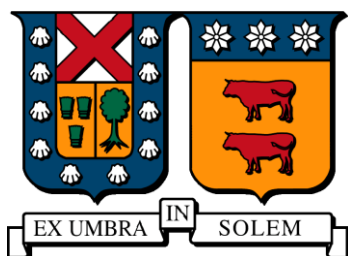


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**“Modelación y proyección de las emisiones generadas
por vehículos terrestres en el periodo 2020-2050 en
Chile.”**

BENJAMÍN IGNACIO GÓMEZ OSORIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESOR CORREFERENTE: MSC. SEBASTIÁN TOLVETT CARO

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que hicieron posible llegar a este momento.

Primero mi familia, mi madre y mi padre, Paulina O. y Andrés G. que sin su esfuerzo y dedicación me habría sido imposible estar aquí y alcanzar las metas que me propuse. Junto a ellos agradecer al resto de mi familia que siempre estuvo pendiente de mi apoyándome en todo lo que podían.

Segundo a los amigos que he ido encontrando en el camino: Aldo, Martín y María Ignacia por ser grandes amigos/a y confidentes apoyándome incluso cuando la vida nos separó; Diego y Alen por seguir en contacto aún separados por el océano, ayudarme a corregir este texto y acompañarme en esas tardes de Commander en mi casa; Nicolás B., Nicolás P. y Guillermo por estar ahí para mí cuando más lo necesitaba y por esos almuerzos inolvidables; A los amigos de la vida que luego fueron amigos de mecánica: Juanfran, Nicolás O. que junto a Caichac pasamos tardes completas jugando juegos de mesa y LoL. A mis amigos del colegio y de la universidad: Rodrigo M., Nicolás D., Natalia, Javier, Juan R., Martín M., Juan B., Cristóbal L. entre otros.

Tercero a mis amigos que he conocido jugando: Clein, Anasu, Grillo, Letsis, Ginits, Galfox, DarkMatrix y todos los que formaron y formarán el Team Eclipse a lo largo del tiempo; A Aronir, Midnite, Thorido, Mattsx, Shico, Arteus, Icywind, Khamet, y todos los que participaron de AoW; También a los demás con los sigo en contacto: Pandý, Gort, Yuno, Gaby, Neoz entre otros.

Cuarto a mis profesores, en el colegio en especial a: Luis Vidal profesor de Matemáticas y profesor jefe de 4to medio, a Alejandra Aguirre profesora de Biología y en la universidad a todos los profesores de Mecánica los cuales han sido justos y comprensivos a lo largo de la carrera, en especial a Mauricio Osses y Eugenia Torres.

Quinto, agradecer a los que hicieron posible la realización de este trabajo: el equipo de trabajo de la UTFSM, el Profesor Mauricio Osses, Adolfo Gaete y Matías Concha; al Banco Interamericano de Desarrollo y al Ministerio de Obras Públicas los cuales financiaron y participaron en el Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 en Chile en el cual se enmarca este trabajo.

Y finalmente, agradecer al Hospital del Salvador, en particular la Unidad de Hematología Intensiva y el banco de sangre, y a la Clínica Santa María en particular a Oncología. Instituciones con las que sin su expertise y amplio conocimiento de hematología no habría sido posible para mí terminar mi carrera universitaria.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de título a todos los que se salieron de su camino para lograr que el mío pudiese realizarse, en particular a mi mamá Paulina que hizo todo lo posible para que pudiese disfrutar dentro de lo posible estos años de universidad.

Resumen

Dentro de las fuentes emisoras de contaminantes que perjudican la calidad del aire en el país se encuentran las fuentes móviles. Estas se dividen en terrestres, marítimas y aéreas. En el caso de las terrestres sus emisiones dependen principalmente de las características del vehículo, el combustible utilizado y el modo de conducción. Este trabajo busca aplicar una metodología para la cuantificación de las emisiones a partir de datos estadísticos del país.

La metodología se confecciona a partir de lo utilizado a nivel internacional, IPPC (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006) y EMEP/EEA (European Environment Agency, 2019), donde se indican los pasos para la confección de inventarios de emisiones. Utilizando en este caso factores Tier 3 de COPERT 5 ya que se tiene información estadística detallada del parque vehicular y las velocidades medias a lo largo del país.

Como resultados de este trabajo primero se obtiene una proyección del comportamiento de las normativas y tecnologías en el periodo 2020-2050, esto considera diferentes entradas de la normativa E6/VI y niveles de penetración de electromovilidad. Luego en paralelo para cada categoría y normativa/tecnología se obtiene un factor de emisión el cual se pondera a nivel nacional, lo que permite obtener un set de factores de emisión por categoría para cada sección del periodo 2020-2050. Finalmente, se utiliza la actividad entregada en conjunto con los factores nacionales ponderados para obtener las emisiones proyectadas en el periodo 2020-2050.

Luego de estimar y comparar las emisiones con otros inventarios realizados en el país se realiza una regresión de la actividad entregada para obtener puntos intermedios en el periodo 2020-2050. De esta manera se obtiene una estimación de emisiones de 42.500 [kTon/año] y 29.800[kTon/año] de CO₂eq, y 0,12 [kTon/año] y 0,09 [kTon/año] de BC al año 2050 para el escenario pesimista y optimista respectivamente. También se estima un aumento entre 17-27% de emisiones de CO₂eq y una disminución entre 46-55% de BC.

En conclusión, se valida la metodología utilizada al compararse con otros inventarios realizados a nivel nacional. No obstante, se podría mejorar extensivamente el modelo utilizado ya que no considera factores de deterioro en el caso de los factores de emisión y no considera ningún tipo de interrupción fuera de la electromovilidad. Esto último implica que la disminución de emisiones, por las medidas de mitigación seleccionadas, no es suficiente para sopesar el aumento de actividad vehicular proyectado y no alcanza las metas establecidas en la NDC en el caso de los GEI.

Abstract

Mobile sources are among the sources of pollutants that affect air quality in the country. This divide into terrestrial, maritime, aerial. In the case of terrestrial ones, their emissions depend mainly on the characteristics of the vehicle, the fuel used and the driving mode. This work seeks to form a methodology for the quantification of emissions from statistical data of the country.

The methodology is made from what is used at an international level, IPPC (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006) and EMEP/EEA (European Environment Agency, 2019), where the steps for the inventory formation. Using Tier 3 factors from COPERT 5 in this case, since detailed statistical information is available on the vehicle fleet and the average speeds throughout the country.

As a result of this work, a projection of the behavior of regulations and technologies is first obtained in the 2020-2050 period, this considers different entries of the E6/VI regulation and levels of electromobility penetration. Then in parallel for each category and regulation/technology an emission factor is obtained which is weighted at the national level which allows to obtain a set of emission factor per category for every section of the 2020-2050 period. Finally, the activity delivered is used together with the national weighted factors to obtain the projected emissions in the 2020-2050 period.

After estimating and comparing the emissions with other inventories carried out in the country, a regression of the activity delivered is carried out to obtain intermediate points the period 2020-2050. In this way, an estimate of emissions of 42,500 [kTon/year] and 29,800 [kTon/year] of CO₂eq, and 0.12 [kTon/year] and 0.09 [kTon/year] of BC by year 2050 is obtained for the pessimistic and optimistic scenario respectively. Also is estimated an increase between 17-27% of CO₂eq emissions and a decrease between 46-55% of BC emissions.

In conclusion, the methodology used is validated when compared with other inventories carried out at the national level. However, the model used could be extensively improved since it does not consider deterioration factors in the case of emission factors and does not consider any type of disruption outside electromobility. The latter implies that the reduction in emissions, due to the selected mitigation measures, is not enough to balance the projected increase in vehicle activity and does not meet the goals set in the NDC in the case of GHG.

Glosario

BC	:	Black Carbon (Carbono Negro)
CH ₄	:	Metano
CO	:	Monóxido de Carbono
CO ₂	:	Dióxido de Carbono
CR2	:	Center for Climate and Resilience Research (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia)
EEA	:	European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente)
EMEP	:	European Monitoring and Evaluation Programme
FE	:	Factor de Emisión
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	:	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
MP2.5	:	Material Particulado 2.5mm
NO _x	:	Óxidos de Nitrógeno

Tabla contenido

Agradecimientos	III
Dedicatoria.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Glosario.....	VII
Tabla contenido.....	VIII
Listado de figuras.....	X
Listado de ilustraciones.....	XIV
Listado de tablas.....	XIV
Introducción.	- 1 -
Objetivos.....	- 2 -
Objetivo general.....	- 2 -
Objetivos específicos	- 2 -
1. Capítulo 1, Estado del arte.	- 3 -
1.1 Emisiones de contaminantes y metodología de estimación	- 3 -
1.2 Inventario de emisión en Chile	- 8 -
1.3 Tecnologías disruptivas.....	- 16 -
1.4 Conclusiones Capítulo 1	- 21 -
2. Capítulo 2, Proyección de tecnologías vehiculares.....	- 22 -
2.1 Metodología.....	- 22 -
2.2 Escenarios tecnológicos y normativos 2020-2050.....	- 28 -
2.3 Distribución tecnológica según escenarios.....	- 29 -
2.4 Conclusiones Capítulo 2	- 31 -
3. Capítulo 3, Factores de emisión y emisiones.....	- 33 -
3.1 Metodología.....	- 33 -
3.2 Factores de emisión 2020-2050 en Chile.	- 43 -

3.3 Emisiones de contaminantes 2020-2050 en Chile	- 48 -
3.4 Conclusiones Capítulo 3	- 71 -
4. Conclusiones	- 73 -
4.1 Conclusiones del trabajo	- 73 -
4.2 Recomendaciones	- 75 -
5. Bibliografía	- 76 -
6. Anexo.....	- 78 -
6.1 Datos históricos distribución tecnológica.....	- 78 -
6.2 Proyección distribución tecnológica	- 87 -

Listado de figuras

Gráfico 1: INGEI de Chile, emisiones y absorciones de GEI (Gg CO ₂ eq) por sector, serie 1990-2013.	- 10 -
Gráfico 2: Sector Energía, emisiones de GEI (Gg CO ₂ eq) por subcategoría, serie 1990-2013	- 11 -
Gráfico 3: EV share of sales proyectado al 2040, Electric Vehicle Outlook 2019.....	- 19 -
Gráfico 4 Difusión acumulada de la televisión a color en Japón.	- 20 -
Gráfico 5: EV share of sales proyectado al 2040, Electric Vehicle Outlook 2019.....	- 24 -
Gráfico 6: Costo de abatimiento USD/tCO ₂ e por tipo de combustible y emisión	- 25 -
Gráfico 7: R13 VLP Urbano Gasolina.....	- 27 -
Gráfico 8: Optimista R13 VLP Urbano Gasolina	- 30 -
Gráfico 9 Pesimista R13 VLP Urbano Gasolina.....	- 31 -
Gráfico 10: Velocidades promedio por ciudad SECTRA	- 33 -
Gráfico 11: Comparativa de emisiones CO ₂ [GTon/año] 2017-2050.....	- 51 -
Gráfico 12: Comparativa de emisiones CO [kTon/año] 2017-2050	- 51 -
Gráfico 13: Comparativa de emisiones MP2.5 [kTon/año] 2017-2050	- 51 -
Gráfico 14: Comparativa de emisiones BC [kTon/año] 2017-2050.....	- 51 -
Gráfico 15: Comparativa de emisiones NO _x [kTon/año] 2017-2050	- 51 -
Gráfico 16: Comparativa de emisiones CH ₄ [kTon/año] 2017-2050.....	- 51 -
Gráfico 17: Regresión lineal de actividad 2017-2050.....	- 52 -
Gráfico 18: Emisiones de CO ₂ según escenario	- 58 -
Gráfico 19: Emisiones de CO según escenario	- 59 -
Gráfico 20: Emisiones de CH ₄ según escenario	- 59 -
Gráfico 21: Emisiones de VOC según escenario	- 60 -
Gráfico 22: Emisiones de BC según escenario	- 60 -
Gráfico 23: Emisiones de PM _{2.5} según escenario.....	- 61 -
Gráfico 24: Emisiones de NO _x según escenario.....	- 61 -
Gráfico 25 Reducción de emisiones de CO ₂ [kTon/año]	- 62 -
Gráfico 26 Reducción de emisiones de CO [kTon/año]	- 63 -
Gráfico 27 Reducción de emisiones de CH ₄ [kTon/año]	- 63 -

Gráfico 28 Reducción de emisión de VOC [kTon/año]	- 64 -
Gráfico 29 Reducción de emisión de BC [kTon/año]	- 64 -
Gráfico 30 Reducción de emisiones de MP2.5 [kTon/año]	- 65 -
Gráfico 31 Reducción de emisiones de NOx [kTon/año]	- 65 -
Gráfico 32: Emisiones de CO2 por categoría Urbano	- 68 -
Gráfico 33: Emisiones de CO2 por categoría Interurbano	- 68 -
Gráfico 34: Emisiones de CO por categoría Urbano	- 68 -
Gráfico 35: Emisiones de CO por categoría Interurbano	- 68 -
Gráfico 36: Emisiones de CH4 por categoría Urbano	- 69 -
Gráfico 37: Emisiones de CH4 por categoría Interurbano	- 69 -
Gráfico 38: Emisiones de VOC por categoría Urbano.....	- 69 -
Gráfico 39: Emisiones de VOC por categoría Interurbano	- 69 -
Gráfico 40: Emisiones de BC por categoría Urbano.....	- 70 -
Gráfico 41: Emisiones de BC por categoría Interurbano	- 70 -
Gráfico 42: Emisiones de MP2.5 por categoría Urbano	- 70 -
Gráfico 43: Emisiones de MP2.5 por categoría Interurbano.....	- 70 -
Gráfico 44: Emisiones de NOx por categoría Urbano	- 71 -
Gráfico 45: Emisiones de NOx por categoría Interurbano.....	- 71 -
Gráfico 46: R13 BUS ART URBANO DIESEL	- 78 -
Gráfico 47: R13 BUS RIG URBANO DIESEL	- 78 -
Gráfico 48: R13 CAM LIV URBANO DIESEL	- 79 -
Gráfico 49: R13 CAM MED URBANO DIESEL	- 79 -
Gráfico 50: R13 CAM PES URBANO DIESEL	- 80 -
Gráfico 51: R13 TAX URBANO GASOLINA	- 80 -
Gráfico 52: R13 VLC URBANO DIESEL.....	- 81 -
Gráfico 53: R13 VLC URBANO GASOLINA	- 81 -
Gráfico 54: R13 VLP URBANO DIESEL	- 82 -
Gráfico 55: R13 VLP URBANO GASOLINA.....	- 82 -

Gráfico 56: R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL	- 83 -
Gráfico 57: R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL.....	- 83 -
Gráfico 58: R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL	- 84 -
Gráfico 59: R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL	- 84 -
Gráfico 60: R13 VLC INTERURBANO DIESEL	- 85 -
Gráfico 61: R13 VLC INTERURBANO GASOLINA.....	- 85 -
Gráfico 62: R13 VLP INTERURBANO DIESEL.....	- 86 -
Gráfico 63: R13 VLP INTERURBANO GASOLINA	- 86 -
Gráfico 64: OPTIMISTA R13 BUS ART URBANO DIESEL	- 87 -
Gráfico 65: OPTIMISTA R13 BUS RIG URBANO DIESEL	- 87 -
Gráfico 66: OPTIMISTA R13 CAM LIV URBANO DIESEL	- 88 -
Gráfico 67: OPTIMISTA R13 CAM MED URBANO DIESEL	- 88 -
Gráfico 68: OPTIMISTA R13 CAM PES URBANO DIESEL	- 89 -
Gráfico 69: OPTIMISTA R13 TAX URBANO GASOLINA	- 89 -
Gráfico 70: OPTIMISTA R13 VLC URBANO DIESEL.....	- 90 -
Gráfico 71: OPTIMISTA R13 VLC URBANO GASOLINA	- 90 -
Gráfico 72: OPTIMISTA R13 VLP URBANO DIESEL	- 91 -
Gráfico 73: OPTIMISTA R13 VLP URBANO GASOLINA.....	- 91 -
Gráfico 74: OPTIMISTA R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL.....	- 92 -
Gráfico 75: OPTIMISTA R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL.....	- 92 -
Gráfico 76: OPTIMISTA R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL.....	- 93 -
Gráfico 77: OPTIMISTA R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL	- 93 -
Gráfico 78: OPTIMISTA R13 VLC INTERURBANO DIESEL	- 94 -
Gráfico 79: OPTIMISTA R13 VLC INTERURBANO GASOLINA.....	- 94 -
Gráfico 80: OPTIMISTA R13 VLP INTERURBANO DIESEL.....	- 95 -
Gráfico 81: OPTIMISTA R13 VLP INTERURBANO GASOLINA	- 95 -
Gráfico 82: PESIMISTA R13 BUS ART URBANO DIESEL	- 96 -
Gráfico 83: PESIMISTA R13 BUS RIG URBANO DIESEL	- 96 -

