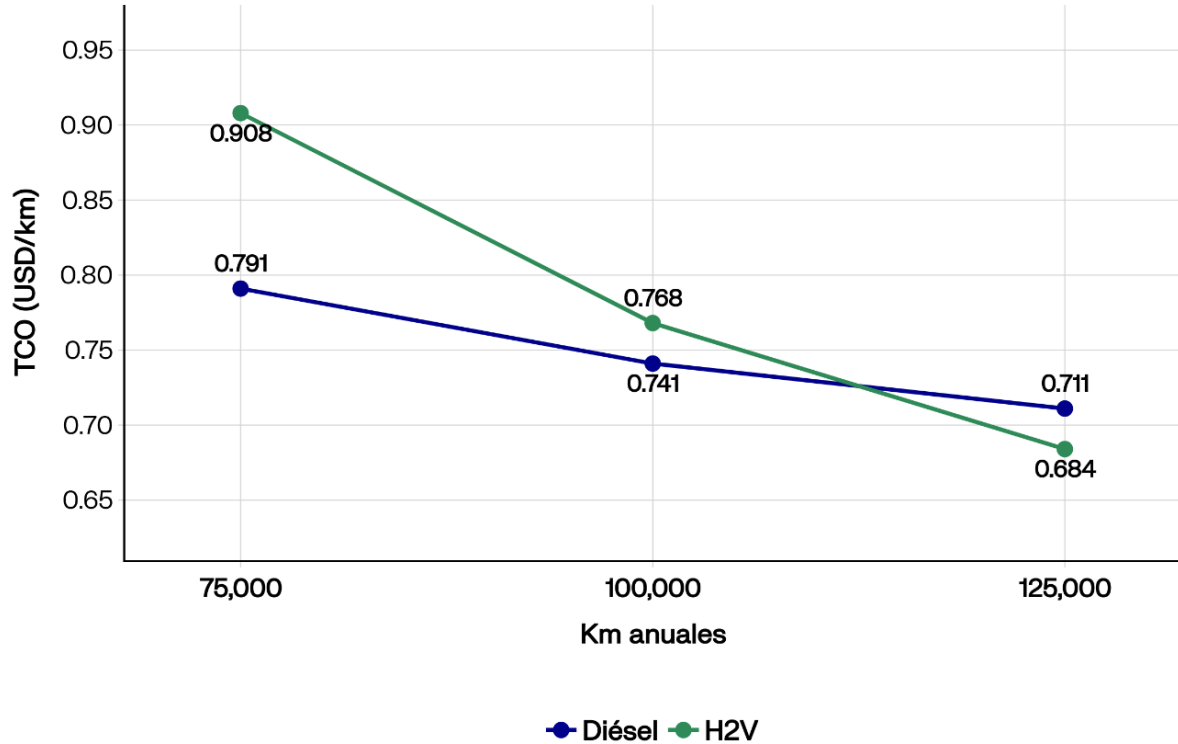
En el escenario Meta 2030, se alcanza paridad de costos por kilómetro con una flota de 35 camiones, donde el TCO de los H2V (0,74 USD/km) prácticamente iguala al TCO del diésel (0,741 USD/km). El punto óptimo se materializa con 65 camiones, donde la economía de escala de la hidrolinera hace que el TCO H2V se mantenga en torno a 0,71 USD/km, por lo que las flotas mayores ya operan con una ligera ventaja de costo frente al diésel bajo los precios de la meta 2030

5.3.2.Efecto de Km/año en TCO

La intensidad de uso anual (km/año) es un factor crítico para la viabilidad económica del hidrógeno verde, ya que operaciones con bajo kilometraje no distribuyen adecuadamente el elevado CAPEX del vehículo a través de más km, penalizando el costo por kilómetro. En la siguiente figura se compara la evolución del TCO según tres escenarios de utilización anual: 75.000 km/año (operación leve), 100.000 km/año (caso base de estudios previos) y 125.000 km/año (operación intensiva),

evaluados bajo un escenario de precios intermedios para el hidrógeno verde (USD 3,0/kg) y diésel (USD 1,2/L), manteniendo los parámetros base de la Tabla 3.

Figura 11. TCO según Km anuales en escenario intermedio.



Fuente: Elaboración Propia.

El gráfico muestra cómo el TCO de ambas tecnologías disminuye a medida que aumentan los km anuales, evidenciando que una mayor utilización del vehículo reduce el costo por kilómetro en diésel y en H2V por igual. De los resultados se infiere que el hidrógeno verde es especialmente viable para operadores con alta intensidad de uso anual, donde el CAPEX del vehículo se distribuye entre más kilómetros y permite alcanzar competitividad de costos; en particular, a los 112.500 km/año aproximadamente el TCO del H2V se iguala con el del diésel, sugiriendo que flotas dedicadas a rutas largas y constantes (minería, transporte interregional, exportación) pueden lograr paridad económica.

5.4. Costo de Abatimiento de Emisiones CO₂

Un indicador clave de viabilidad climática es el costo por tonelada de CO₂ evitada al reemplazar camiones diésel por camiones H2V, ya que esta métrica permite comparar alternativas de descarbonización y evaluar el retorno climático de la inversión. Considerando un consumo anual de 39.000 L/año de diésel y un factor de emisión de 2,71 kg CO₂ e/L para combustión móvil, se obtiene una emisión anual de aproximadamente 105,7 t CO₂/año por camión; por tanto, un camión a hidrógeno verde que sustituya completamente a su equivalente diésel evitaría del orden de 1.056 t CO₂ a lo largo de una vida útil de 10 años.

Escenario	H2 (USD)	Diesel (USD)	Costo extra (USD)	CO ₂ evitado (ton)	Costo abatimiento (USD)
Actual 2025	\$5,00	\$1,03	\$263.300	1045,2	\$252
Intermedio	\$3,00	\$1,20	\$27.000	1045,2	\$26
Meta 2030	\$2,00	\$1,20	-\$58.000	1045,2	-\$55

Tabla 8. Costo de abatimiento de CO₂ según escenario en 10 años.