Gráfico 84: PESIMISTA R13 CAM LIV URBANO DIESEL	- 97 -
Gráfico 85: PESIMISTA R13 CAM MED URBANO DIESEL	- 97 -
Gráfico 86: PESIMISTA R13 CAM PES URBANO DIESEL	- 98 -
Gráfico 87: PESIMISTA R13 TAX URBANO GASOLINA	- 98 -
Gráfico 88: PESIMISTA R13 VLC URBANO DIESEL	- 99 -
Gráfico 89: PESIMISTA R13 VLC URBANO GASOLINA	- 99 -
Gráfico 90: PESIMISTA R13 VLP URBANO DIESEL	- 100 -
Gráfico 91: PESIMISTA R13 VLP URBANO GASOLINA	- 100 -
Gráfico 92: PESIMISTA R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL	- 101 -
Gráfico 93: PESIMISTA R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL	- 101 -
Gráfico 94: PESIMISTA R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL	- 102 -
Gráfico 95: PESIMISTA R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL	- 102 -
Gráfico 96: PESIMISTA R13 VLC INTERURBANO DIESEL	- 103 -
Gráfico 97: PESIMISTA R13 VLC INTERURBANO GASOLINA	- 103 -
Gráfico 98: PESIMISTA R13 VLP INTERURBANO DIESEL	- 104 -
Gráfico 99: PESIMISTA R13 VLP INTERURBANO GASOLINA	- 104 -

Listado de ilustraciones

Ilustración 1 Árbol de decisiones IPCC 2006 para transporte en ruta.....	- 6 -
Ilustración 2: NDC Chile actualización 2020	- 14 -
Ilustración 3: Planes del gobierno para avances de electromovilidad en Chile	- 23 -
Ilustración 4: Reclasificación de categorías vehiculares.....	- 36 -
Ilustración 5: Imagen satelital representativa de arcos y nodos de la actividad entregada	- 41 -

Listado de tablas

Tabla 1 Sumario de clases de vehículos utilizados en Tier 2	- 7 -
Tabla 2: Métodos aplicados en el INGEI de Chile, serie 1990-2013.....	- 9 -
Tabla 3: Sector Energía, emisiones de GEI (Gg CO ₂ eq) por subcategoría, serie 1990-2013	- 10 -
Tabla 4 Planes de mitigación posible para el sector transporte (Iniciativa plan de mitigación CCVC) ...	- 12 -
Tabla 5: Medidas de mitigación escenarios NDC Chile actualización 2020.....	- 15 -
Tabla 6: Mitigación carbono negro NDC Chile 2020.....	- 16 -
Tabla 7: Aumento y disminución tecnológica por norma y tipo de vehículo eléctrico	- 28 -
Tabla 8: Velocidades promedio para zonas urbanas por región.....	- 34 -
Tabla 9: Velocidades promedio para autopistas a nivel nacional.....	- 34 -
Tabla 10: Tabla de equivalencia de categorías vehiculares	- 35 -
Tabla 11: Porcentaje de categorías a través de cuatro años por regiones en Chile	- 36 -
Tabla 12: Rendimiento energético de las categorías por año	- 39 -
Tabla 13: Factores de emisión CO ₂ eq/kWh red eléctrica Optimista	- 40 -
Tabla 14: Factores de emisión eléctrico por categoría Optimista	- 40 -
Tabla 15: Factores de emisión CO ₂ eq/kWh red eléctrica Pesimista.....	- 40 -
Tabla 16: Factores de emisión eléctrico por categoría Pesimista.....	- 40 -
Tabla 17: Proyección pasajeros-km y toneladas-km al 2050	- 42 -
Tabla 18: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO ₂ Optimista.....	- 43 -
Tabla 19: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Optimista.....	- 43 -
Tabla 20: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH ₄ Optimista.....	- 44 -

Tabla 21: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Optimista	- 44 -
Tabla 22: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Optimista	- 44 -
Tabla 23: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Optimista	- 45 -
Tabla 24: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Optimista	- 45 -
Tabla 25: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO2 Pesimista	- 45 -
Tabla 26: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Pesimista	- 46 -
Tabla 27: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH4 Pesimista	- 46 -
Tabla 28: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Pesimista	- 46 -
Tabla 29: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Pesimista	- 47 -
Tabla 30: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Pesimista	- 47 -
Tabla 31: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Pesimista	- 47 -
Tabla 32: Emisiones CO2 [kTon/año] 2017-2050.....	- 48 -
Tabla 33: Emisiones CO [kTon/año] 2017-2050.....	- 48 -
Tabla 34: Emisiones MP2.5 [kTon/año] 2017-2050.....	- 49 -
Tabla 35: Emisiones BC [kTon/año] 2017-2050	- 49 -
Tabla 36: Emisiones NOx [kTon/año] 2017-2050.....	- 50 -
Tabla 37: Emisiones CH4 [kTon/año] 2017-2050.....	- 50 -
Tabla 38: Regresión de actividad 2017-2050	- 53 -
Tabla 39: Emisiones de CO2 escenario optimista	- 53 -
Tabla 40: Emisiones de CO escenario optimista	- 54 -
Tabla 41: Emisiones de CH4 escenario optimista	- 54 -
Tabla 42: Emisiones de VOC escenario optimista.....	- 54 -
Tabla 43: Emisiones de BC escenario optimista.....	- 55 -
Tabla 44: Emisiones de MP2.5 escenario optimista	- 55 -
Tabla 45: Emisiones de NOX escenario optimista	- 55 -
Tabla 46: Emisiones de CO2 escenario pesimista	- 56 -
Tabla 47: Emisiones de CO escenario pesimista	- 56 -
Tabla 48: Emisiones de CH4 escenario pesimista	- 56 -

Tabla 49: Emisiones de VOC escenario pesimista	- 57 -
Tabla 50: Emisiones de BC escenario pesimista	- 57 -
Tabla 51: Emisiones de MP2.5 escenario pesimista	- 57 -
Tabla 52: Emisiones de NOX escenario pesimista	- 58 -
Tabla 53 Variación de emisiones por escenario	- 66 -
Tabla 54 Variación de emisiones por escenario	- 66 -
Tabla 55 CO2eq emitido por año y por escenario [kTon/año].....	- 66 -
Tabla 56 Variación de emisiones de CO2eq respecto al año 2017	- 67 -
Tabla 57 BC emitido por año y por escenario [kTon/año].....	- 67 -
Tabla 58 Variación de emisiones de BC respecto al año 2017	- 67 -
Tabla 1 Sumario de clases de vehículos utilizados en Tier 2.....	- 7 -
Tabla 2: Métodos aplicados en el INGEI de Chile, serie 1990-2013.....	- 9 -
Tabla 3: Sector Energía, emisiones de GEI (Gg CO2 eq) por subcategoría, serie 1990-2013	- 10 -
Tabla 4 Planes de mitigación posible para el sector transporte (Iniciativa plan de mitigación CCVC) ...	- 12 -
Tabla 5: Medidas de mitigación escenarios NDC Chile actualización 2020.....	- 15 -
Tabla 6: Mitigación carbono negro NDC Chile 2020.....	- 16 -
Tabla 7: Aumento y disminución tecnológica por norma y tipo de vehículo eléctrico	- 28 -
Tabla 8: Velocidades promedio para zonas urbanas por región.....	- 34 -
Tabla 9: Velocidades promedio para autopistas a nivel nacional.....	- 34 -
Tabla 10: Tabla de equivalencia de categorías vehiculares	- 35 -
Tabla 11: Porcentaje de categorías a través de cuatro años por regiones en Chile.....	- 36 -
Tabla 12: Rendimiento energético de las categorías por año	- 39 -
Tabla 13: Factores de emisión CO2eq/kWh red eléctrica Optimista	- 40 -
Tabla 14: Factores de emisión eléctrico por categoría Optimista	- 40 -
Tabla 15: Factores de emisión CO2eq/kWh red eléctrica Pesimista.....	- 40 -
Tabla 16: Factores de emisión eléctrico por categoría Pesimista.....	- 40 -
Tabla 17: Proyección pasajeros-km y toneladas-km al 2050	- 42 -

Tabla 18: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO2 Optimista.....	- 43 -
Tabla 19: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Optimista.....	- 43 -
Tabla 20: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH4 Optimista.....	- 44 -
Tabla 21: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Optimista.....	- 44 -
Tabla 22: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Optimista.....	- 44 -
Tabla 23: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Optimista	- 45 -
Tabla 24: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Optimista.....	- 45 -
Tabla 25: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO2 Pesimista	- 45 -
Tabla 26: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Pesimista	- 46 -
Tabla 27: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH4 Pesimista	- 46 -
Tabla 28: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Pesimista	- 46 -
Tabla 29: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Pesimista	- 47 -
Tabla 30: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Pesimista	- 47 -
Tabla 31: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Pesimista	- 47 -
Tabla 32: Emisiones CO2 [kTon/año] 2017-2050.....	- 48 -
Tabla 33: Emisiones CO [kTon/año] 2017-2050.....	- 48 -
Tabla 34: Emisiones MP2.5 [kTon/año] 2017-2050.....	- 49 -
Tabla 35: Emisiones BC [kTon/año] 2017-2050	- 49 -
Tabla 36: Emisiones NOx [kTon/año] 2017-2050.....	- 50 -
Tabla 37: Emisiones CH4 [kTon/año] 2017-2050.....	- 50 -
Tabla 38: Regresión de actividad 2017-2050	- 53 -
Tabla 39: Emisiones de CO2 escenario optimista	- 53 -
Tabla 40: Emisiones de CO escenario optimista	- 54 -
Tabla 41: Emisiones de CH4 escenario optimista	- 54 -
Tabla 42: Emisiones de VOC escenario optimista.....	- 54 -
Tabla 43: Emisiones de BC escenario optimista.....	- 55 -
Tabla 44: Emisiones de MP2.5 escenario optimista	- 55 -
Tabla 45: Emisiones de NOX escenario optimista	- 55 -

Tabla 46: Emisiones de CO2 escenario pesimista	- 56 -
Tabla 47: Emisiones de CO escenario pesimista	- 56 -
Tabla 48: Emisiones de CH4 escenario pesimista	- 56 -
Tabla 49: Emisiones de VOC escenario pesimista	- 57 -
Tabla 50: Emisiones de BC escenario pesimista	- 57 -
Tabla 51: Emisiones de MP2.5 escenario pesimista	- 57 -
Tabla 52: Emisiones de NOX escenario pesimista	- 58 -
Tabla 53 Variación de emisiones por escenario	- 66 -
Tabla 54 Variación de emisiones por escenario	- 66 -
Tabla 55 CO2eq emitido por año y por escenario [kTon/año].....	- 66 -
Tabla 56 Variación de emisiones de CO2eq respecto al año 2017	- 67 -
Tabla 57 BC emitido por año y por escenario [kTon/año].....	- 67 -
Tabla 58 Variación de emisiones de BC respecto al año 2017	- 67 -

Introducción.

Contexto y motivación

Dentro del paradigma actual de movilidad predomina la combustión interna en los vehículos de transporte de carga y personas, sin embargo, debido al fuerte impacto negativo generado en el medio ambiente y la salud esto debe cambiar rápidamente. Para que esto sea factible es necesario que tanto las empresas manufactureras de vehículos como otros actores lleguen a un acuerdo respecto a las tecnologías a adoptar para amortiguar el daño antropogénico generado por las emisiones de contaminantes. Dentro de los actores participantes están presente los encargados de obras públicas de cada país, en el caso de Chile el MOP (Ministerio de obras públicas), agente encargado de proyectar la demanda de transporte y modos de transporte para que la infraestructura crezca en proporción a ésta.

Este trabajo se enmarca en un proyecto solicitado por el MOP en conjunto con el BID (Banco Interamericano de Desarrollo) donde se busca presentar un plan de infraestructura vial/aérea/marítima. Dentro de la presentación del plan se requiere demostrar la disminución de emisiones que conllevaría la implementación. En conjunto con un grupo de trabajo compuesto por: Mauricio Osses, Adolfo Gaete, Matías Concha y Benjamín Gómez, se abordó la temática de emisión de contaminantes en la cual este trabajo se centra en los contaminantes emitidos por vehículos terrestres en ruta.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es modelar la emisión de contaminantes vehiculares en ruta producida en Chile en el período 2020-2050 considerando diferentes niveles de penetración de electromovilidad.

Objetivos específicos

Para este trabajo se pueden separar los objetivos específicos en cinco:

1. Explorar metodologías y proyecciones utilizadas para el cálculo de emisiones de contaminantes vehiculares.
2. Identificar cambios tecnológicos que tengan incidencia en las emisiones.
3. Crear una distribución tecnológica para dos escenarios en el período de análisis.
4. Estimar factores de emisión de CO₂, CO, CH₄, VOC, BC, PM_{2.5} y NO_x para la flota vehicular terrestre chilena.
5. Obtener las emisiones de contaminantes emitidos por vehículos terrestres en ruta en el período 2020-2050 para Chile.

1. Capítulo 1, Estado del arte.

Para poder comprender los conceptos utilizados en este trabajo y las consideraciones tomadas en el siguiente capítulo se realiza una introducción a las temáticas abordadas, separándolas conceptualmente en dos grandes grupos: inventarios de emisión en Chile y tecnologías disruptivas.

1.1 Emisiones de contaminantes y metodología de estimación

Antes de explicar en qué consiste un inventario de emisión es necesario explicitar porqué es importante realizar inventarios y cuáles son los contaminantes para inventariar.

La polución del aire tiene orígenes naturales y antropogénicos, este trabajo se concentra en las emisiones antropogénicas producidas por la combustión de vehículos terrestres en ruta. Estos contaminantes se separan principalmente en primarios y secundarios. Primarios son todos aquellos emitidos directamente desde las fuentes mientras que los secundarios se producen por reacciones químicas entre los elementos de emitidos y los ya presentes en la atmósfera.

Además de los contaminantes primarios y secundarios existen los gases de efecto invernadero. Estos gases tienen efecto global y acumulativo a diferencia de la polución que son locales.

Los contaminantes vehiculares para calcular en este trabajo serán los siguientes: CO, MP2.5, CO₂, CH₄, VOC, NO_x y BC. (Tan, 2014)

- CO

Compuesto químico emitido como resultado de cualquier combustión de hidrocarburos. Se analiza debido a que tiene la capacidad de sustituir al oxígeno en la hemoglobina en la sangre, generando así una intoxicación y anoxia en el cuerpo por falta de hemoglobinas libres. Además, el compuesto creado de la unión del CO y la hemoglobina impide el transporte del oxígeno a los tejidos

- MP2.5

El material particulado fino de 2.5mm de diámetro se considera para el análisis debido a que al ser de pequeño tamaño puede atravesar los conductos respiratorios hasta llegar a los alveólos causando graves problemas respiratorios.

- CO₂ y CH₄

Ambos gases son gases de efecto invernadero ayudando a el calentamiento global. Cada país firmante del acuerdo de Kyoto y luego del acuerdo de París, dentro de los cuales se encuentra Chile, debe cumplir con una cuota de emisión de CO₂ comprometida.

- VOC y NO_x

Ambos son los principales contribuidores de la baja visibilidad y contaminación visual atmosférica ya que producen ozono troposférico.

- BC

Finalmente, el BC (Carbono Negro) se considera como importante contribuidor al calentamiento global, ya que absorbe la luz de una manera muy efectiva aumentando la temperatura de su ambiente, esto es especialmente importante en glaciares y zonas con alta concentración de hielo o nieve.

La baja calidad de aire es responsable de una de cada ocho muertes a nivel global, la polución del aire se ha convertido en uno de los más grandes desafíos de la sociedad del siglo XXI respecto al medio ambiente. Episodios de polución aguda en ciudades pueden resultar en enfermedades cardíacas y respiratorias, como bronquitis, neumonía e incluso la muerte para la población.

Aunque en el ambiente no se distingue la proveniencia de los contaminantes, para poder realizar planes de acción y poder comprender su comportamiento es necesario separarlos según la fuente de emisión. Así pudiendo confeccionar políticas públicas dirigidas y efectivas para diferentes focos de contaminación.