El análisis del costo de abatimiento por tonelada de CO₂ muestra que la competitividad climática de los camiones H2V en Chile depende fuertemente del escenario de precios de combustible. En el contexto actual 2025, el uso de hidrógeno verde implica un sobre costo de alrededor de USD 249/t CO₂, valor alto que solo se justifica bajo impuestos al carbono muy elevados o mandatos ambientales estrictos, por lo que la adopción queda limitada a empresas con exigencias ESG excepcionales. En el escenario intermedio (H2 a 3,0 USD/kg), el costo de abatimiento cae a aproximadamente USD 26/t CO₂, rango coherente con precios de carbono internacionales de 20–30 USD/t, lo que vuelve la descarbonización económicamente razonable para operadores exportadores con acceso a financiamiento verde. Finalmente, en el escenario Meta 2030, el costo de abatimiento se vuelve negativo (del orden de –140 USD/t CO₂), puesto que el H2V resulta más barato que el diésel y, al mismo tiempo, reduce emisiones, configurando una situación “win-win” donde la descarbonización no requiere subsidios permanentes y el hidrógeno verde pasa a ser la opción económicamente preferida para el transporte de carga pesada.

5.5. Proyección temporal TCO (2025-2035)

Un análisis dinámico de costos muestra cómo el TCO de camiones diésel y de hidrógeno verde evoluciona entre 2025 y 2035 a medida que cambian los precios de la energía y el costo de los vehículos. En este horizonte, se asume que el diésel enfrenta una inflación anual del 3%, lo que encarece tanto el combustible como el CAPEX de los camiones convencionales, mientras que el H2 verde reduce progresivamente su precio gracias a la masificación de proyectos y mejoras tecnológicas. En paralelo, el CAPEX de los camiones H2V disminuye en torno a un 3% anual por economías de manufactura, permitiendo que la tecnología cierre la brecha de inversión inicial frente al diésel.

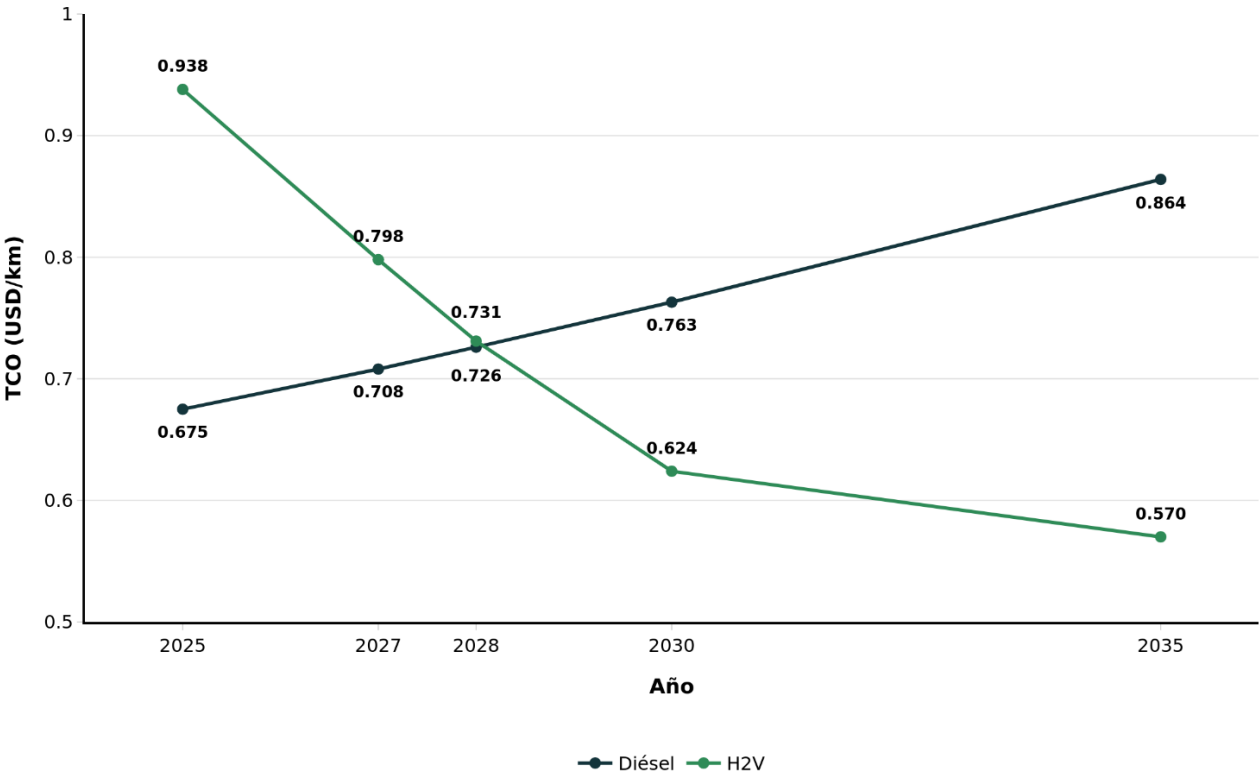
Año	Precio diésel (USD)	Precio H2 (USD)	Capex diésel (USD)	Capex H2V (USD)
2025	\$1,03	\$5,00	\$150.000	\$420.000
2027	\$1,09	\$3,50	\$159.135	\$395.178
2028	\$1,13	\$3,00	\$163.909	\$383.323
2030	\$1,19	\$2,00	\$173.891	\$360.668
2035	\$1,38	\$1,50	\$201.587	\$349.848

Tabla 9. Proyección costos para camiones Diesel e H2V, 2025-2035.

Los supuestos de precios y CAPEX reflejan esta transición: el diésel pasa de 1,03 a 1,38 USD/litro y su CAPEX desde 150.000 a 201.587 USD entre 2025 y 2035, mientras que el H2 cae de 5,0 a 1,5 USD/kg y el CAPEX H2V desde 420.000 a 349.848 USD en el mismo período. Esta combinación de

factores provoca que el TCO H2V disminuya de 0,938 a 0,570 USD/km, al mismo tiempo que el TCO diésel aumenta de 0,675 a 0,864 USD/km, generando un punto de cruce alrededor de 2028 donde ambos costos por kilómetro se igualan. A partir de esa “paridad económica”, la tecnología H2V comienza a capturar una ventaja estructural de costos, lo que habilita el escalamiento de flotas más allá de proyectos piloto.