Esto se realiza utilizando metodologías de “Inventario de Emisiones” las cuales trabajan con la siguiente estructura:

- a) Energía
- b) Procesos industriales y usos de productos
- c) Agricultura
- d) Desecho
- e) Fuentes naturales
- f) Otras fuentes

De este listado interesa para este trabajo solamente la sección de energía, más específicamente combustión asociada a vehículos de transporte terrestre. Para que se comprenda de manera completa se presenta también el desagregado completo de la sección de energía:

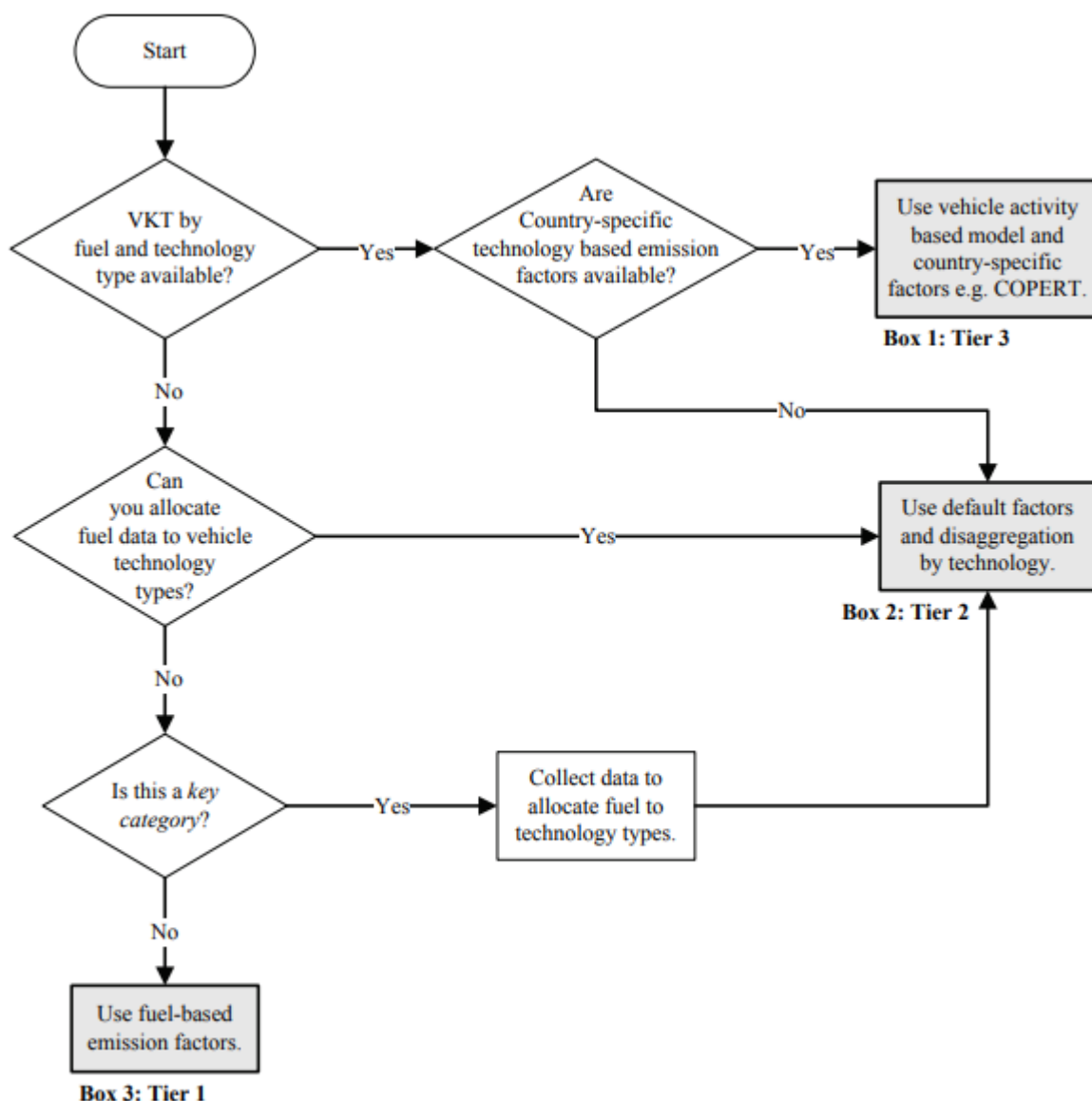
- a) Energía.

- a. Combustión.
 - i. Energía Industrial.
 - ii. Combustión en manufactura y construcción.
 - iii. Aviación.
 - iv. Transporte vial.
 - v. Evaporación de gasolina.
 - vi. Ferrocarriles.
 - vii. Navegación.
 - viii. Maquinaria fuera de ruta.
 - ix. Transporte por tuberías.
- b. Fugas de emisiones por combustibles.

Estos inventarios se basan principalmente en dos grandes metodologías de uso internacional:

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006) y el EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme, European Environment Agency) (European Environment Agency, 2019) las cuales tienen la particularidad de usar diferentes métodos según el nivel de data que se tenga a disposición para la confección del inventario. Estos métodos se dividen en tres niveles: Tier 1, 2 y 3. Donde el Tier 1 es el método más básico, Tier 2 el intermedio y Tier 3 el más complejo y demandante en términos de data.

Ilustración 1 Árbol de decisiones IPCC 2006 para transporte en ruta



Como se puede ver en el árbol de decisiones de IPCC el Tier ocupado depende principalmente de la data que se tiene en el momento de seleccionar los factores de emisión.

Tier 1:

Utilizando este método se estiman las emisiones de contaminantes utilizando el combustible consumido como indicador de actividad, en combinación con factores de emisiones promedio específicos al combustible seleccionado. En el caso del EMEP/EEA los factores de emisión del Tier 1 son el resultado de usar la metodología Tier 3 en una flota típica europea y su actividad del 1995, esto

genera que la flota tenga una tecnología más antigua y puede resultar en una sobreestimación de las emisiones.

Este Tier utiliza cuatro categorías vehiculares: Automóviles de pasajeros, LCV (Light Comercial Vehicle), HDV (Heavy Duty Vehicle), L-category (Vehículos livianos motorizados)

Tier 2:

El Tier 2 considera el combustible utilizado por diferentes vehículos, separados por categorías y normativas de emisión. Esto permite subdividir las cuatro categorías descritas en el Tier 1 en la siguiente tabla (European Enviroment Agency, 2019):

Tabla 1 Sumario de clases de vehículos utilizados en Tier 2.

Vehicle category (j)	Type	Legislation/technology (k)
Passenger cars	Petrol Mini	Euro 4, Euro 5, Euro 6
	Petrol Small, Medium, Large-SUV-Executive	PRE ECE, ECE 15/00-01, ECE 15/02, ECE 15/03, ECE 15/04, Improved Conventional, Open-Loop, Euro 1 – Euro 6 2020+
	Diesel Mini	Euro 4, Euro 5, Euro 6 2020+
	Diesel Small, Medium, Large-SUV-Executive	Conventional, Euro 1 – Euro 6 2020+
	LPG Mini	Euro 4, Euro 5, Euro 6
	LPG Small, Medium, Large-SUV-Executive	Conventional, Euro 1 – Euro 6
	2-stroke	Conventional
	Petrol Hybrids	Euro 4, Euro 5, Euro 6 2020+
	CNG	Euro 4, Euro 5, Euro 6
Light commercial vehicles	Petrol	Conventional, Euro 1 – Euro 6 2021+
	Diesel	Conventional, Euro 1 – Euro 6 2021+
Heavy-duty vehicles	Petrol and Diesel	Conventional, Euro I - Euro VI
Buses	Urban CNG buses	Euro I, Euro II, Euro III, EEV
	Urban buses, Coaches	Conventional, Euro I - Euro VI
	Urban biodiesel buses	Conventional, Euro I - Euro VI
Mopeds	2-stroke < 50 cm ³	Conventional, Euro 1 - Euro 5
	4-stroke < 50 cm	
Motorcycles	2-stroke > 50 cm ³	Conventional, Euro 1 - Euro 5
	4-stroke 50-250 cm ³	Conventional, Euro 1 - Euro 5
	4-stroke 250-750 cm ³	Conventional, Euro 1 - Euro 5
	4-stroke > 750 cm ³	Conventional, Euro 1 - Euro 5
Mini-cars	Diesel	Conventional, Euro 1 - Euro 5
ATVs	Petrol	Conventional, Euro 1 - Euro 5

Esto permite que el Tier 2 sea más preciso, pero a la vez más exigente en términos de data.

Tier 3:

El Tier 3 calcula las emisiones utilizando una combinación de datos técnicos y de actividad firmes.

Las emisiones vehiculares son fuertemente dependientes de las condiciones de operación del motor. Diferentes situaciones de conducción imponen diferentes condiciones de funcionamiento del motor, lo que a su vez implica diferentes emisiones. Por lo que en esta metodología se realiza la separación entre conducción urbana y en autopista. Además de realizar la distinción el modo de conducción el Tier 3 requiere como dato de entrada la velocidad media del vehículo la cual se ingresa en la formula seleccionada según la categoría de la Tabla 1.

1.2 Inventario de emisión en Chile

Luego de describir los inventarios y sus contaminantes se procede a presentar los inventarios nacionales más relevantes en Chile.

Segundo informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático

Uno de los inventarios realizados a nivel internacional por cada uno de los países firmantes del acuerdo de París está presente en el informe de actualización. Se requiere que la información entregada sea detallada y de calidad, por lo que Chile entrega este reporte con información extendida, precisa y actualizada sobre los avances del país que respectan a las actividades climáticas además de presentar las visas a mejorar las implementaciones del acuerdo tanto nacional como internacionalmente.

En el informe bienal (Farías & Mager, 2016) se presenta el país geográfica y políticamente, para poder comprender en su completitud los esfuerzos realizados en el ámbito climático. Se presenta también la evolución de la institucionalización de la lucha climática, en el 2010 se crea la Oficina de Cambio Climático (OCC), dependiente directamente de la subsecretaría de Medio Ambiente. En 2014 la OCC pasa a ser el Departamento de Cambio Climático (DCC) el cual se pasa a encargar de los procesos de negociación internacional.

Luego el informe presenta el inventario nacional de gases de efecto invernadero de Chile, 1990-2013, el cual es de interés para conocer los métodos y enfoques de los inventarios de emisiones nacionales.

La serie 1990-2013 es el cuarto inventario de gases de efecto invernadero (INGEI) presentado por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en cumplimiento del artículo 4, párrafo 1(a), y el artículo 12, párrafo 1(a) de dicha convención, y la decisión 1 de la Conferencia de las Partes número 16 de Cancún (Farías & Mager, 2016)

Para elaborar el INGEI de Chile se siguieron las directrices del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) de 2006 para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Eggleston,

Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006), abarcando todo el territorio nacional e incluyendo emisiones y absorciones de CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ en una serie de tiempo del 1990 al 2013. El INGEI de Chile es el resultado del trabajo de los Ministerios de Agricultura, Energía y Medio Ambiente, en el marco del SNICHILE (Sistema Nacional de Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Chile) utilizando así expertos de diversos ministerios para el trabajo sectorial de la emisión de gases de efecto invernadero.

Los métodos y niveles aplicados por el INGEI de Chile se ven resumidos en una tabla la cual para el trabajo deseado solamente se extrae la sección Energía:

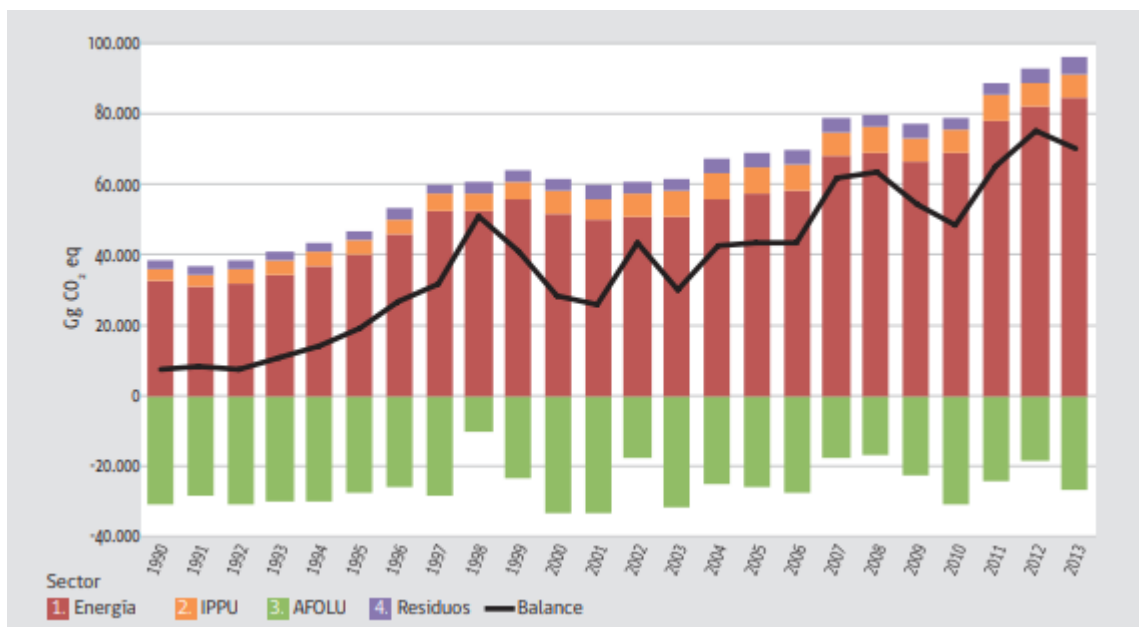
Tabla 2: Métodos aplicados en el INGEI de Chile, serie 1990-2013

Categorías de fuente y sumidero de gases de efecto invernadero	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	Método aplicado	Factor de emisión	Método aplicado	Factor de emisión	Método aplicado	Factor de emisión
1. ENERGÍA	T1, IE, NA, NE, NO	D, IE, NA, NE, NO	T1, T2, IE, NA, NE, NO	D, IE, NA, NE, NO	T1, T2, IE, NA, NE	D, IE, NA, NE
1.A. Actividades de quema de combustible (método sectorial)	T1, IE, NE	D, IE, NE	T1, T2, IE, NE	D, IE, NE	T1, T2, IE, NE	D, IE, NE
1.A.1. Industrias de la energía	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE
1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE
1.A.3. Transporte	T1, IE, NE	D, IE, NE	T1, T2, IE, NE	D, IE, NE	T1, T2, IE, NE	D, IE, NE
1.A.4. Otros sectores	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE	T1, IE	D, IE
1.A.5. No especificado	IE, NE	IE, NE	IE, NE	IE, NE	IE, NE	IE, NE
1.B. Emisiones fugitivas de combustibles	T1, NA, NE, NO	D, NA, NE, NO	T1, NA, NE, NO	D, NA, NE, NO	NA, NE	NA, NE
1.B.1. Combustibles sólidos	NA, NE	NA, NE	T1, NA, NE, NO	D, NA, NE, NO	NA	NA
1.B.2. Petróleo y gas natural	T1, NE, NO	D, NE, NO	T1, NE, NO	D, NE, NO	NA, NE	NA, NE
1.B.3. Otras emisiones provenientes de la producción de energía	NE	NE	NE	NE	NE	NE
1.C. Transporte y almacenamiento de CO ₂	NO	NO	NO	NO	NO	NO
1.C.1. Transporte de CO ₂	NO	NO				
1.C.2. Inyección y almacenamiento	NO	NO				
1.C.3. Otros	NO	NO	NO	NO	NO	NO

De esta tabla se extrae que para la subsección transporte se utilizan solamente T1 y T2 donde en el caso del CO₂ se utiliza T1 (Farías & Mager, 2016) lo que indicaría como se explicó anteriormente que no se tenía la data necesaria para utilizar el T3.

Luego de revisar los métodos de cálculo de emisiones se procede a revisar las emisiones calculadas.

Gráfico 1: INGEI de Chile, emisiones y absorciones de GEI (Gg CO₂ eq) por sector, serie 1990-2013

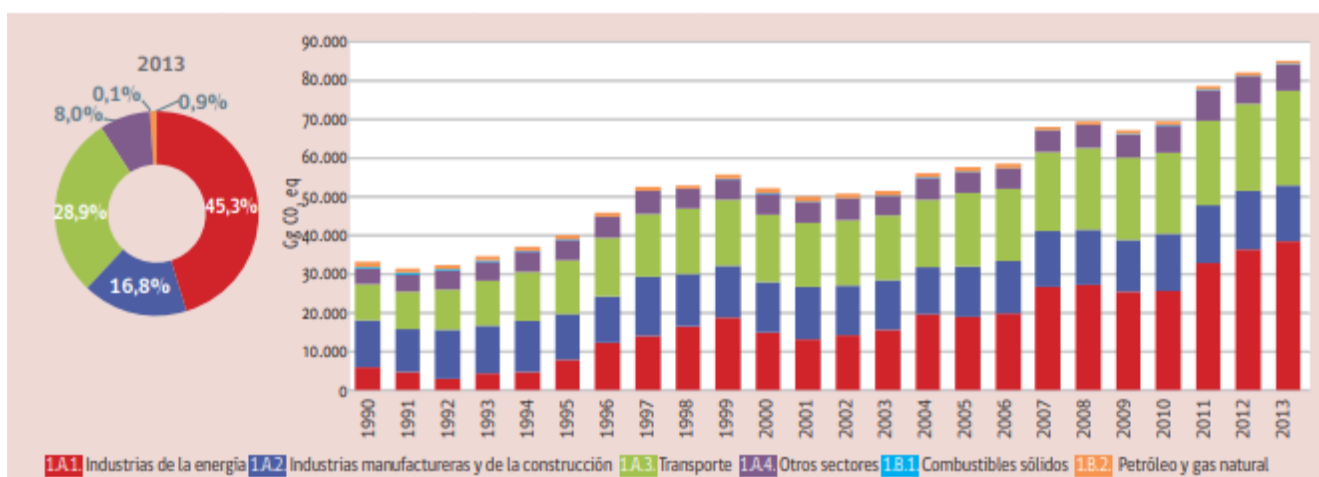


Como se puede apreciar en la gráfica presentada de las emisiones totales de CO₂ eq, el sector Energía es el principal emisor, con un 77,4% de emisiones de GEI totales en 2013 (Farías & Mager, 2016). Para una mejor comprensión se realiza una visión sobre el sector Energía obteniendo los siguientes datos:

Tabla 3: Sector Energía, emisiones de GEI (Gg CO₂ eq) por subcategoría, serie 1990-2013

Subcategoría	1990	2000	2010	2011	2012	2013
1.A.1. Industrias de la energía	5.843,8	14.909,2	25.623,4	32.800,0	36.388,6	38.518,4
1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción	12.257,5	13.007,4	14.801,8	14.901,0	15.122,8	14.282,3
1.A.3. Transporte	9.249,3	17.348,9	20.952,5	21.861,6	22.555,3	24.545,7
1.A.4. Otros sectores	3.974,8	5.562,1	7.028,2	8.014,6	7.122,8	6.846,4
1.B.1. Combustibles sólidos	481,5	74,2	40,0	47,5	51,1	92,1
1.B.2. Petróleo y gas natural	1.412,7	1.221,0	977,9	902,3	835,9	790,6
Total	33.219,5	52.122,9	69.423,7	78.527,0	82.076,6	85.075,4

Gráfico 2: Sector Energía, emisiones de GEI (Gg CO₂ eq) por subcategoría, serie 1990-2013



En el gráfico anterior se ve representado el peso real que tiene el subsector transporte respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, casi el 30%.

Luego de esto, se presentan las políticas y acciones de mitigación de gases de efecto invernadero.

Chile presenta el 2015 los compromisos en la Contribución Nacional Tentativa de Chile (INDC) (Gobierno de Chile, 2015), esto con cinco pilares principales:

- Mitigación
- Adaptación
- Construcción y fortalecimiento de capacidades
- Desarrollo y transferencia de tecnologías
- Financiamiento

Específicamente presenta metas para las emisiones Chile se compromete al 2030 a reducir sus emisiones de CO₂ por unidad de PIB en un 30% respecto al nivel alcanzado el 2007, esta reducción se promete del 35% a 45% si se obtienen aportes monetarios internacionales.

Además, Chile fue el primer país del mundo en registrar una NAMA (Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada) la cual en lo que transporte respecta define una “Zona verde para el transporte en Santiago” estimando una reducción de GEI de 1,43 [MtCO₂eq].

Finalmente, se explicita la vulnerabilidad de Chile al cambio climático enfatizando así las necesidades del país para seguir avanzando en contra del cambio climático. Uno de los mayores desafíos continúa siendo la instalación de sistemas de reporte para proveer información oportuna y adecuada sobre los contaminantes emitidos.

En el caso de la mitigación se requiere realizar esfuerzos importantes para fortalecer los sistemas de medición, reporte y verificación (MRV), esto de manera transversal a las diferentes instituciones que

desarrollan acciones que pueden contribuir a la reducción de emisiones de GEI, enfocándose en los gobiernos regionales y municipios. También se requiere transferencia tecnológica en el país, para reducir el uso de energía y fomentar el uso de tecnologías bajas en emisiones, así como tecnologías que fomentan el uso de energía limpia en el país.

Para los inventarios nacionales se presenta como principal necesidad del INGEI contar con la mayor cantidad posible de profesionales permanentes y competentes, contratados por el Estado, que constituyan equipos técnicos estables que garanticen la sostenibilidad del sistema y la calidad de las estimaciones de GEI. Además, se espera obtener la mayor cantidad de factores de emisión país específicos para reflejar la realidad del país lo más preciso posible.

Apoyo a la iniciativa para el plan de mitigación de los contaminantes climáticos de vida corta en Chile

Se confecciona este estudio para generar antecedentes técnicos para conocer mejor los contaminantes climáticos de vida corta y elaborar el plan de mitigación de contaminantes de vida corta en Chile. Para ello se elabora un inventario de emisiones de CCVC (contaminantes climáticos de vida corta) y se realiza una estimación de reducciones por esfuerzos de descontaminación.

Para elaborar el inventario se utilizan diferentes metodologías, en el caso de las fuentes móviles en ruta se utiliza STEP2 (Bond, 2013) para los factores de emisión y SECTRA para el nivel de actividad. Mientras que para la generación de energía se utiliza EMEP/EEA (European Environment Agency, 2016) para los factores de emisión (COPERT 4) y CNE para el nivel de actividad.

Al considerar planes de mitigación posibles para el sector transporte se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4 Planes de mitigación posible para el sector transporte (Iniciativa plan de mitigación CCVC)

Tipo de vehículo	Medida de mitigación
Móviles en Ruta	Apagado de Motor
	EURO VI
	Recambio de Buses
	RV – actividad restringida
	Zona de Baja Emisión

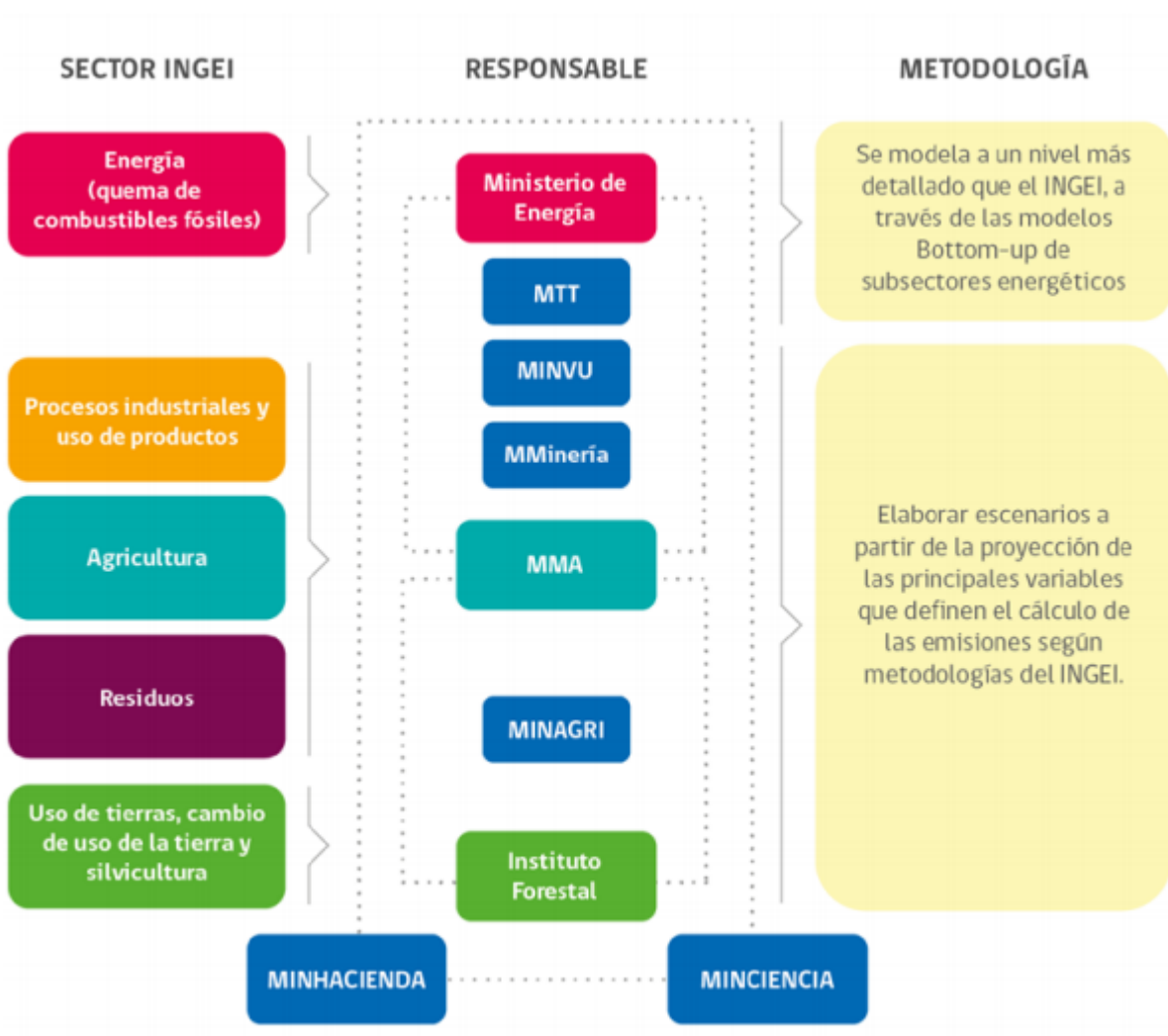
En este caso se despliegan los esfuerzos de mitigación de los vehículos terrestres en ruta en varios frentes. Primero responsabiliza al conductor indicando un cambio de comportamiento de éste en el apagado del motor. Luego presenta un cambio normativo en el ingreso del EURO IV, introduciendo el recambio de buses lo que es un impulso gubernamental y requiere licitación. Finalmente presenta una mitigación en base a la limitación de circulación en zonas de actividad restringida y zonas de baja emisión.

Proyección de emisiones sector transporte en Chile.

Dentro de las proyecciones más recientes está presente el NDC (Contribución Nacionalmente Determinada de Chile) de Chile actualización 2020 (Gobierno de Chile, 2020) donde el país presenta su actuar frente al cambio climático y el calentamiento global, con diferentes planes de mitigación, adaptación, integración e implementación de las políticas públicas para realizar un cambio en el aporte al cambio climático que realiza Chile. Para respaldar la implementación de estas políticas se realizan proyecciones de emisión de contaminantes en diferentes áreas utilizando el método presentado por el IPCC 2006 (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006).

El método IPCC utiliza un software donde se puede elegir TIER 1 o 2 con los cuales se obtienen diferentes factores de emisión. Cuando se utiliza el software se ingresa la actividad de cada combustible en unidades de energía y con eso se calculan las emisiones según el combustible combustionado en el periodo de tiempo seleccionado. Esto al estar a cargo de los sectores específicos provee una buena aproximación al proyectar emisiones.

Ilustración 2: NDC Chile actualización 2020



En el caso de interés, específicamente el sector energía, se divide en tres secciones.

La sección A del proceso establece las principales proyecciones económicas y variables locales para proyectar la demanda nacional energética; esto se retroalimenta con la sección B que incluye opciones y propuestas de mitigación. Finalmente, la sección C proyecta la generación de electricidad. Utilizando estas tres categorías se alimenta el método explicado con anterioridad.

Las medidas utilizadas en el NDC para proyectar los escenarios para el caso de transporte terrestre en ruta están presentes en la siguiente tabla:

Tabla 5: Medidas de mitigación escenarios NDC Chile actualización 2020

Descripción			Escenario de Referencia	Escenario de Carbono Neutralidad
Ámbito	Medida	Sector		
Electromovilidad	Taxis 100% eléctricos	Energía	21% taxis colectivos a 2050	100% taxis colectivos a 2050
	Transporte público -RM	Energía	20% de buses en RM a 2050	100% de buses de transporte público urbano en Chile a 2040
	Transporte público Regiones	Energía	0% de buses en regiones no RM a 2050	100% de buses de transporte público urbano en Chile a 2040
	Vehículos particulares 60%	Energía	21% vehículos particulares a 2050	58% vehículos particulares a 2050
	Vehículos comerciales 60%	Energía	21% vehículos particulares a 2050	58% vehículos particulares a 2050
	Cambio modal transporte	Energía	Sin medidas asociadas	Disminución de transporte privado motorizado por cambio a buses y bicicletas
Hidrógeno	Transporte de carga	Energía	Sin medidas asociadas	71% en transporte de carga a 2050
	Usos motrices en industria y minería	Energía	Sin medidas asociadas	12% en usos motrices en industria y minería a 2050
	Uso térmico vía gasoductos	Energía	Sin medidas asociadas	7% en hogares y 2% en industria a 2050

Para complementar el informe presentado por la NDC el Centro de Clima y Resiliencia (CR)2 realizó un inventario de carbono negro (black carbon) en el informe “Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile” (Gallardo, y otros, 2020). Para realizar la proyección en este informe se utiliza el programa LEAP. El método LEAP utiliza un software el cual trabaja principalmente para el cálculo de proyección de consumo energético, pero a su vez tiene integrado de manera complementaria el cálculo de emisión de contaminantes asociados a este consumo energético. A diferencia de IPCC para el cálculo de emisión vehicular se puede ingresar como dato al programa factores vehiculares relevantes para localizar el cálculo de emisiones, estos son: número de vehículos que ingresan al parque, número de vehículos que salen del parque, cantidad de distancia recorrida por el vehículo y ciclos de vida de los vehículos. Además, en la sección de factores de emisión éstos se pueden ingresar manualmente como también pueden ser utilizados los factores por defecto presentes en la base de datos del programa.

Las medidas asociadas al transporte en ruta son las siguientes:

Tabla 6: Mitigación carbono negro NDC Chile 2020

Medida	Políticas actuales	Carbono neutralidad	Carbono neutralidad +	Explicación
Estrategia de electromovilidad.	X	X	X	40 % de la flota de vehículos particulares eléctricos al 2050. 100 % de transporte público eléctrico al 2040.

Como se puede apreciar en la tabla, en el caso de los vehículos terrestres en ruta solamente se considera la estrategia de electromovilidad y ésta se mantiene constante independiente del escenario.

De los informes previamente mencionados se destaca que para la selección de actividad a nivel nacional se utiliza SECTRA proveyendo así de la estadística nacional de parque vehicular al estudio a realizar. Además, para la selección de factores de emisión, aunque la metodología varíe se utiliza COPERT 4, generalmente Tier 1 o Tier 2. Esto debido a que no existen aún factores de emisión país específicos para Chile. Sin embargo, con una buena calidad de información estadística sobre la flota de vehículos en el país es posible utilizar Tier 3, luego debido a que se tiene acceso a COPERT 5 (actualización 2019) (European Environment Agency, 2019) es factible para utilizar en este proyecto COPERT 5 Tier 3. Esperando así entregar un inventario de emisiones que represente de manera fidedigna la realidad de Chile a través de sus regiones.

1.3 Tecnologías disruptivas

Como se vio en la sección anterior las proyecciones de los inventarios en Chile son consistentes respecto a la meta de la electromovilidad en los vehículos terrestres en ruta. Esto como se verá más adelante es debido a que se guían por la estrategia de electromovilidad nacional. Sin embargo, estas proyecciones no presentan la manera en la que se llegará a estas metas y para poder conocer el comportamiento de la electromovilidad primero hay que comprender cómo se comportan este tipo de tecnologías.

1.3.1 Descripción y análisis internacional.

Las tecnologías pueden dividirse en tres definiciones:

- Incremental: Una mejora a los productos actuales.
- Revolucionaria: Un producto nuevo y mejor a la opción que lo precede, sin embargo, suelen ser de alta gama y considerados lujosos.
- Disruptiva: Permite acceso al consumidor común y rompe con el paradigma del mercado existente.

Esta última definición se basa en la definición inicial de Clayton M. Christensen (Christensen, 1997), el cual define las tecnologías disruptivas como una innovación o modelo de negocio que le permite al consumidor común acceder a un valor que no tenía anteriormente generando un mercado nuevo o un quiebre en el mercado anterior. Un ejemplo clásico son los vehículos a motor de combustión interna, los cuales en el momento de su concepción eran un artículo de lujo, una tecnología revolucionaria. Y fue con la creación de la producción en serie de Ford que permitió bajar los precios de una manera substancial. Luego los vehículos de combustión interna pasaron por la transición desde tecnología revolucionaria a disruptiva. Pronto, casi todas las funciones que entregaba el caballo de trabajo fueron cambiadas por un vehículo de combustión interna, comenzando lo que sería una dominación del mercado hasta ahora. Este cambio de paradigma en movilidad generó un cambio sustancial en la infraestructura asociada: mejora de los caminos y carreteras, estacionamientos y puntos de carga de combustible entre otros.

De este modo, debido a la capacidad de estas tecnologías de cambiar completamente las características de un mercado, así como por su alto impacto económico, estas son analizadas prospectivamente e incentivadas con el fin de acelerar el proceso de transición. Por lo tanto, en vez de hablar de tecnologías disruptivas como las que ya superaron la transición, en este trabajo se toman las tecnologías disruptivas como aquellas que tienen alto potencial de ser disruptivas.

Al ser consideradas tecnologías con alto nivel de transformación de mercado debe usarse esta característica para impulsar además cambios sustanciales en nuestros modelos tanto de consumo como de extracción de recursos naturales. Nuestro planeta no soporta el paradigma actual de producción y de consumo de energía. En este último concepto, una de las principales preocupaciones es el impacto que tiene el consumo energético en el calentamiento global, por ello se intenta disminuir dicho impacto desde diversos ángulos. Así mismo existe una preocupación creciente en el impacto a la salud de dichos contaminantes, por lo que disminuir o eliminar su emisión se vuelve imperativo para un desarrollo sustentable de nuestro planeta.

En el caso de este trabajo se busca encontrar una disminución de los contaminantes emitidos al consumir o producir energía. Charlie Wilson presenta en sus papers del 2017 (Wilson, Disruptive low-carbon innovations, 2017) y 2018 (Wilson, Pettifor, Cassar, Kerr, & Wilson, 2018) las potenciales tecnologías disruptivas asociadas al transporte terrestre en ruta, estas se pueden separar en dos grandes grupos:

Tecnologías para vehículos o alternativas de combustibles:

- Vehículos eléctricos.

Son vehículos impulsados por uno o más motores eléctricos donde la energía es almacenada en baterías recargables. Si bien el concepto existe desde aproximadamente el año 1832, por problemas principalmente en la tecnología en baterías no pudo considerarse como una

tecnología disruptiva viable. En la actualidad la autonomía y precios de los vehículos eléctricos permite divisarlos como una tecnología factible.

- Biocombustible.

Es un combustible que, a diferencia del combustible fósil, se genera de una mezcla de sustancias orgánicas. Si bien se sigue realizando combustión en el vehículo al utilizarlos, el combustible en sí mismo es más sustentable que los combustibles fósiles en tanto estos pueden llegar al 50% de reducción en emisión de contaminantes respecto a los combustibles fósiles. La mayor desventaja de esta tecnología es la necesidad de uso de suelo para su producción en gran escala, lo cual va en contra de los lineamientos necesarios para generar una sustentabilidad a nivel global.