Figura 12. Proyección TCO diésel vs H2V, 2025-2035



Fuente: Elaboración propia.

Entre 2025 y 2028 se observa una fase de convergencia, en la que el TCO H2V cae cerca de un 13% mientras el diésel solo aumenta levemente, culminando en 2028 con costos prácticamente equivalentes por kilómetro. Desde 2028 hasta 2035 se abre una etapa de divergencia: el TCO H2V se vuelve progresivamente más bajo, alcanzando en 2035 un ahorro cercano al 34% frente al diésel (0,570 vs 0,864 USD/km), lo que refuerza la conveniencia económica de la transición. Esta trayectoria es coherente con metas regulatorias y climáticas, ya que respalda la adopción temprana de flotas H2V después de 2028 y contribuye a los objetivos de la Ley 21.305, las NDC 3.0 y las estrategias nacionales de hidrógeno para descarbonizar el transporte de carga pesada hacia 2050.

5.6. Cálculo de precio de equilibrio del H2V.

El precio de equilibrio del hidrógeno verde es el valor específico (USD/kg) al cual el Costo Total de propiedad de un camión H2V se iguala exactamente al TCO de un camión diésel, bajo un conjunto dado de parámetros operacionales (km anuales, vida útil, CAPEX). En este punto, la diferencia

económica entre ambas tecnologías es cero, y un operador logístico es indiferente económicamente entre seguir operando diésel o migrar a H2V. Este valor es crítico porque permite identificar en qué condiciones operacionales y a qué precio de H2 la tecnología se vuelve competitiva, sin depender de subsidios adicionales. Por ejemplo, si el precio de equilibrio es USD 2,13/kg operando 100.000 km/año, cualquier precio de H2 inferior a USD 2,13 haría que H2V sea más barato que diésel, cualquier precio superior la haría más cara.

Los resultados de aplicar Solver a diferentes combinaciones de parámetros revelan cómo el precio de equilibrio varía significativamente según la operación

Escenarios						
	1	2	3	4	5	6
Km Anual (km)	100000	120000	80000	100000	100000	100000
Vida útil (años)	10	10	10	10	10	10
Precio diésel (USD)	\$1,20	\$1,20	\$1,20	\$1,31	\$1,40	\$1,40
Consumo diésel(l/100km)	39	39	39	39	39	39
Consumo H2V (kg/100)	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	11
Mant. Diésel (USD/KM)	\$0,123	\$0,123	\$0,123	\$0,123	\$0,123	\$0,123
Mant. H2V (USD/KM)	\$0,093	\$0,093	\$0,093	\$0,093	\$0,093	\$0,093
Precio camión diésel promedio (USD)	\$150.000	\$150.000	\$150.000	\$150.000	\$150.000	\$150.000
Precio camión H2V promedio (USD)	\$420.000	\$420.000	\$420.000	\$350.000	\$280.000	\$380.000
Precio H2V (USD)	\$2,68	\$3,21	\$1,89	\$2,92	\$3,95	\$1,91

Tabla 10. Precio de equilibrio H2V según combinación de parámetros operacionales.

Los valores en amarillo (precio H2V equilibrio) son calculados por solver. Los parámetros en verde (km, consumo, CAPEX) son variables independientes que se modifican para explorar sensibilidad. El rango de precio de equilibrio varía entre USD 1,89–3,95/kg según operación. Esta amplia variación demuestra que no existe un único precio de "competitividad universal", sino que depende críticamente de cómo opera cada flota.

- **Escenario 1:** Precio equilibrio USD 2,68/kg. Si la meta 2030 logra H2 a USD 2,00/kg, H2V será 0,68 USD/kg más barato que equilibrio, creando margen de seguridad.
- **Escenario 2 (120k km/año):** Precio equilibrio sube a USD 3,21/kg. Operaciones de alta intensidad permiten mayor tolerancia de precio H2, porque CAPEX se diluye más rápido. Es el escenario ideal (minería, exportación).
- **Escenario 3 (80k km/año):** Precio equilibrio baja a USD 1,89/kg. Operaciones de bajo km requieren H2 muy barato para ser competitivas. Esto explica por qué distribución urbana no es viable para H2V.
- **Escenario 4–5 (CAPEX reducido):** Si fabricación en escala o subsidios logran bajar CAPEX a USD 280–350k, el precio de equilibrio sube (paradójicamente parece contradicción, pero es correcto: menos capital invertido permite mayor tolerancia de precio H2 porque la razón capital/km baja).