- Híbridos.

Son vehículos que cuentan con ambas tecnologías (combustible fósil y batería eléctrica). Si bien siguen consumiendo combustible fósil, se utilizan como paso intermedio a los vehículos eléctricos mientras las baterías tengan la autonomía necesaria. Debido a la rápida evolución de la tecnología de baterías, no se prevé que los vehículos híbridos avancen de tecnología revolucionaria.

- Vehículos de celda de combustible.

Son vehículos que en sí mismo son considerados eléctricos ya que toda la energía utilizada es eléctrica. Se diferencian de estos ya que la electricidad proviene de una celda de combustible, la cual comúnmente es de hidrógeno.

Formas alternativas de movilidad:

- Viajes compartidos o ride-sharing.

Los viajes compartidos consisten en el uso de vehículos para compartir el viaje con otros pasajeros. Esto ya sucede en Chile al considerar los buses y los colectivos, sin embargo, se espera que aumente el uso del viaje compartido disminuyendo así la cantidad necesaria de vehículos en el parque automotriz.

- Movilidad compartida o shared mobility.

La movilidad compartida se refiere al uso compartido de vehículos para el transporte, esto implica que no existe dueño individual del vehículo y existen a disposición del usuario para

cuando se le necesite usar. Este modelo suele ser tomado por privados para suplir esta necesidad.

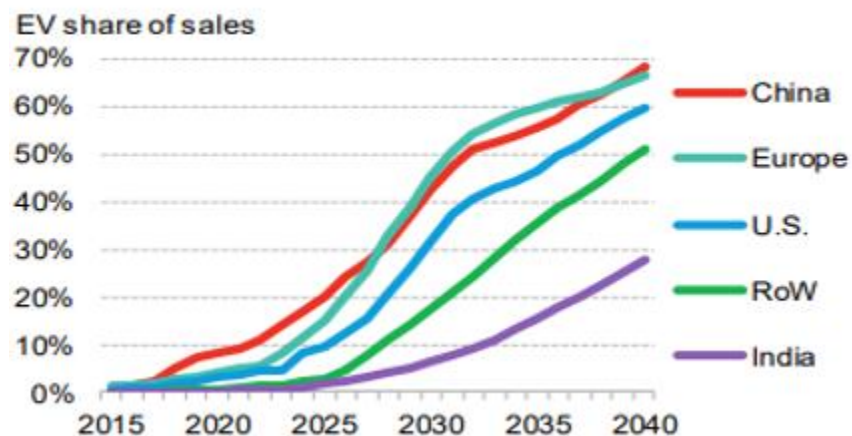
- Vehículos no motorizados.

Cualquier tipo de vehículo el cual no requiera motorización para su uso, estos suelen utilizarse en viajes cortos (distancia menor a 5[km]).

Respecto a implementación de estas tecnologías el texto “Disrupting+Mobility” (Meyer & Shaheen, 2017) y en las políticas de movilidad del Reino Unido (Department for Transport, 2019) presentan diversas problemáticas a las tecnologías disruptivas. La más importante es el impacto negativo entre diferentes tecnologías. Ya que al implementarse sin generar sinergias entre ellas es posible que se estorben y repercutan de manera negativa disminuyendo los beneficios que ofrecen. Por ello se recomienda crear un plan con una mirada holística del sistema de transporte enfocado en la interconexión de modos de desplazamiento tanto públicos como privados. Además, se requiere una transformación de infraestructura para soportar el cambio de carga eléctrica necesaria y lugares intermedios para realizar los cambios modales.

De las posibles tecnologías disruptivas que se pudiesen adoptar el caso más estudiado a nivel internacional es el de la penetración de la electromovilidad. Uno de los estudios que se realiza para proyectar su impacto en el mercado vehicular es el Electric Vehicle Outlook (BloombergNEF, 2019), se estudia en este caso la versión del 2019, en la cual se proyecta el porcentaje de ventas asociados a los vehículos eléctricos (EV).

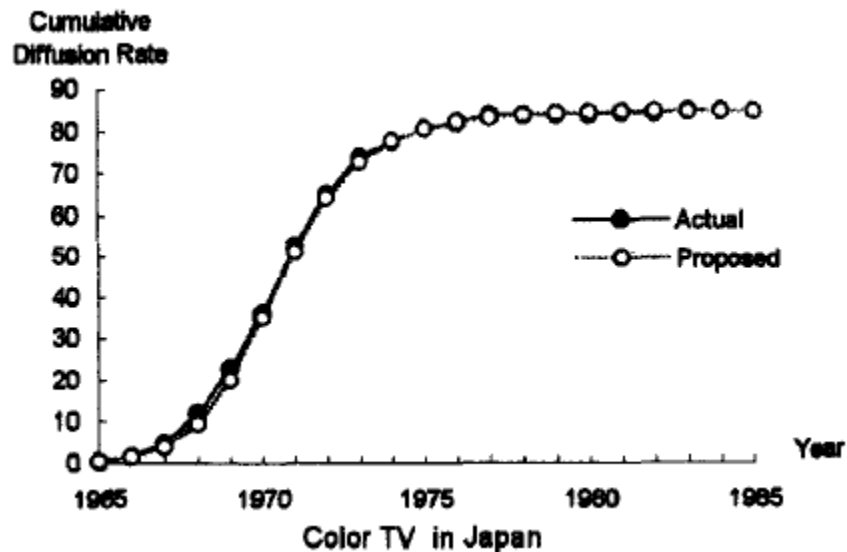
Gráfico 3: EV share of sales proyectado al 2040, Electric Vehicle Outlook 2019



Como se puede apreciar en el gráfico, a nivel internacional los pioneros son Europa, China y US. Esto debido a que son productores e importadores de vehículos eléctricos. Chile se encuentra como uno de los países con mayores iniciativas a nivel latinoamericano respecto a la electromovilidad por lo que se podría considerar en la misma línea o superior al RoW (resto del mundo).

La forma de este gráfico es consistente con el modelo basado en demanda para pronosticar la difusión de innovación (Byungruyong, Hojoong, Chimoon, & Chuhwan, 1996), donde se presenta la forma de la difusión de tecnologías innovativas o disruptivas.

Gráfico 4 Difusión acumulada de la televisión a color en Japón.



Como se puede apreciar en el gráfico la difusión genera una curva S, donde comienza con una lenta adopción del producto seguido de un rápido crecimiento de la curva para finalmente estancarse. Teniendo esto en consideración es coherente utilizar un modelo exponencial para proyectar el crecimiento de la electromovilidad.

1.3.2 Electromovilidad en Chile.

La principal directriz que se revisó es la Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía; Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; Ministerio del Medio Ambiente, 2017) en esta se presentan cinco objetivos específicos para estructurar el camino a seguir,

1. Establecer regulaciones y maneras de estandarizar componentes para un desarrollo de la electromovilidad, enfocándose así en lo energético, ambiental y movilidad.
2. Impulsar la penetración de la electromovilidad en el transporte público.

3. Apoyar la investigación y el desarrollo potenciando la formación de capital humano en electromovilidad.
4. Generar un mercado sustentable equilibrando el desarrollo de la electromovilidad.
5. Generar espacios de difusión de información para que los actores tomen decisiones óptimas respecto a la electromovilidad.

De estos cinco ejes estratégicos solamente el eje número dos es abarcado por el Ministerio de Transportes y los demás son tomados por el Ministerio de Energía.

Esta estrategia presenta como el gobierno principalmente será el encargado de fomentar e impulsar la electromovilidad en el país. Luego es sensato confiar en las metas presentadas por el gobierno respecto a la electromovilidad. Ya que al ser una tecnología disruptiva su éxito depende principalmente de los incentivos que se realicen para poder irrumpir en el mercado.

1.4 Conclusiones Capítulo 1

En el Capítulo 1 se analizaron distintos métodos para la confección de inventarios de emisión, IPCC y EMEP/EEA los cuales separan sus metodologías en tres niveles: Tier 1, 2 y 3. Los cuales van ascendiendo en orden de complejidad siendo Tier 1 el más simple y Tier 3 el más complejo.

Para estudiar los inventarios nacionales se tomaron los ejemplos del NDC y el segundo informe bienal de actualización sobre el cambio climático publicado en el 2016. Los métodos utilizados en estos inventarios utilizaban factores Tier 1 o 2, los cuales son números predeterminados y la velocidad de conducción no tenía incidencia en el cálculo de las emisiones. Como se tiene acceso a la velocidad, la actividad y características específicas del vehículo se inclina por utilizar Tier 3, en este caso COPERT 5 ya que es la actualización más reciente de COPERT. Así mismo para acceder a la velocidad y las características de los vehículos se sigue la línea de los demás inventarios y se opta por utilizar datos estadísticos en este caso SECTRA.

Dentro los informes se refuerza la idea de la necesidad de tener factores de emisión país específicos para reflejar de una manera más precisa las emisiones de contaminantes en nuestro país generando así inventarios más fidedignos en los cuales apoyarse para revisar la eficacia de los esfuerzos de mitigación y combate al cambio climático.

Además, se exploró la bibliografía para acercarse a lo que está pasando alrededor del mundo respecto a las tecnologías vehiculares y lo que se aproxima al futuro cercano de Chile. Se comenzó trabajando con el concepto de tecnologías disruptivas las cuales representan elementos transformadores de mercado o de uso de tecnología en este caso referentes al transporte terrestre en ruta.

Respecto a las tecnologías disruptivas la principal conclusión a la que se llega es que el punto más importante es la implementación, debido a que dependiendo de cómo se implementen las diferentes

tecnologías disruptivas es que tan efectivas y eficientes son. Esto se debe a que muchas comparten el mismo mercado. Se deben complementar y no estorbar en su trabajo para poder así disminuir las emisiones y la congestión.

Si bien se pudo comprender el amplio abanico de posibilidades que podrían afectar a Chile, por la estructura del trabajo que se debió realizar se toma en consideración solamente la electromovilidad. Está será representada por una forma exponencial característica de las tecnologías disruptivas.

Finalmente se considera que gran parte de la responsabilidad de la penetración de la electromovilidad depende del gobierno debido a que para irrumpir en el mercado actual es necesario una serie de incentivos y políticas públicas para respaldar la tecnología.

2. Capítulo 2, Proyección de tecnologías vehiculares.

Para poder comprender como se comportarán las emisiones de contaminantes en el futuro primero se deben considerar los diversos comportamientos que pueden tomar tanto el parque vehicular como las tecnologías asociadas a cada vehículo. Durante este proceso solamente se analizaron las tecnologías y normativas asociadas al parque automotriz chileno ya que este se entrega ya completo por la contraparte del proyecto.

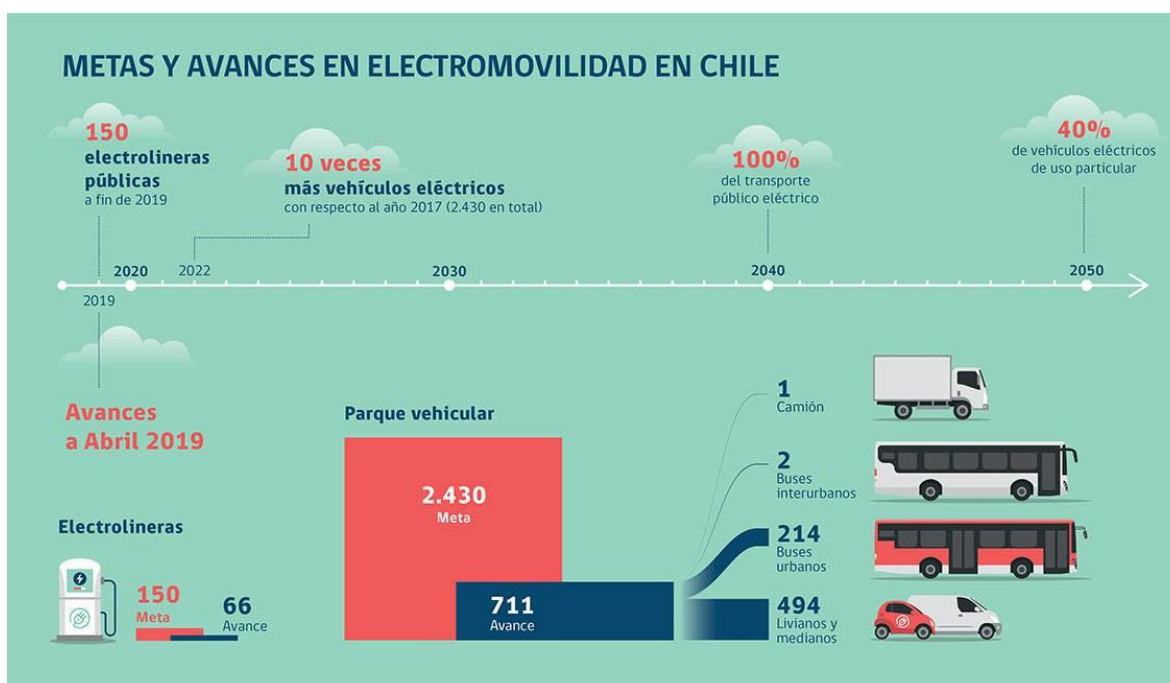
2.1 Metodología.

Para la proyección de emisión de contaminantes terrestres de vehículos en ruta se consideran dos elementos principales: tendencias normativas y tendencias tecnológicas.

En el caso de las tendencias normativas se prevé que se incorpore la norma Euro 6 a Chile. La resolución exenta de dicha norma data del 21 de marzo del 2019, dejando un periodo de 24 meses hasta la revisión de los límites máximos aplicables a vehículos livianos para establecer los límites de emisión de la norma EURO 6 y sus equivalentes en la norma de la USEPA. Debido a la naturaleza de estos procedimientos la estimación optimista sería que la norma se incorporara el año 2023 mientras que la estimación pesimista vendría siendo la incorporación en el año 2030.

De manera paralela se analizan las tendencias tecnológicas de la cual la más relevante que se identifica con mayor claridad en la discusión nacional es la electromovilidad y su penetración en el mercado del transporte terrestre. Existen varios documentos oficiales que presentan el camino que se planea tomar para abordar este desafío, entre ellos la Ruta Energética 2018-2022 (Gobierno de Chile, 2018) y la Estrategia de Electromovilidad (Ministerio de Energía; Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Estos casos y metas propuestas por el gobierno se utilizarán como punto de partida del análisis y como línea base de los escenarios ya que les da un respaldo de lo que se está impulsando en el país.

Ilustración 3: Planes del gobierno para avances de electromovilidad en Chile



Como se aprecia en la ilustración se pueden dividir las metas en corto y largo plazo:

Las metas a corto plazo establecidas por el gobierno son:

- Para el año 2020 multiplicar por 10 el número de vehículos eléctricos (terrestres en ruta) en Chile existentes al año 2018, es decir, pasar de 243 a 2430 unidades.
- A fines de 2019 contar con 150 electrolineras públicas en Chile.

Las metas a largo plazo establecidas por el gobierno son:

- Para el año 2040 el 100% de los vehículos de transporte público en Chile deberán ser eléctricos.
- Para el año 2050 el 40% de los vehículos privados en Chile deberán ser eléctricos.

Para respaldar la viabilidad de estas metas, el Ministerio de Energía utiliza la distribución de ventas por vehículos a nivel mundial y compara con las proyecciones de un 25% y 40% de vehículos eléctricos vendidos sobre el total, tomando la decisión de utilizar el valor del 40% al ser la más agresiva. Para el transporte público consideran un crecimiento lineal, hasta alcanzar el 100% de electromovilidad para el 2040. Estos análisis son respaldados con proyecciones de demandas energéticas y vehicular.

Cabe destacar en este punto del trabajo que la penetración de la electromovilidad no está solamente ligada a la venta vehicular y renovación del parque (consideración utilizada en este trabajo), sino que al

ser una tecnología disruptiva exige diversos cambios en el sistema donde esta inserta. Es necesario generar cambios de infraestructura (mayor cantidad de electrolineras y capacidad de la red), normativos (incentivos a la compra, impuesto verde), intersectoriales, educacionales, de matriz energética, etc., para poder soportar la entrada masiva de vehículos eléctricos. Sin embargo, este trabajo no es capaz de analizar estas variables y asume que la penetración de los vehículos es alta o baja sin ir al detalle de lo que causa su alta o baja penetración.

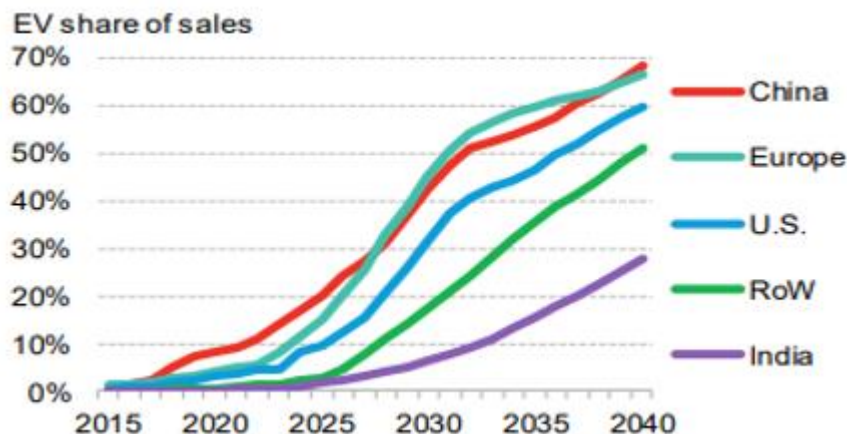
Como la penetración de vehículos del transporte público está principalmente designada por las licitaciones gubernamentales, que se ajustan a las políticas de transporte, se considera pertinente y posible la meta de 100% de vehículos eléctricos de transporte público el año 2040.

La penetración en el transporte privado posee mayor incertidumbre. Principalmente, su desarrollo estará condicionado por tres desafíos ampliamente reconocidos a nivel internacional: el precio de los vehículos eléctricos, la autonomía que ofrecen y la capacidad de contar con una red de carga adecuada a nivel nacional.

Considerando lo anterior, se proponen dos casos para la penetración de electromovilidad en vehículos privados.

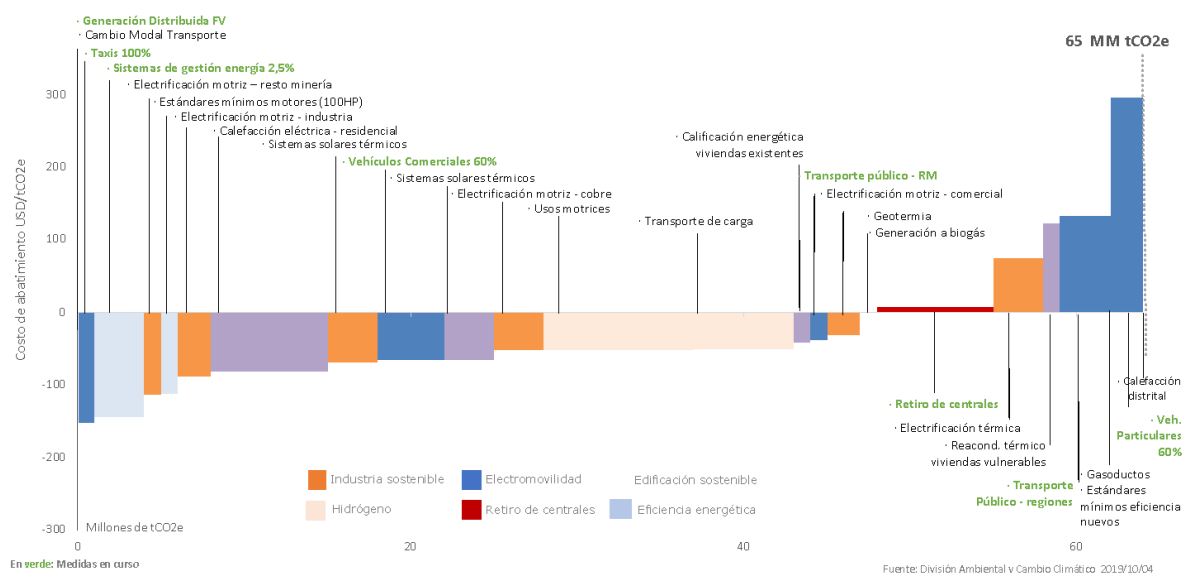
El caso optimista considera que para el año 2050 se tendrá un 50% de vehículos privados eléctricos, esto se respalda por la proyección de BNEF en su reporte del 2019 (BloombergNEF, 2019), la cual considera que para el 2040 el porcentaje de ventas de vehículos eléctricos para países como Chile es del 50%. Esta estimación incluye a Chile como RoW (rest of the world). Debido a la posición de Chile como pionero respecto a la adaptación a esta tecnología, se puede asumir el cumplimiento de esta proyección, lo cual es mayor que el caso considerado por el Ministerio de Energía (40%).

Gráfico 5: EV share of sales proyectado al 2040, Electric Vehicle Outlook 2019



La proyección de electromovilidad en el transporte vial no solo considera vehículos eléctricos con baterías químicas, sino que también se considera el uso de celdas de combustible que usan hidrógeno como combustible. Esta opción es especialmente importante en el caso de vehículos pesados de carga, donde la superioridad de densidad energética del hidrógeno sobre las baterías es un factor determinante. De acuerdo con la propuesta preliminar desarrollada por el gobierno en las Nationally Determined Contribution (NDC) (Gobierno de Chile, 2020) para la componente de mitigación, se considera como medida para el sector transporte que el 85% de los vehículos con capacidad de carga superior a 5 toneladas se impulsarán con celdas de combustible en base a hidrógeno. Según se indica en la siguiente figura, esta medida ofrece un buen valor en el indicador de costo eficiencia (barra etiquetada “Transporte de carga”, al centro del gráfico) Sin embargo, depende fuertemente de avances tecnológicos, formación de capital humano y de desarrollo de inversiones asociadas a su producción, transporte, almacenamiento y distribución.

Gráfico 6: Costo de abatimiento USD/tCO₂e por tipo de combustible y emisión



2.1.1 Clasificación vehicular.

Las categorías utilizadas en este trabajo se establecen según las características de cada uno de los vehículos, basados en los decretos:

- **DTO-55 16-ABR-1994** – “NORMAS DE EMISION APLICABLES A VEHICULOS MOTORIZADOS PESADOS” (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2020)
- **DTO-211 11-DIC-1991** – “NORMAS SOBRE EMISIONES DE VEHICULOS MOTORIZADOS LIVIANOS” (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2020)

Con la descripción de cada una como:

- **Vehículos livianos de pasajeros (VLP):** Son todos los vehículos motorizados livianos diseñados principalmente para el transporte de personas. Se incluyen en esta definición, las camionetas livianas o furgones con un peso bruto menor a 2700 kg.
- **Vehículos comerciales livianos (VLC):** Son los vehículos motorizados livianos con un peso bruto menor a 2700 kg. diseñados para el transporte de carga o derivados de éstos.
- **Taxi (TAX):** Son todos los vehículos motorizados livianos diseñados principalmente para el transporte de personas con un peso bruto menor a 2700 kg. La diferencia con los VLP es que se consideran transporte público por lo que la tecnología aplicada es diferente.
- **Camión Liviano (CAM LIV):** Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto entre 3860 y 4536 kg.
- **Camión Mediano (CAM MED):** Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto entre 4537 y 6350 kg.
- **Camión Pesado (CAM PES):** Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto sobre 6350 kg.
- **Bus Articulado (BUS ART):** Autobús de dos o más secciones tipo módulo, en Chile utilizado en el transporte público.
- **Bus Rígido (BUS RIG):** Autobús de una sección, utilizado en el transporte público y privado.
- **Bus Interurbano Provincial (BUS INT PROV):** Autobús rígido que se desplaza solamente en recorridos interurbanos provinciales, solamente privado.

2.1.2 Clasificación tecnológica

Una vez separado el parque vehicular por tipo de categoría es necesario dividirlos por tecnología de abatimiento de emisiones, con esta división se podrá calcular el cambio tecnológico vehicular a través de los años.

La norma chilena se rige principalmente por la norma europea siendo las normas instauradas en Chile las siguientes:

- **Pre-Euro (no catalítico o convencional) (1990~2030)**
- **Euro 1 (1994~2030)**
- **Euro 2 (1997~2040)**
- **Euro 3 (2006~2050+)**
- **Euro 4 (2012~2050+)**
- **Euro 5 (2014~2050+)**
- **Euro 6 (aun no entra en vigor)**
- **Eléctrico (pocas unidades aún)**

Las fechas presentadas en cada norma representan una estimación de la prevalencia en el parque vehicular de Chile.

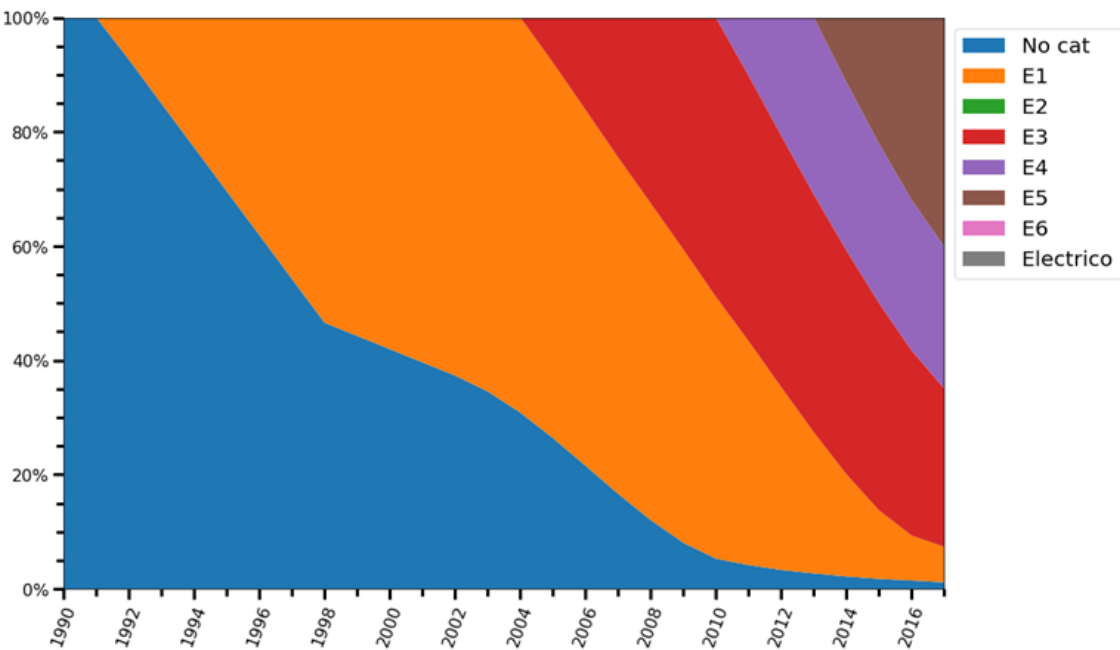
2.1.3 Proyección tecnológica de escenarios

Una vez contruidos los escenarios y clasificados los vehículos se puede construir el camino que se estima tomará la renovación vehicular. Donde la entrada de vehículos se considerará solamente de Euro 5 y eléctrico hasta la entrada del Euro 6 donde será Euro 6 y eléctrico.

Utilizando los datos históricos vehiculares de Chile por región (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018), de los cuales se adjunta la región metropolitana en el Anexo de este texto mientras que el resto del país se encuentra como archivo adjunto, se puede extrapolar el porcentaje de disminución o renovación de la flota vehicular. De manera de ejemplo se presenta VLP urbano gasolina de la región metropolitana:

Gráfico 7: R13 VLP Urbano Gasolina

Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina



Con lo anterior se puede estimar una disminución por año para cada tecnología. Luego se calcula el aumento necesario de los vehículos eléctricos para llegar a las metas según escenario. Esto lleva a la siguiente tabla:

Tabla 7: Aumento y disminución tecnológica por norma y tipo de vehículo eléctrico

Categoría	Optimista	Pesimista
Pre-Euro	-40%	-40%
Euro 1	-35%	-35%
Euro 2	-15%	-15%
Euro 3	-5%	-5%
Euro 4	-5%	-5%
Euro 5	-5% (después del año 2023)	-5% (después del año 2030)
Euro 6	Se ajusta según el resto	Se ajusta según el resto
Eléctrico privado	+26,1%	+23,65%
Eléctrico público	+20%	+20%
Eléctrico CAM PES	+26,1%	+18,7%

Notar que en la tabla se presenta un aumento de los vehículos eléctricos como un aumento porcentual, esto es para que la forma de la curva de vehículos eléctricos tenga una forma exponencial como la presentada en el Capítulo 1. Esto se aprecia de manera más clara en los gráficos presentados más adelante.

2.2 Escenarios tecnológicos y normativos 2020-2050

Según lo presentado en la metodología se destaca un cambio normativo para este periodo, la implementación de Euro 6/VI, el cual debido a los procesos legislativos se tiene cierta incertidumbre de su puesta en marcha y se estima un ingreso temprano del 2023 y un ingreso tardío del 2030. Además, se identifica un ingreso de vehículos eléctricos donde se pueden distinguir dos tipos, los vehículos eléctricos con batería convencional y los vehículos eléctricos con celda de hidrógeno donde estos últimos solamente se verían implementados durante este período en los camiones pesados o considerados como camiones de más de dos ejes.

Para estimar la penetración de electromovilidad se utilizan las líneas presentadas por el gobierno desviándose levemente para generar los escenarios optimistas y pesimistas, además se considera que el transporte público será constante a través de los escenarios debido a que tiene un impulso del tipo estatal y gubernamental por lo que se puede esperar que sea igual en ambos escenarios.

Así se obtienen los siguientes escenarios para utilizar en la estimación de emisión de contaminantes:

Optimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2023.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 50% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 50% al 2050.

Pesimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2030.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 30% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 10% al 2050.

2.3 Distribución tecnológica según escenarios.

Utilizando de base los datos presentados en los gráficos 1990-2017 y la tabla generada para obtener las metas postuladas en los escenarios se construyen distintas distribuciones tecnológicas para cada tipo de vehículo según el escenario y la región. Si bien el aumento y disminución de porcentaje de cada tecnología y normativa es el mismo por escenario (optimista y pesimista) el punto de inicio es diferente para cada región por lo que se calculan las quince regiones (no se considera Ñuble). En esta sección del texto se presentarán los gráficos 1990-2050 VLP urbano gasolina de la región metropolitana, mientras que el resto de los gráficos de la región metropolitana estarán presentes en el Anexo y el país completo en el archivo adjunto. Se selecciona a la región metropolitana ya que posee aproximadamente el 50% de los vehículos del país.

Gráfico 8: Optimista R13 VLP Urbano Gasolina

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

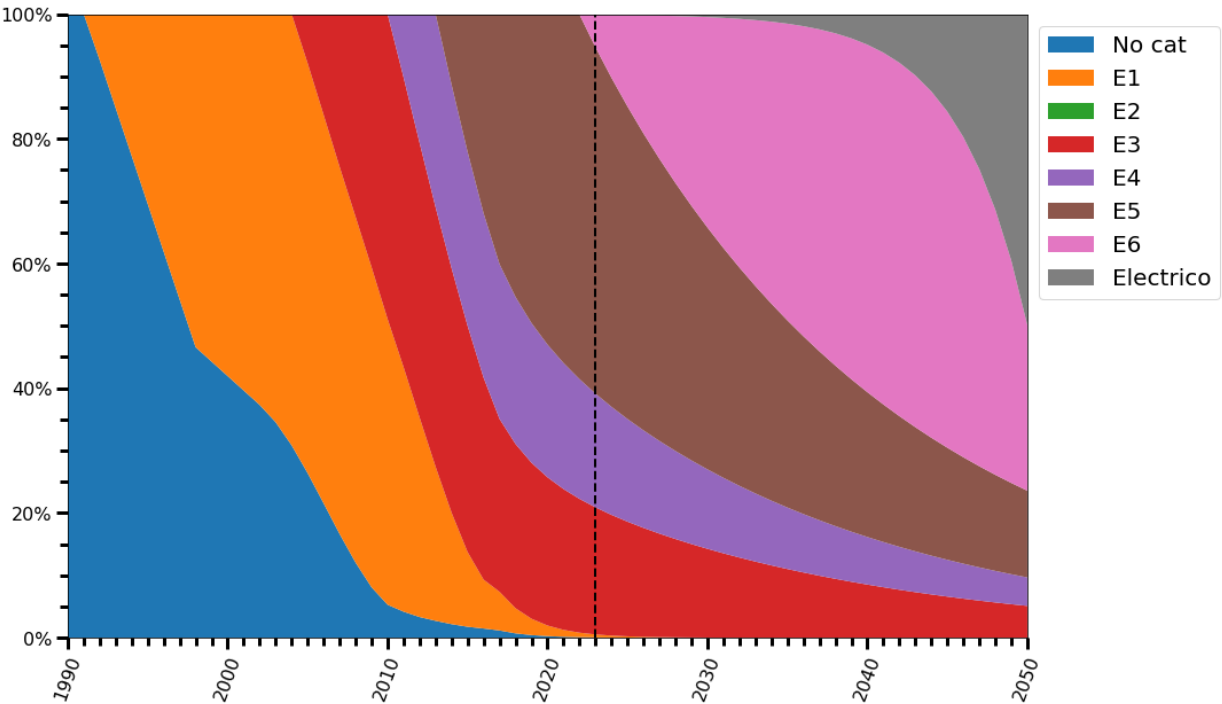
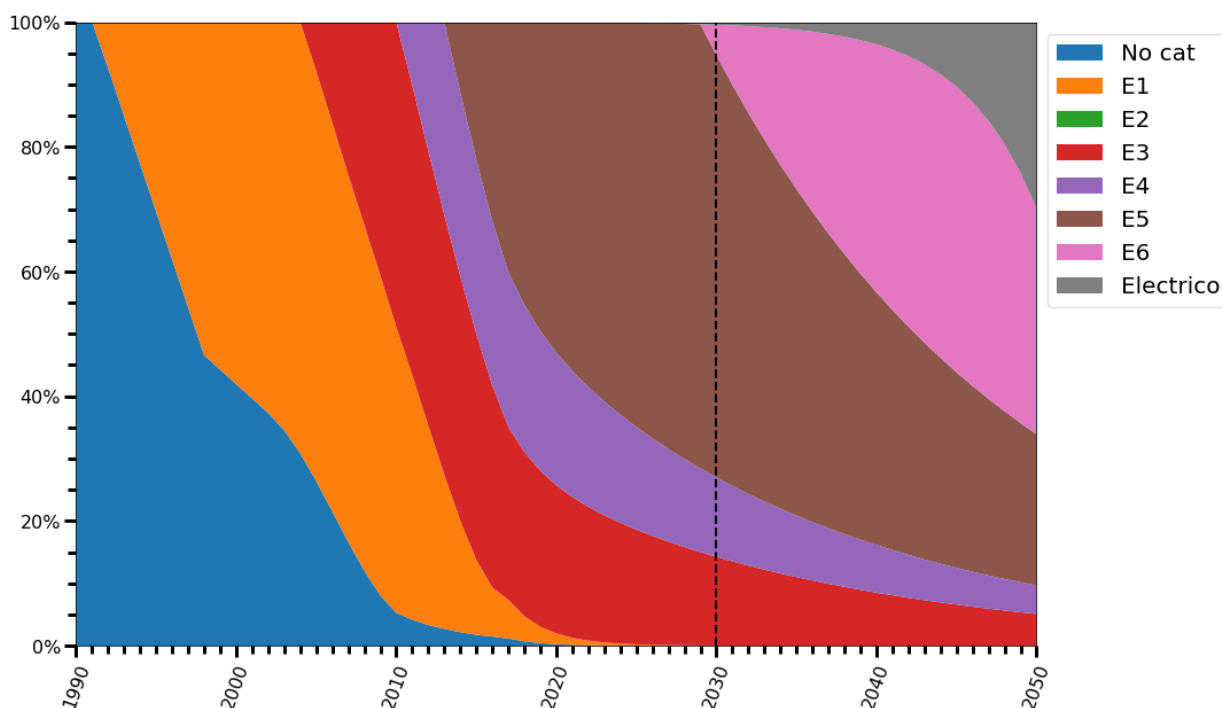


Gráfico 9 Pesimista R13 VLP Urbano Gasolina

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina



Como se puede apreciar en los gráficos se logra reproducir el comienzo de una curva S representando la difusión de tecnologías disruptivas como fue presentado en el Capítulo 1. También el comportamiento de las tecnologías Euro 5/V y Euro 6/VI es parecido al comportamiento histórico de las normativas en el país. Finalmente, cabe destacar que el ingreso tardío de la tecnología E6/VI permite una gran penetración de E5/V en el parque vehicular y debido a que la entrada de la electromovilidad es tan agresiva la participación del E6/VI no supera el 50% en el caso Pesimista.