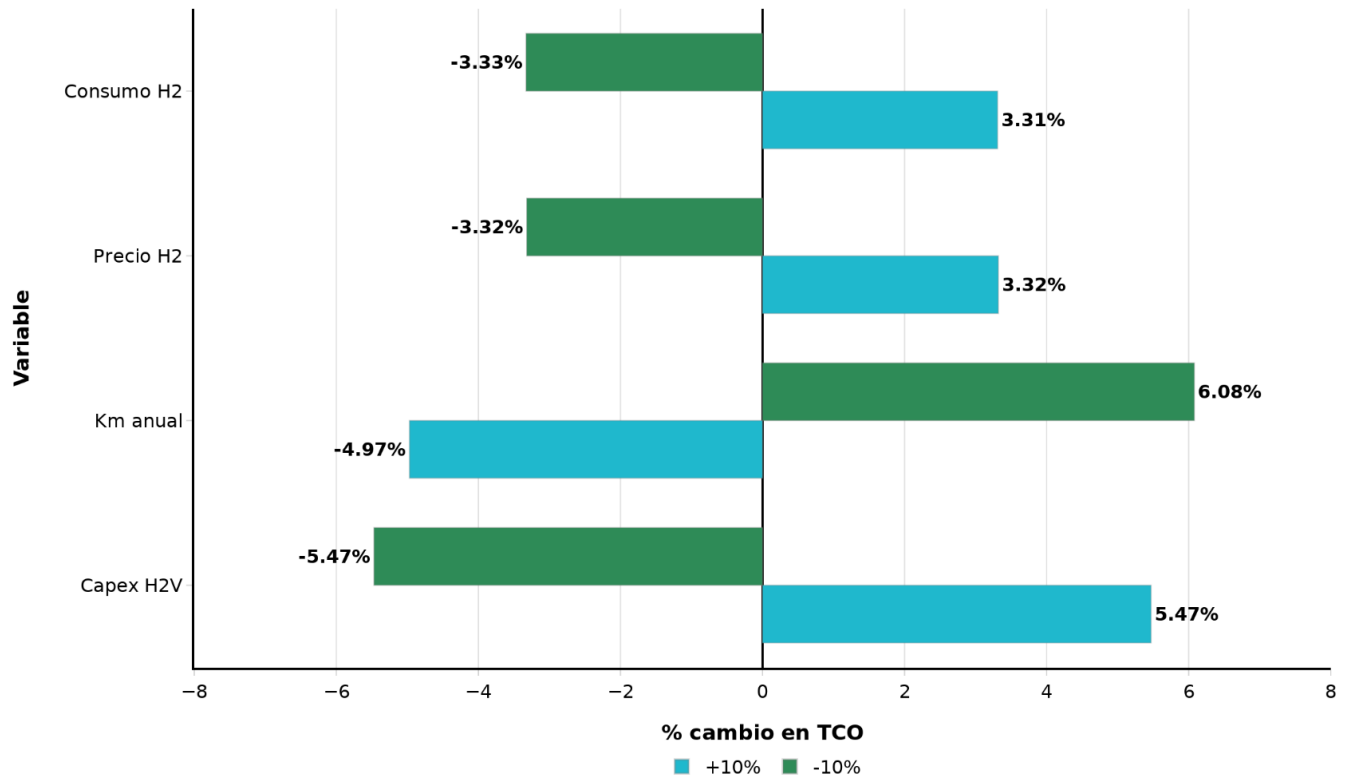
- **Escenario 6 (consumo mayor, 11 kg/100km):** Vehículos menos eficientes requieren H2 más barato (USD 1,91) para lograr equilibrio.

El solver revela que flotas operando mayor a 100k km/año con CAPEX en rango USD 350–400k logran precios de equilibrio USD 2,68–3,21/kg, alineados o superiores a la meta nacional 2030 de USD 1,5–2,0/kg. Esto significa H2V es competitivo incluso con volatilidad de costos.

5.7. Análisis de Sensibilidad.

Para identificar qué variable tiene mayor impacto en viabilidad de H2V, se realizó un análisis de sensibilidad determinista variando cada parámetro clave $\pm 10\%$ respecto a los parámetros base en el escenario intermedio. Los resultados se muestran en un gráfico tipo embudo el cual permite visualizar de forma inmediata cuáles factores tienen mayor impacto relativo en el TCO y, por tanto, orienta las decisiones de política e inversión hacia las palancas que más contribuyen a mejorar la competitividad económica del hidrógeno verde en el transporte de carga pesada.

Figura 13. Análisis de sensibilidad TCO H2V según variables ($\pm 10\%$)



En términos generales, el análisis de sensibilidad muestra que no todas las variables afectan por igual la competitividad económica del camión H2V: cambios de $\pm 10\%$ en el CAPEX y en los km anuales generan las variaciones más fuertes en el TCO, mientras que el precio del H2 y el consumo específico tienen efectos de menor magnitud, aunque siguen siendo relevantes para afinar el modelo. Esto sugiere que las políticas y decisiones de inversión deberían priorizar, primero, la reducción del costo inicial de los vehículos y, segundo, asegurar altos niveles de utilización anual

antes que concentrarse solo en lograr hidrógeno extremadamente barato o mejoras marginales de eficiencia.

El costo de inversión del camión H2V es la variable más influyente: una variación de $\pm 10\%$ en el CAPEX genera cambios de aproximadamente $\pm 5,47\%$ en el TCO, pasando de 0,768 a 0,726 USD/km cuando baja a 378.000 USD y a 0,810 USD/km cuando sube a 462.000 USD. En la práctica, esto implica que instrumentos como subsidios al CAPEX, depreciación acelerada, garantías de crédito o financiamiento verde pueden reducir el TCO de forma mucho más contundente que intervenir directamente en el precio del combustible, por lo que resulta razonable priorizar políticas tipo Ley 21.305.

La intensidad de uso (km/año) aparece como la segunda variable más relevante, con impactos de $-4,97\%$ cuando se incrementa 10% el kilometraje (de 100.000 a 110.000 km/año) y de $+6,08\%$ cuando se reduce a 90.000 km/año. Esto refleja que el H2V es especialmente adecuado para operaciones de alta utilización y larga distancia, donde el CAPEX se diluye en más kilómetros recorridos, por lo que las flotas piloto debieran concentrarse en corredores de exportación y minería con más de 100.000 km/año por vehículo.

El precio del hidrógeno ocupa el tercer lugar, una reducción de 0,30 USD/kg (de 3,00 a 2,70 USD/kg) disminuye el TCO en torno a $3,32\%$, mientras que aumentos similares lo encarecen en la misma proporción. Aunque bajar el costo del combustible es importante, su efecto es menor que el del CAPEX y los km anuales, lo que indica que metas de H2 muy barato (por ejemplo 1,5 USD/kg al 2030) deben verse como un complemento a políticas de inversión inicial, no como condición única para que el modelo sea viable en el corto plazo.

La eficiencia en el uso de hidrógeno, expresada como consumo en kg/100 km, presenta un impacto similar al del precio del H2 (alrededor de $\pm 3,31\%$ en el TCO ante cambios de $\pm 10\%$), por lo que también queda por debajo del CAPEX y los km anuales en términos de sensibilidad. Mejoras tecnológicas que reduzcan el consumo de 8,5 a 7,5 kg/100 km ayudan, pero su efecto económico es relativamente marginal frente a estrategias de reducción del CAPEX o de aumento de la utilización anual, lo que sugiere que los FCEV actuales ya operan en un rango de eficiencia razonablemente cercano al óptimo.

5.8. Necesidades para la implementación de medidas

5.8.1. Recursos técnicos y tecnológicos

La implementación de flotas piloto de camiones H2V en Chile requiere, en primera instancia, acceso a tecnología FCEV madura y comercialmente disponible. Los vehículos deben ser importados de fabricantes internacionales hasta que se establezca manufactura local. Esto implica alianzas estratégicas con distribuidores autorizados y garantías de servicio técnico especializado, dado que en Chile aún no existe capacidad de mantenimiento de FCEV a escala operacional. Se requiere asimismo inversión en infraestructura de recarga (hidrolineras), esta infraestructura debe estar estratégicamente ubicada, con separación máxima de 300 km entre puntos de recarga, garantizando autonomía operacional.

Para la producción de hidrógeno verde, se requiere acceso a capacidad de electrolineras (electrolización de agua con energía renovable) dimensionadas para escala operacional de 50+

camiones simultáneamente. Se necesita por tanto inversión en 10–15 electrolineras descentralizadas vinculadas a plantas solares (norte) o eólicas (sur), con meta de producción de 1+ Mt/año al 2030 según Estrategia Nacional. La integración óptima es electrolizadora on-site (solar + electrolinera + hidrolinera en complejo único), reduciendo costos de distribución y garantizando H2 100% verde.

5.8.2. Recursos económicos y financieros

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde identifica disponibilidad de hasta USD 2.800 millones en subsidios desde 2020 al 2030, provenientes de CORFO, BID, CAF, fondos verdes internacionales y presupuesto fiscal. Instrumentos disponibles incluyen: créditos verdes de BID y CAF con tasas preferenciales, subvenciones CORFO para diferenciales de CAPEX (hasta 50%), garantías de precio de H2 mediante contratos privados de largo plazo. Adicionalmente, se pueden establecer mecanismos que financien transición.

Crítico es asegurar financiamiento de capital inicial para operadores privados. El análisis de resultados demuestra que, en escenario intermedio, H2V es apenas 3,6% más costoso que diésel, diferencial absorbible mediante subsidio CAPEX del 10%, justificando inversión pública en demanda inicial.

5.8.3. Recursos normativos y regulatorios

La implementación requiere marco normativo actualizado que habilite comercialización y operación segura de camiones H2V. Actualmente, Chile carece de regulaciones específicas para transporte de H2, por lo tanto, se necesita:

- **Normativa de seguridad para vehículos H2V:**
 1. **Norma euro VI:** Norma Euro VI (DS 50/2023): Vigente desde enero 2026 para vehículos pesados nuevos; aunque no especifica para H₂, exige estándares de emisión "cero" compatibles con FCEV.
 2. **Pendiente:** Armonizar con UNECE R134 (sistemas de celdas de combustible) y ISO 23251 (tanques H₂ tipo IV, presión 700 bar, detección de fugas H₂)
- **Estándares de recarga**
 1. **Reglamento de Seguridad H₂ (DS 13/2024):** Aprueba NFPA 2/2020 para instalaciones de H₂ (producción, almacenamiento, transferencia), incluyendo control de ignición, ventilación y distancias de seguridad.
 2. **Presión suministro:** 350-700 bar (estándar H70/H35).
 3. **Proyectos piloto SEC:** 11 plantas H₂V registradas, con especificaciones técnicas nacionales en desarrollo.
- **Políticas de incentivos:**
 1. **Trading de emisiones:** El Sistema Nacional de Cambios de Emisiones (SNCE) no incluye transporte pesado aún, pero el **Comité H₂V** (Res. 60/2022) propone extenderlo a flotas H₂V vs diésel.
 2. **Incentivos tributarios:** Proyecto de ley en trámite (2026) para depreciación acelerada de FCEV y exención IVA en hidrolineras.

- **Transporte de H2:**

1. **H₂ comprimido 700 bar:** Regulado como "gas inflamable" por DS 43/2016 (transporte sustancias peligrosas), requiere permisos MTT especiales y señalización.

5.8.4. Recursos institucionales y coordinación

Para viabilizar el despliegue de hidrógeno verde en el transporte de carga pesada se requieren recursos institucionales robustos y una coordinación público-privada estructurada, donde el Ministerio de Energía lidere la Estrategia Nacional de Hidrógeno fijando metas de producción, hojas de ruta sectoriales y marcos de largo plazo, mientras que el Ministerio del Medio Ambiente asegura la coherencia con las NDC 3.0 mediante estándares de emisiones, instrumentos económicos y criterios de elegibilidad para proyectos de descarbonización. En paralelo CORFO debe diseñar y administrar subsidios de inversión, garantías y programas piloto de flotas y estaciones de recarga, coordinando con la Superintendencia de Electricidad y Combustibles para la emisión de normas técnicas, protocolos de seguridad y procedimientos de certificación de infraestructura H2, de forma que existan reglas claras para permisos y fiscalización. Para articular a estos actores se propone un consorcio público-privado formal, con mesas de trabajo trimestrales y grupos técnicos permanentes, responsable de priorizar corredores logísticos, definir criterios de localización de hidrolineras, proponer ajustes normativos y consolidar una base de datos común de desempeño operacional y costos de los proyectos, insumo clave para escalar la adopción de flotas H2V en Chile.

5.8.5. Condiciones ambientales y energéticas.

Chile tiene ventaja comparativa única: potencial renovable de 1.800 GW (solar norte, eólico sur) que permite producir H2 verde a costo marginal de USD 1,5/kg al 2030. Esto es fundamental para viabilidad, sin el acceso a energía renovable barata, H2 no es competitivo globalmente, para esto se necesita:

- **Integración operativa:** Hidrolineras ubicadas adyacentes a parques solares/eólicos, con suministro directo de energía (sin intermediarios), maximizando rentabilidad.
- **Planificación territorial:** Identificar corredores con simultaneidad de potencial renovable alto, demanda de transporte pesado (puertos, minería), infraestructura vial existente.
- **Garantía de suministro energético:** Contratos de largo plazo entre generadoras renovables y operadores de electrolineras, asegurando precio energía predecible.

6. Análisis crítico.

El presente diagnóstico técnico-económico de viabilidad de camiones H2V en Chile es altamente relevante en contexto de múltiples presiones convergentes: compromisos climáticos internacionales (Acuerdo de París, NDC 3.0 chilena que busca carbono neutralidad 2050), regulación ambiental creciente, deseo de diferenciación competitiva en mercados globales. El transporte pesado representa aproximadamente 43% de emisiones de transporte en Chile, siendo un sector de gran impacto y menos explorado para descarbonización.