2.4 Conclusiones Capítulo 2

En el capítulo 2 se confeccionaron dos escenarios tecnológicos y normativos para proyectar el comportamiento de la flota vehicular terrestre en ruta en Chile en el periodo 2020-2050.

Primero se identifican los posibles cambios tecnológicos que tengan incidencia en las emisiones basándose en el Capítulo 1. Para este trabajo se selecciona solamente la electromovilidad y se proyecta su penetración respecto a dos pilares de las tecnologías disruptivas, los incentivos o metas del estado y el comportamiento esperado del mercado nacional.

En el caso del estado se utilizan las metas propuestas por el gobierno las cuales presentan puntos a los cuales quiere llegar el estado para los años 2040 y 2050, primero se presenta una meta de la totalidad de los vehículos públicos deben ser eléctricos para el 2040 y se plantea que el 40% de los vehículos privados deben ser eléctricos para el 2050. Esto se complementa con la posible presencia de camiones pesados a hidrógeno presentada en el NDC.

En el comportamiento del mercado nacional se utilizan proyecciones internacionales de ventas de vehículos eléctricos, donde se presenta una curva de venta de vehículos eléctricos que alcanza aproximadamente al 50% de las ventas del año 2040.

Luego se analizan los cambios normativos que podrían afectar las emisiones de contaminantes en el periodo 2020-2050, en esta sección se identifica a la norma Euro6/VI la cual presenta un estándar de emisión más estricto que las normas anteriores y se planea que se ingrese para el año 2023.

Finalmente se forman dos escenarios los cuales presentan como línea base las metas del gobierno en conjunto con el ingreso de la norma Euro6/VI:

Optimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2023.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 50% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 50% al 2050.

Pesimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2030.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 30% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 10% al 2050.

Después de formados los escenarios se realiza una proyección utilizando el crecimiento esperado en base a la proyección de ventas y el comportamiento de las tecnologías disruptivas. Creando así una distribución tecnológica para los dos escenarios en el período de análisis. Para que esta proyección se lleve a cabo se debió primero clasificar los vehículos según la información vehicular nacional que se tenía, esto es un paso relevante debido a que repercute al resto del trabajo y en forma de conclusión se considera que es un paso que debe ser discutido para el correcto uso de los factores de emisión y no solamente para su desagregación tecnológica. En el caso de Chile se utiliza en gran parte la norma europea por lo que en este trabajo no se tuvo grandes complicaciones con homologar vehículos para realizar el cálculo.

Finalmente, se analizaron los gráficos generados y se confirmó un comportamiento de las tecnologías y normativas de acuerdo a los esperado, donde las normativas mantienen el comportamiento

de las normativas anteriores y la electromovilidad presenta el comienzo de una curva S consistente a lo presentado en el Capítulo 1.

3. Capítulo 3, Factores de emisión y emisiones.

Después de realizar una caracterización tecnológica y normativa del parque vehicular terrestre del país se seleccionó una metodología para obtener los factores de emisión. Los cuales al utilizarlos con la actividad entregada entregan las emisiones vehiculares para el periodo 2020-2050.

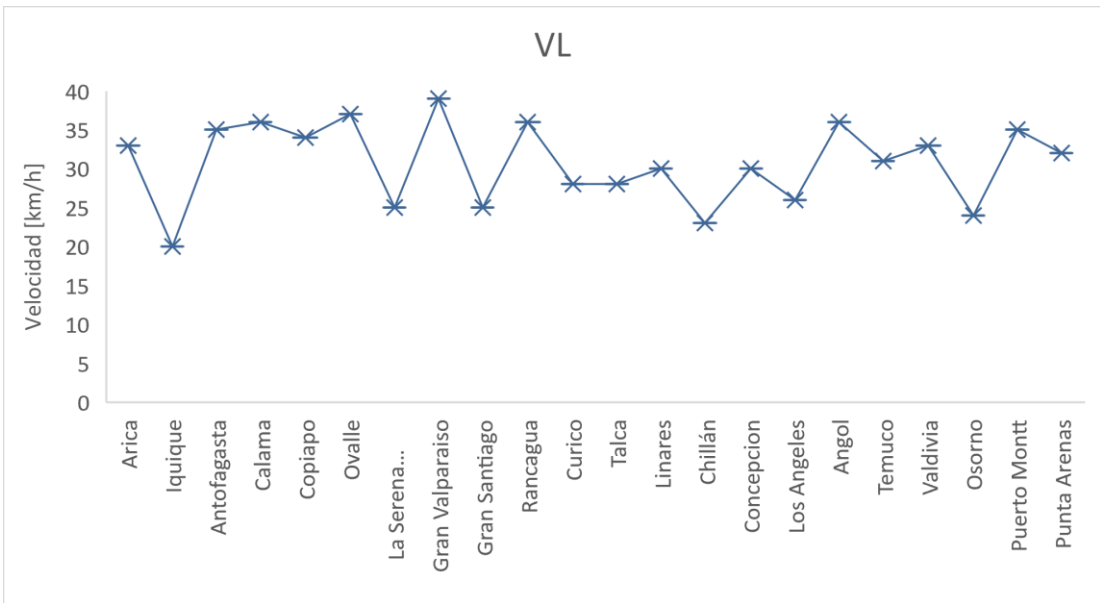
3.1 Metodología.

Considerando que se tienen los datos históricos y proyecciones de los vehículos reportados en el Capítulo 2 y lo argumentado en el Capítulo 1, se decide utilizar el modelo COPERT 5 (European Enviroment Agency, 2019) para la asignación de factores de emisión. De esta manera se puede obtener el factor de emisión de los vehículos con su clasificación (presentada en Sección 2.1.2), combustible utilizado, tecnología utilizada y velocidad media del vehículo. De manera histórica se tienen los datos de vehículos: tipo, combustible y tecnología.

3.1.1 Condiciones nacionales

Para ingresar de manera correcta al modelo COPERT 5 se requiere utilizar la velocidad media del vehículo. Por lo que se accede a SECTRA (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2018) para obtener las velocidades urbanas e interurbanas según región:

Gráfico 10: Velocidades promedio por ciudad SECTRA



Utilizando estos datos se obtienen velocidades medias representativas para las diferentes zonas urbanas según región y las velocidades interurbanas nacionales:

Tabla 8: Velocidades promedio para zonas urbanas por región

Región	Velocidades promedio [km/h]
I	20
II	36
III	34
IV	31
V	39
VI	36
VII	29
VIII	28
IX	34
X	30
XI	30
XII	32
XIII	25
XIV	33
XV	33
XVI	23

Tabla 9: Velocidades promedio para autopistas a nivel nacional

Categorías	Velocidades promedio [km/h]
VLP VLC	100
CAM LIV/MED BUS	90
CAM PES	80

3.1.2 Factores COPERT 5

Al ser una metodología Tier 3, COPERT 5 trabaja con la modelación del comportamiento de la emisión según velocidad a través de un polinomio de alto grado, esto sin importar lo que se desee calcular, el polinomio es el mismo.

$$\text{Factor de emisión} = \frac{\alpha * v^2 + \beta * v + \gamma + \left(\frac{\delta}{v}\right)}{\epsilon * v^2 + \theta * v + \eta} * (1 - F)$$

Los coeficientes utilizados dependerán de las características del vehículo, de su combustible y del contaminante que se desea obtener (European Enviroment Agency, 2019).

Para realizar el paralelismo entre las categorías presentes para el EEA con las categorías previamente descritas se realiza la siguiente tabla de equivalencia:

Tabla 10: Tabla de equivalencia de categorías vehiculares

Categoría trabajo	Categoría EEA
VLP	Passenger Cars
VLC	Light Commercial Vehicles
TAX	Passenger Cars
BUS RIG	Urban Buses Standard 15-18t
BUS INT PROV	Coaches Standard <=18 t
BUS ART	Urban Buses Articulated >18 t
CAM LIV	Heavy Duty Trucks Rigid <=7,5 t
CAM MED	Heavy Duty Trucks Rigid 12-14 t
CAM PES	Heavy Duty Trucks Rigid 20-26 t

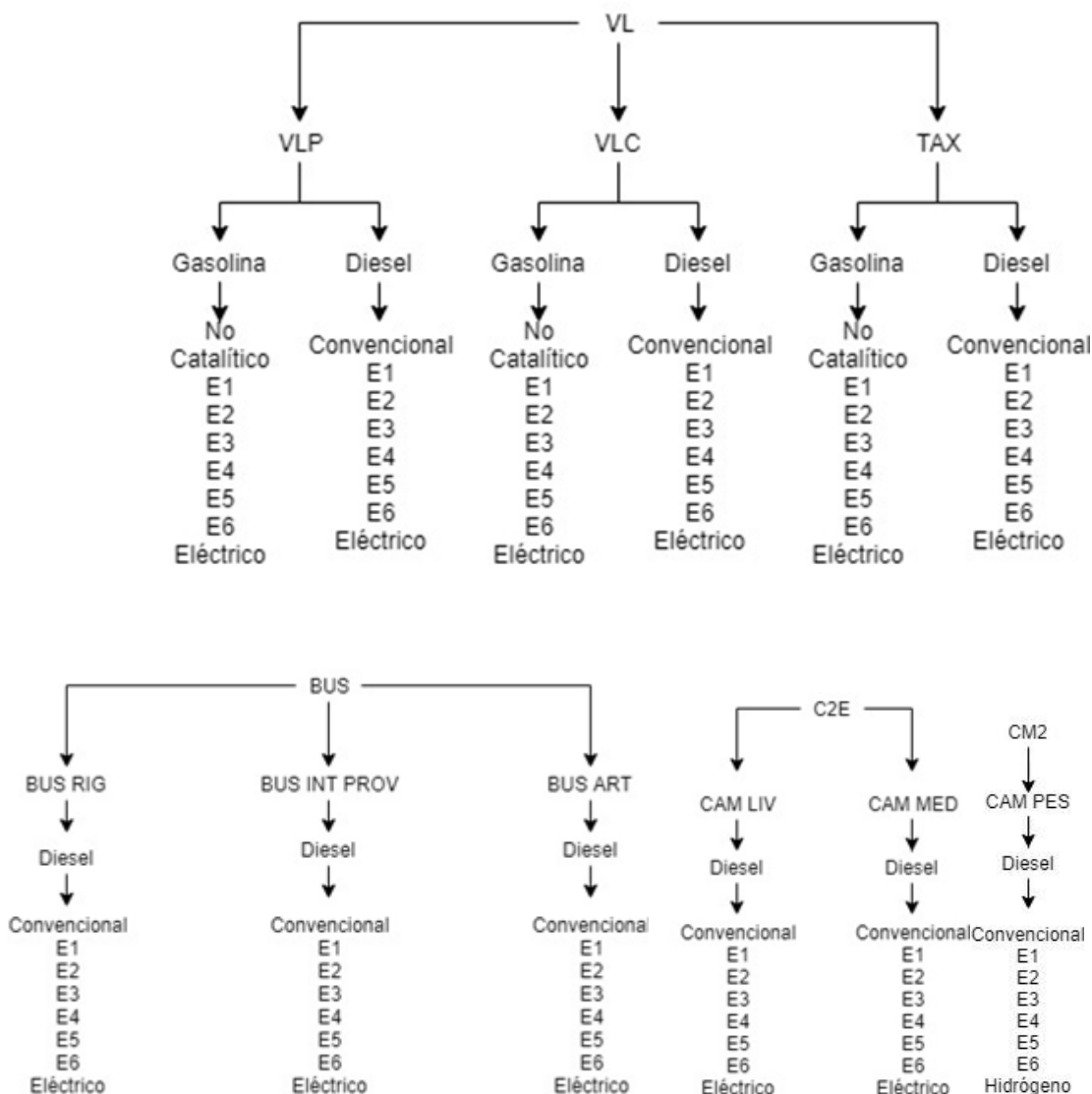
Esto nos entrega un set de factores de emisión por categoría para cada región.

3.1.3 Reclasificación de factores.

La actividad con la que se debe trabajar tiene una clasificación diferente a la postulada previamente por lo que se vuelve necesario realizar una reclasificación. Al ser una clasificación más simple debido al modo de recolección de información se prefiere realizar una reclasificación y no un recálculo de los factores manteniendo así los datos anteriormente descritos y calculados.

Para mostrar visualmente la reclasificación de los factores previamente descritos se utilizan las siguientes figuras:

Ilustración 4: Reclasificación de categorías vehiculares



Para poder realizar esta condensación de información en solamente cuatro categorías se realiza un análisis previo a la proporción tecnológica a través de los años 2013-2016. En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de esta categoría en la región respecto al total de vehículos en el país en ese año:

Tabla 11: Porcentaje de categorías a través de cuatro años por regiones en Chile

R13	2013	2014	2015	2016
VLP	29,9%	30,2%	29,5%	29,5%
VLC	8,0%	8,0%	7,8%	7,8%
TAX	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%
BUS	0,4%	0,4%	0,4%	0,3%
CAM	30,4%	30,7%	30,9%	30,7%

R01	2013	2014	2015	2016
VLP	2,1%	2,0%	2,0%	2,0%
VLC	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	2,6%	2,5%	2,5%	2,4%
R03	2013	2014	2015	2016
VLP	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%
VLC	0,6%	0,6%	0,5%	0,6%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	4,1%	4,2%	4,4%	4,2%
R05	2013	2014	2015	2016
VLP	7,4%	7,3%	7,4%	7,5%
VLC	2,3%	2,4%	3,4%	2,4%
TAX	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
BUS	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	9,1%	9,2%	9,3%	9,3%
R07	2013	2014	2015	2016
VLP	3,7%	3,8%	3,9%	4,0%
VLC	2,2%	2,2%	2,1%	2,1%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	9,2%	9,0%	8,5%	8,5%
R09	2013	2014	2015	2016
VLP	2,4%	2,4%	2,5%	2,6%
VLC	1,5%	1,5%	1,5%	1,6%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	4,7%	4,8%	5,0%	5,1%
R11	2013	2014	2015	2016
VLP	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%
VLC	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%
TAX	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%

R02	2013	2014	2015	2016
VLP	2,5%	2,4%	2,2%	2,2%
VLC	1,0%	0,9%	0,9%	0,8%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	5,9%	5,5%	5,3%	5,2%
R04	2013	2014	2015	2016
VLP	2,6%	2,7%	2,6%	2,7%
VLC	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	4,4%	4,5%	4,3%	4,4%
R06	2013	2014	2015	2016
VLP	3,3%	3,3%	3,4%	3,5%
VLC	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	6,2%	6,4%	6,6%	6,6%
R08	2013	2014	2015	2016
VLP	6,6%	6,6%	6,7%	6,9%
VLC	3,2%	3,1%	3,1%	3,1%
TAX	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
BUS	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
CAM	12,0%	11,9%	11,8%	11,9%
R10	2013	2014	2015	2016
VLP	2,5%	2,5%	2,6%	2,7%
VLC	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%
TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
CAM	5,3%	5,4%	5,5%	5,5%
R12	2013	2014	2015	2016
VLP	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
VLC	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
TAX	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%
BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	1,4%	1,4%	1,4%	1,4%

R14	2013	2014	2015	2016	R15	2013	2014	2015	2016
VLP	1,0%	1,1%	1,1%	1,1%	VLP	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%
VLC	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	VLC	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
TAX	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	TAX	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	BUS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAM	2,1%	2,0%	2,1%	2,2%	CAM	1,5%	1,4%	1,4%	1,4%

Como se puede apreciar en esta tabla de elaboración propia a partir del Parque de Vehículos en Circulación, 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018), la proporción de categorías no cambia drásticamente a través de los años, probablemente porque las categorías dependen del uso que se le da al vehículo ya sea comercial carga o pasajeros. Por lo que se puede asumir que dicha proporción es constante a través de los años, este supuesto se realiza debido a que no se cuenta con una proyección de cantidad de vehículos en cada una de las categorías.