Aporte de la Propuesta:

1. **Cuantificación de viabilidad económica bajo escenarios locales** → A diferencia de estudios internacionales que concluyen "H2V es caro", este análisis demuestra que en Chile, con escenarios realistas de Estrategia Nacional (H2 USD 2–3/kg, flotas 50+), H2V alcanza igualdad o ventaja económica al 2028–2030. Esto es diferente a narrativa global y justifica inversión pública chilena en H2V.
2. **Identificación de punto de equilibrio mediante Solver** → Metodología de optimización permite responder "¿a qué precio exacto de H2 es competitivo?" para cada condición operacional. Literatura internacional típicamente reporta rangos amplios, este proyecto da valores precisos.
3. **Jerarquización de variables críticas mediante sensibilidad** → Análisis revela que CAPEX es 5,5 veces más influyente que precio H2 en competitividad. Esta conclusión tiene implicación directa en política: sugiere que subsidios al vehículo son más efectivos que subsidios al H2.
4. **Análisis de costo de abatimiento de CO₂** → Demuestra que en Chile el costo de abatimiento es USD 26/t (escenario intermedio), 10–20 veces mejor que promedio global (USD 250–500/t). Posiciona a Chile como oportunidad global en descarbonización costo-efectiva, con ventaja competitiva en H2 verde barato.

Comparación con Propuestas Existentes:

- Nivel internacional

La literatura existente (ICCT 2022, ADB 2024, IEA 2021) típicamente concluye que H2V es viable al 2030+ solo con subsidios persistentes. Este análisis coincide en fecha (viabilidad marginal 2028–2030) pero difiere en origen: Chile logra viabilidad no principalmente por subsidios, sino por potencial renovable único que permite H2 barato (USD 1,5–2,0/kg). Esto es ventaja competitiva sobre China, Europa, USA donde H2 cuesta más.

Frontier Economics (2021) calcula CAC en FCEV de USD 250–500/t en mercados desarrollados. Este análisis reporta CAC de USD 26/t para Chile, demostrando superioridad ambiental-económica local.

- Nivel nacional

Antes de este proyecto, existía documento estratégico (Estrategia Nacional H2V 2020). Este documento establece objetivos y estudios técnicos-económicos

Ventajas de la Propuesta:

1. **Especificidad local:** Usa datos de operaciones Chile (Walmart-Marval), regulación chilena (Ley 21.305), energía renovable chilena (1.800 GW), no extrapolaciones de estudios europeos.
2. **Análisis de sensibilidad robusto:** Identifica variables críticas (CAPEX > km > precio H2), permitiendo diseño de política pública más eficaz.
3. **Horizonte temporal detallado:** Proyecciones 2025–2035 permiten roadmap concreto (flotas piloto 2026–2028, escalamiento 2028–2030, masificación 2030+).
4. **Costo de abatimiento integrado:** Combina economía y clima, demostrando viabilidad ambiental además de económica.

Desventajas y Limitaciones:

1. **Dependencia de supuestos macroeconómicos:** Análisis asume inflación 3% anual, estabilidad política, continuidad de Estrategia Nacional H2V. Cambios en gobierno podrían alterar subsidios.
2. **Volatilidad de precios internacionales:** CAPEX FCEV aún cae por aprendizaje tecnológico global; cambios en precio diésel (petróleo) pueden alterar competitividad. Análisis sensibilidad mitiga, pero no elimina riesgo.
3. **Madurez tecnológica limitada:** Hyundai XCIENT tiene 10M km operacionales; muestras estadísticas aún pequeñas. Fallos inesperados podrían comprometer viabilidad percibida.

Brechas Identificadas

1. **Brecha regulatoria:** Chile carece de norma técnica para seguridad FCEV y transporte H2. Requiere urgentemente armonización UNECE.
2. **Brecha de capacitación:** Deficiencia crítica de técnicos especializados en FCEV. Universidades no ofrecen cursos formales.
3. **Brecha de financiamiento:** Disponibilidad de subsidios CORFO/BID es finita; si demanda excede oferta, operadores no pueden financiar flotas.
4. **Brecha de datos operacionales:** Falta información real de costos operacionales H2V en Chile (solo caso piloto Walmart). Requiere acumular datos de 50+ vehículos en operación.

7. Conclusiones

El estudio permitió evaluar de manera integrada la viabilidad técnica y económica de los camiones a hidrógeno verde en el contexto del transporte de carga pesada en Chile, abordando tanto el desempeño operativo como las condiciones de mercado y el marco normativo vigente. Los resultados muestran que esta tecnología no es una solución teórica a largo plazo, sino una alternativa concreta que puede competir con el diésel bajo ciertos rangos de precio del H2V y niveles de utilización de flota, alineándose con los compromisos de carbono neutralidad al 2050.

En relación con el objetivo general, se verificó que la operación de camiones a hidrógeno verde resulta económicamente competitiva frente a camiones diésel cuando se combinan precios de H2V en el entorno de 2–3 USD/kg, kilometrajes anuales del orden de 100.000 km y tamaños de flota iguales o superiores a 50 unidades. Bajo estas condiciones, el Costo Total de Propiedad se aproxima o incluso se sitúa por debajo del TCO del diésel, especialmente en el escenario meta 2030, donde el análisis muestra costos cercanos a 0,68 USD/km para H2V frente a 0,74 USD/km para diésel. Esto confirma que la competitividad del hidrógeno verde depende menos de una apuesta especulativa a futuro y más de la capacidad de activar, en el corto y mediano plazo, los factores que ya se encuentran identificados en la Estrategia Nacional de H2V.

Respecto del primer objetivo específico, el análisis comparativo de desempeño operativo y económico permitió caracterizar los camiones H2V como una opción particularmente adecuada para operaciones de alta demanda anual de kilómetros y largos recorridos interurbanos. La mayor autonomía, los tiempos de recarga acotados y la eliminación de emisiones locales los posicionan como una alternativa coherente con la realidad logística de corredores asociados a minería, forestal y comercio exterior, donde el transporte pesado concentra una parte importante de las emisiones del sector energía.

En cuanto al segundo objetivo específico, la modelación de escenarios y el análisis de sensibilidad mostraron que no todas las variables afectan de la misma forma la competitividad del H2V. El CAPEX del vehículo y el kilometraje anual resultaron ser los determinantes más influyentes sobre el TCO, superando al propio precio del hidrógeno, lo que indica que las decisiones de inversión, las economías de escala y la intensidad de uso son tan o más relevantes que alcanzar un combustible extremadamente barato. Este resultado matiza la discusión pública, que suele concentrarse casi exclusivamente en el costo del kg de H2, y orienta la atención hacia el diseño de esquemas de financiamiento y modelos de negocio que aprovechen al máximo la vida útil de los camiones.

Desde la perspectiva ambiental, el cálculo del costo de abatimiento de emisiones confirmó que, bajo las condiciones analizadas, el uso de camiones H2V puede lograr reducciones de CO₂ con costos por tonelada evitada significativamente menores a los reportados en mercados desarrollados. Esto refuerza la idea de que Chile no solo cuenta con un potencial renovable excepcional, sino que además dispone de una oportunidad real para descarbonizar el transporte pesado de manera costo-efectiva, contribuyendo de forma directa al cumplimiento de la NDC 3.0 y a las metas de la Estrategia Climática de Largo Plazo.

El diagnóstico también evidenció que la viabilidad de la tecnología no depende únicamente de parámetros técnicos o económicos, sino de la articulación entre políticas públicas, instrumentos de

financiamiento y capacidades institucionales. La existencia de flotas piloto como el caso Walmart–Marval, los compromisos ya asumidos en materia de electromovilidad y los incentivos previstos para el hidrógeno verde muestran que el país ya cuenta con una base sobre la cual avanzar, pero también dejan en evidencia brechas en regulación, formación de capital humano y generación de datos operacionales a escala.

Finalmente, el análisis crítico permitió identificar que las principales debilidades del estudio se relacionan con la dependencia de supuestos macroeconómicos y con la limitada experiencia operativa de camiones H2V en Chile. Aun así, la convergencia entre el potencial renovable, las metas climáticas y los resultados del TCO sugiere que no se trata de una tecnología marginal, sino de una pieza que puede ocupar un lugar central en la descarbonización del transporte de carga pesada si se abordan de manera oportuna las brechas detectadas.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones del estudio apuntan, en primer lugar, a que las políticas públicas se concentren en reducir el costo de inversión inicial de los camiones a hidrógeno verde, mediante subsidios, instrumentos financieros verdes y reglas claras para su operación. Dado que el CAPEX y el kilometraje anual demostraron ser variables decisivas en el TCO, resulta más efectivo apoyar flotas intensivas en uso, ubicadas en corredores logísticos estratégicos como rutas mineras y de exportación, donde se puedan capturar rápidamente las ventajas económicas y ambientales de la tecnología. Para ello también se vuelve clave actualizar y armonizar la normativa de seguridad, homologación de vehículos e infraestructura de abastecimiento, de modo que se reduzca la incertidumbre regulatoria y se facilite la toma de decisiones de inversión.

Desde la perspectiva del sector privado, se recomienda que las primeras implementaciones de camiones H2V se orienten a operaciones con patrones de servicio estables y altos recorridos anuales, ya que son las que mejor aprovechan los ahorros operacionales frente al diésel. En paralelo, se sugiere avanzar en contratos de suministro de hidrógeno verde de largo plazo, asociados a proyectos solares y eólicos, que permitan asegurar precios en torno a 2–3 USD/kg y den señales claras para nuevas inversiones en producción y logística del combustible. Además, es importante que las empresas de transporte participen en pilotos y generen datos operacionales detallados sobre consumo, mantenimiento y desempeño en ruta, porque esa información permitirá afinar los modelos de TCO y reducir las brechas de conocimiento actuales.

Para futuras investigaciones, el trabajo plantea la necesidad de profundizar en escenarios macroeconómicos y de riesgo, incorporando variaciones en precios de combustibles, tasas de interés y esquemas de financiamiento, con el fin de entender cómo estos factores alteran la competitividad del H2V a lo largo del tiempo. También se propone extender el análisis a otros tipos de vehículos pesados y contextos de operación, así como integrar enfoques de ciclo de vida e impactos sociales, de manera que la evaluación de los camiones a hidrógeno verde no se limite solo a los costos directos, sino que considere también efectos en empleo, reconversión laboral y contribución a una transición justa hacia un transporte bajo en emisiones.

Referencias Bibliográficas

Agenda Logística. (2025, 28 de abril). Tráfico terrestre de carga evidenció un alza de 16,8% durante el primer trimestre del 2025. <https://www.agendalogistica.cl/aduanas-camiones-logistica-y-distribucion/trafico-terrestre-de-carga-evidencio-un-alza-de-168-durante-el-primer-trimestre-del-2025/1929058>

ARCLIM. (s.f.). Atlas de riesgos climáticos. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. <https://arclim.mma.gob.cl/>

Autosdeprimera.com. (2025). Hyundai presentó su nuevo XCIENT Fuel Cell-8 a hidrógeno. <https://www.tyt.com.mx/nota/hyundai-motor-presenta-su-renovado-xcient-de-celda-de-combustible-en-act-expo-2025>

CIMA. (s.f.). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y sus anexos A y B. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. <https://cima.mma.gob.cl/acuerdo/protocolo-de-kyoto-de-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-y-sus-anexos-a-y-b/>

CMS Sostenible. (2024, 16 de diciembre). Análisis del mercado de vehículos pesados en Chile: Preparándonos para una regulación de la eficiencia energética del sector. <https://cmsostenible.org/analisis-del-mercado-de-vehiculos-pesados-en-chile-preparandonos-para-para-una-regulacion-de-la-eficiencia-energetica-del-sector/>

Diario Financiero. (2024, 8 de enero). Suplemento: Transformación energética en Chile. https://www.df.cl/noticias/site/docs/20240105/20240105132455/suplemento_20240108.pdf

Energía 2050: Política energética de Chile. (2015). Ministerio de Energía de Chile. https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf

Estrategia Nacional de Electromovilidad. (2021). Ministerio de Energía de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf

Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. (2020). Ministerio de Energía de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

Estrategia Climática de Largo Plazo 2050. (2021). Ministerio del Medio Ambiente de Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/estrategia-climatica-de-largo-plazo-2050/descripcion-del-instrumento/>

Estrategia Climática de Largo Plazo para el Transporte Liviano. (2021). Ministerio del Medio Ambiente de Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>

European Parliament. (2018, 7 de marzo). Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

Gobierno de Chile. (2025, 24 de julio). Ley 18168: Ley General de Telecomunicaciones. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=10212&idVersion=2025-07-24&idParte=>

H2 News. (2024, 4 de septiembre). Walmart Chile junto a Marval Clean Logistics presentan el primer camión propulsado por hidrógeno verde en el país. <https://h2news.cl/2024/09/04/walmart-chile-junto-a-marval-clean-logistics-presentan-el-primer-camion-propulsado-por-hidrogeno-verde-en-el-pais/>

Hyundai Motor Company. (s.f.). Hyundai Motor's XCIENT Fuel Cell trucks achieve record of 10 million km total driving distance in Switzerland. <https://ecv.hyundai.com/global/en/newsroom/press-releases/hyundai-motors-xcient-fuel-cell-trucks-achieve-record-of-10-million-km-total-driving-distance-in-switzerland-BL00200524>

International Energy Agency (IEA). (2025). *Global hydrogen review 2025*. IEA Reports. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>

Klog. (2025, 11 de marzo). Cómo funciona la exportación de frutas chilenas. <https://klog.co/blog/como-funciona-la-exportacion-de-frutas-chilenas>

Koleva, M., & Melaina, M. (2021). Hydrogen fueling stations cost (DOE Hydrogen Program Record No. 21002). U.S. Department of Energy. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf?Status=Master>

Ley y Plan de Eficiencia Energética. (s.f.). Ministerio de Energía de Chile. <https://energia.gob.cl/ley-y-plan-de-eficiencia-energetica>

Meganoticias.cl. (13 de noviembre de 2024). Las marcas de camiones más vendidos en Chile: <https://www.meganoticias.cl/nacional/465685-camiones-mas-vendidos-en-chile-ranking-discover-brk-13-11-2024.html>

Marca Chile. (s. f.). *Hidrógeno verde en Chile*. <https://www.marcachile.cl/green-hydrogen-chile/>

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (2022). Resolución Exenta N° 60, de 2022: Crea Comité de Desarrollo de la Industria del Hidrógeno Verde. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177805>

Ministerio de Energía. (2024). *Decreto Supremo N° 13, de 2024: Reglamento de seguridad de instalaciones de hidrógeno*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1204465>

Ministerio de Energía. (2024). *Plan de trabajo de regulaciones habilitantes para el desarrollo de la industria de hidrógeno en Chile 2024–2030*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documento-pdt_h2.pdf

Ministerio de Energía. (s. f.). *Proposición de estrategia regulatoria del hidrógeno para Chile*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/proposicion_de_estrategia_regulatoria_del_hidrogeno_para_chile.pdf

Ministerio de Hacienda de Chile. (s.f.). *Bonos verdes: ¿Cuáles son las metas comprometidas en las NDC de Chile?* <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/finanzas-internacionales/oficina-de-la-deuda-publica/preguntas-frecuentes/bonos-verdes/-cuales-son-las-metas-comprometidas-en-las-ndc-de-chile-cuando-proyectan-la>

Ministerio de Hacienda. (2025, 19 de agosto). *Gobierno ingresa proyecto que incorpora incentivos tributarios para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde* <https://www.hacienda.cl/noticias-y-eventos/noticias/gobierno-ingresa-proyecto-que-incorpora-incentivos-tributarios-para-impulsar-el>

Ohnsman, A. (2024). *Los camiones eléctricos casi matan a Nikola: ahora los de hidrógeno la están salvando*. Forbes. <https://forbes.co/2024/08/14/editors-picks/los-camiones-electricos-casi-matan-a-nikola-ahora-los-de-hidrogeno-la-estan-salvando>

Our World in Data. (s.f.). *CO2 emissions by region*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions#co2-emissions-by-region>

People in Need. (s.f.). *Climate change: Degrees of global warming*. <https://bit.ly/3JsHslw>

Plan de Acción Nacional de Hidrógeno Verde 2023-2030. (2024). Ministerio de Energía de Chile. <https://www.planhidrogenoverde.cl/wp-content/uploads/2024/01/Plan-H2V-Consulta.pdf>

Programa HuellaChile, División de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente. (2024, 28 de noviembre). *Factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono de organizaciones nivel básico (v3)*. https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/11/HuellaChile-DCC-Factores-de-emision-nivel-basico_v3.pdf

Puerto Valparaíso. (2025, 21 de marzo). *Temporada de fruta: 50% de los envíos se han realizado desde Puerto Valparaíso*. <https://www.puertovalparaiso.cl/temporada-de-fruta-50-de-los-envios-se-han-realizado-desde-puerto>

Sector Público: Gestión de Energía. (s.f.). *Guía de eficiencia energética en el sector público*. https://sectorpublico.gestionaenergia.cl/?page_id=6818

Statista. (s.f.). Emisiones mundiales de dióxido de carbono. <https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/>

Torres Vázquez, J. D., Garrido Guerra, L. M., & Garrido Guerra, E. (2023). Calidad del aire. Principales riesgos de contaminación para la salud. *Opuntia Brava*, 15(Especial), 17–32. <https://opuntiabrava.ult.edu.cu/index.php/opuntiabrava/article/view/1914>

UNFCCC. (s.f.). Chile's NDC 3.0: Pathways toward a carbon-neutral and resilient future. <https://unfccc.int/event/chile-s-ndc-30-pathways-toward-a-carbon-neutral-and-resilient-future>

Vargas González, A. M. (2024). *Plan de negocios para una empresa de representación y asesoría técnica en electromovilidad de camiones de carga de mineral para la industria minera en Chile* [Tesis doctoral, Universidad Finis Terrae]. Facultad de Economía y Negocios.

Villanueva, B. R., Salvador, M. B., & Huelgas, R. G. (2019). Cambio climático y salud. *Revista Clínica Española*, 219(5), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2019.01.005>

Anexos

1. Potencial de energías renovables en Chile.