Con este supuesto se procede a realizar la reclasificación con las siguientes fórmulas:

$$FE_{vl,k,l} = \sum \left(\frac{VLP_{i,j,k,l} * n_{i,j,k,l}}{n_{total_{vl,k}}} + \frac{VLC_{i,j,k,l} * n_{i,j,k,l}}{n_{total_{vl,k}}} + \frac{TAX_{i,j,k,l} * n_{i,j,k,l}}{n_{total_{vl,k}}} \right) \text{ (Factor regional)}$$

$$FE_{vl,l} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{12} FE_{vl,k,l} + \sum_{k=14}^{15} FE_{vl,k,l} + FE_{vl,13}}{2}}{2} \text{ (Factor nacional)}$$

$$FE_{C2E,k,l} = \sum \left(\frac{CAMLIV_{j,k,l} * n_{j,k,l}}{n_{total_{C2E,k}}} + \frac{CAMMED_{j,k,l} * n_{j,k,l}}{n_{total_{C2E,k}}} \right) \text{ (Factor regional)}$$

$$FE_{C2E,l} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{12} FE_{C2E,k,l} + \sum_{k=14}^{15} FE_{C2E,k,l} + FE_{C2E,13}}{2}}{2} \text{ (Factor nacional)}$$

$$FE_{CM2,l} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{12} FE_{CAM\ PES,k,l} + \sum_{k=14}^{15} FE_{CAM\ PES,k,l} + FE_{CAM\ PES,13}}{2}}{2} \text{ (Factor nacional)}$$

$$FE_{BUS,Interurbano} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{12} FE_{BUS\ INT,k} + \sum_{k=14}^{15} FE_{BUS\ INT,k} + FE_{BUS\ INT,13}}{2}}{2} \text{ (Factor nacional)}$$

$$FE_{BUS,k,Urbano} = \sum \left(\frac{BUSRIG_{j,k} * n_{j,k}}{n_{total_{BUS,k,Urbano}}} + \frac{BUSART_{j,k} * n_{j,k}}{n_{total_{BUS,k,Urbano}}} \right) \text{ (Factor regional)}$$

$$FE_{BUS,Urbano} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{12} FE_{C2E,k,l} + \sum_{k=14}^{15} FE_{C2E,k,l} + FE_{C2E,13}}{2}}{2} \text{ (Factor nacional)}$$

i = Tipo de combustible (Gasolina o Diesel).

j = Tipo de tecnología (Pre-euro, E1, E2, E3, E4, E5, E6, Eléctrico).

k = Región.

l = Ámbito (Urbano, interurbano).

Donde esto se realiza para cada contaminante (CO₂, CO, PM_{2.5}, CH₄, VOC, NO_x y BC)

3.1.4 Factores eléctricos

Para la obtención de los factores de emisión eléctrico se consideran solamente los factores de CO₂ debido a que el vehículo eléctrico en si no emite contaminantes, sin embargo, la fuente que genera esta energía sí. El CO₂ es un contaminante global por lo que se puede asociar a cada vehículo al consumir esta energía eléctrica.

Se considera la matriz energética de Chile y según los lineamientos del gobierno respecto a la descarbonización y producción energética, por lo que se llega a dos escenarios posibles de limpieza de la matriz.

Se debe hacer el equivalente energético requerido por los vehículos para avanzar un kilómetro para compararlo con los gramos de CO₂ emitidos por unidad energética.

$$FE_{eléctrico} = FE_{co2,red} \cdot \frac{Rendimiento_{vehículo}}{100} \left[\frac{g}{km} \right]$$

Donde el factor de emisión de la red está en unidades de $\left[\frac{g}{kWh} \right]$ y el rendimiento del vehículo está en $\left[\frac{kWh}{100km} \right]$.

Se obtienen los valores de energía abierta (Comisión Nacional de Energía, 2020) y se selecciona una reducción de 84% para el escenario optimista y 70% para el escenario pesimista, esto en el marco presentado en la estrategia de electromovilidad del estado que postula que la matriz de generación eléctrica estará compuesta en un 70% de energías renovables.

Tabla 12: Rendimiento energético de las categorías por año

Año	2010-2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050
Rend VL	27	26	26	25	24	23	22	20
Rend BUS	170	160	160	150	140	130	120	110
Rend C2E	85	80	80	75	70	65	60	55
Rend CM2	180	170	170	160	150	140	130	120

Optimista:

Tabla 13: Factores de emisión CO₂eq/kWh red eléctrica Optimista

Año	2010-2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050
Factor red	382	402	419	406	339	138	87	65

Tabla 14: Factores de emisión eléctrico por categoría Optimista

Año	2010-2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050
FE VL-URB	103	105	109	102	81	32	19	13
FE VL-INT	98	100	104	97	76	27	14	8
FE BUS RIG	649	644	670	609	475	179	104	72
FE BUS ART	669	664	690	629	495	199	124	92
FE BUS INT	669	664	690	629	495	199	124	92
FE C2E	325	322	335	305	237	90	52	36
FE CM2	688	684	712	650	509	193	113	78

Pesimista:

Tabla 15: Factores de emisión CO₂eq/kWh red eléctrica Pesimista

Año	2010-2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050
Factor red	382	402	419	406	337	148	135	124

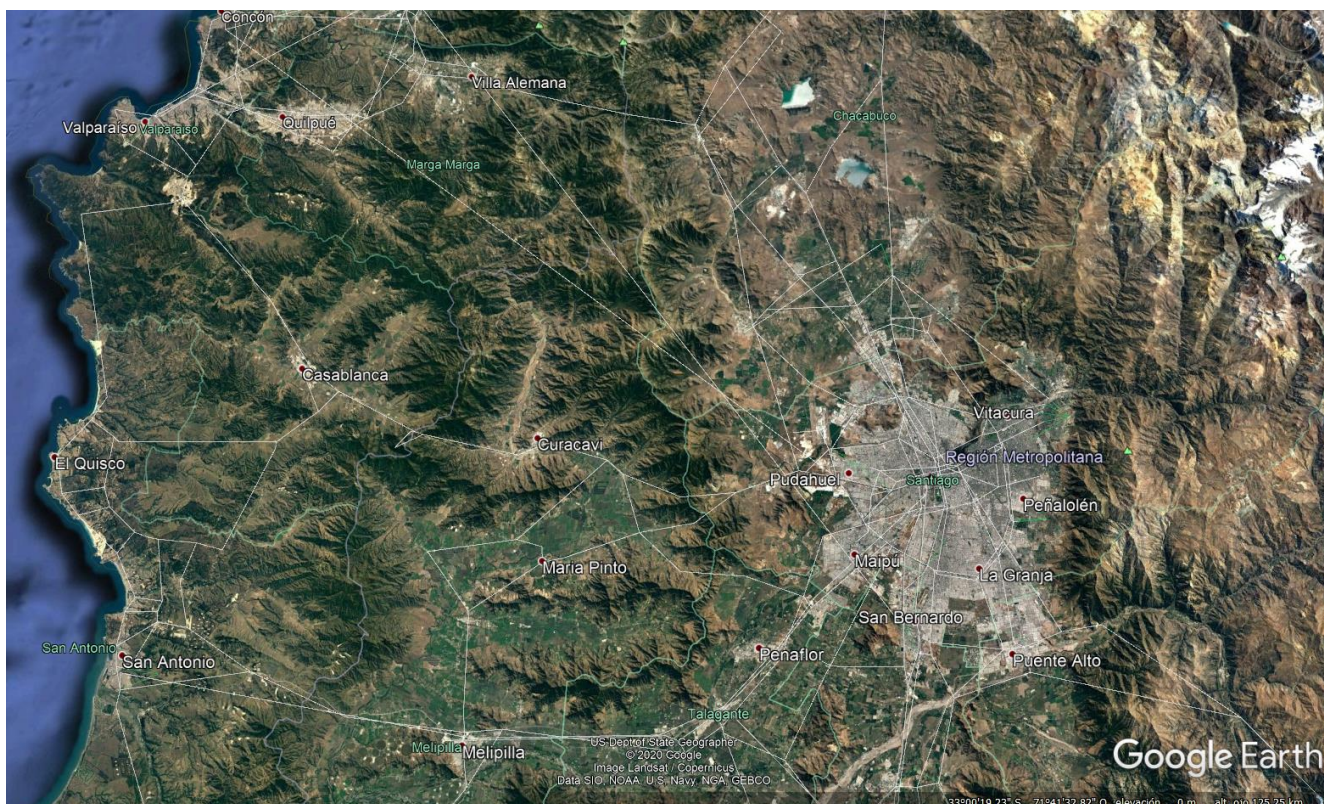
Tabla 16: Factores de emisión eléctrico por categoría Pesimista

Año	2010-2016	2017	2018	2019	2020	2030	2040	2050
FE VL-URB	103	105	109	102	81	34	30	25
FE VL-INT	98	100	104	97	76	29	25	20
FE BUS	649	644	670	609	472	192	162	136
FE BUS ART	669	664	690	629	492	212	182	156
FE BUS INT	669	664	690	629	492	212	182	156
FE C2E	325	322	335	305	236	96	81	68
FE CM2	688	684	712	650	506	207	176	149

3.1.5 Reconocimiento de la actividad.

La actividad que se utiliza en este proyecto está en [km/año] y se representa en una red de nodos a través del país.

Ilustración 5: Imagen satelital representativa de arcos y nodos de la actividad entregada



Cada par de nodos está unido por un arco el cual representa la distancia recorrida por los vehículos entre ambos nodos. Este arco contiene la información sobre la distancia entre los nodos y la cantidad de vehículos que atraviesan el arco tanto en ida como en vuelta. Cada vehículo está clasificado según las categorías previamente descritas: Vehículo Liviano, Bus, Camión de dos ejes, Camión de más de dos ejes.

La información de los arcos se utilizará para calcular las emisiones del sector interzonal (interurbano).

Para calcular las emisiones del sector intrazonal (urbano) se utiliza una proyección de pasajeros-km y toneladas-km al 2050.

Tabla 17: Proyección pasajeros-km y toneladas-km al 2050

Total distancia por categoría y modo 2050											
Modo	Unidad	Modo de transporte de pasajeros					Modo de transporte de carga				
		Automovil	Bus	Tren	Metro	Avion	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Ferrocarril	Barco	Total
Pasajeros	Millon pas-km	105.636.109.628	37.727.182.010	0	7.545.436.402	0					150.908.728.040
Agrícola	Millon ton-km						744				744
Combustible	Millon ton-km						33				33
Comercio	Millon ton-km						439				439
Manufactura	Millon ton-km						655				655
Minerales	Millon ton-km						531				531
Total carga	Millon ton-km						2.401				2.401

Este estudio utiliza los siguientes factores para calcular PKM y TKM:

- Vehículos livianos: 2 personas por vehículo.
- Bus: 33 personas por vehículo.
- Camiones de dos ejes: 7,353 toneladas por vehículo.
- Camiones de más de dos ejes: 21,739 toneladas por vehículo.

Estos datos implican que no existiría un cambio respecto a la ocupación en el caso de los vehículos livianos privados. Esto es diferente a lo que las referencias estudiadas en nuevos tipos de movilidad indican sería el futuro para reducir las emisiones de carbono (Wilson, Pettifor, Cassar, Kerr, & Wilson, 2018) y no es el camino que están siguiendo algunos países (Department for Transport, 2019) , por lo que en el caso de la actividad el resultado de las emisiones podría ser menor en el 2050 si se toman las políticas asociadas de manera correcta. Cabe destacar que como Ministerio de Obras Públicas se encargan de proyectar el flujo de carga y personas en el periodo 2020-2050 y como ministerio no piensan que existirá un cambio en la cultura de ocupación vehicular ni un cambio en la capacidad de carga desde un punto tecnológico.

Luego utilizando la siguiente formula se obtiene la actividad para el sector intrazonal (urbano):

$$Actividad[km] = \frac{Pasajeros - km [pas * km]}{Pasajeros por vehiculo[pas]}$$

$$Actividad[km] = \frac{Toneladas - km [ton * km]}{Toneladas por vehiculo[ton]}$$

3.1.6 Cálculo de emisiones.

Para el cálculo de emisiones se multiplica el factor de emisión correspondiente con la actividad de cada categoría:

$$Emisión[g] = Factor\ de\ Emisión \left[\frac{g}{km} \right] * Actividad[km]$$

Cabe destacar en este caso que se podría implementar el factor de deterioro basándose en la antigüedad de los vehículos según su norma y su ingreso al parque automotriz nacional. Sin embargo, Copert5

ingresa el factor de deterioro multiplicando la actividad realizada y como en este trabajo la actividad es entregada por un externo se prefiere no agregar ya que no se sabe qué nivel de incertidumbre se agrega al multiplicar la actividad.

3.2 Factores de emisión 2020-2050 en Chile.

Luego de realizar la condensación de la información reclasificando las categorías a las categorías entregadas por la actividad y reduciendo los datos de regional a nacional se obtienen las siguientes tablas de los factores de emisión para los años 2020-2050 en Chile con los que se obtendrán las emisiones de contaminantes.

a. Optimista

Tabla 18: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO2 Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	234	230	224	208	115	g/km.veh
		BUS	948	918	812	395	225	
		C2E	459	450	443	425	241	
		CM2	941	922	909	872	495	
	Interzonal	VL	190	186	182	173	95	
		BUS	589	590	591	570	344	
		C2E	403	400	398	383	218	
		CM2	603	590	582	560	331	

Tabla 19: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	1,13	0,52	0,27	0,21	0,11	g/km.veh
		BUS	2,30	2,27	1,14	0,46	0,21	
		C2E	1,01	0,98	0,64	0,41	0,24	
		CM2	2,11	2,09	0,92	0,41	0,17	
	Interzonal	VL	0,96	0,62	0,43	0,36	0,19	
		BUS	1,14	1,14	0,70	0,43	0,24	
		C2E	0,65	0,65	0,45	0,32	0,18	
		CM2	1,28	1,26	0,54	0,23	0,09	

Tabla 20: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH4 Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,0066	0,0033	0,0021	0,0019	0,0010	g/km.veh
		BUS	0,0749	0,0499	0,0198	0,0078	0,0034	
		C2E	0,0344	0,0224	0,0106	0,0067	0,0037	
		CM2	0,0708	0,0420	0,0139	0,0074	0,0033	
	Interzonal	VL	0,0044	0,0034	0,0031	0,0030	0,0016	
		BUS	0,0287	0,0208	0,0114	0,0073	0,0042	
		C2E	0,0116	0,0081	0,0042	0,0027	0,0015	
		CM2	0,0405	0,0258	0,0095	0,0055	0,0025	

Tabla 21: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	0,086	0,030	0,010	0,007	0,004	g/km.veh
		BUS	0,361	0,229	0,096	0,038	0,017	
		C2E	0,208	0,126	0,062	0,042	0,023	
		CM2	0,388	0,238	0,092	0,058	0,027	
	Interzonal	VL	0,044	0,020	0,009	0,007	0,004	
		BUS	0,166	0,125	0,075	0,053	0,030	
		C2E	0,079	0,046	0,022	0,016	0,009	
		CM2	0,163	0,100	0,040	0,026	0,013	

Tabla 22: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,0036	0,0022	0,0011	0,0008	0,0004	g/km.veh
		BUS	0,0493	0,0353	0,0143	0,0056	0,0024	
		C2E	0,0254	0,0179	0,0092	0,0055	0,0032	
		CM2	0,0534	0,0367	0,0123	0,0049	0,0019	
	Interzonal	VL	0,0053	0,0031	0,0014	0,0009	0,0004	
		BUS	0,0260	0,0207	0,0113	0,0067	0,0039	
		C2E	0,0171	0,0119	0,0057	0,0033	0,0019	
		CM2	0,0312	0,0214	0,0069	0,0026	0,0010	

Tabla 23: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
PM2.5	Intrazonal	VL	0,0120	0,0072	0,0037	0,0025	0,0013	g/km.veh
		BUS	0,1642	0,1176	0,0476	0,0187	0,0081	
		C2E	0,0848	0,0597	0,0308	0,0184	0,0106	
		CM2	0,1781	0,1225	0,0411	0,0163	0,0063	
	Interzonal	VL	0,0178	0,0104	0,0047	0,0029	0,0014	
		BUS	0,0868	0,0690	0,0377	0,0224	0,0132	
		C2E	0,0569	0,0395	0,0189	0,0109	0,0062	
		CM2	0,1040	0,0712	0,0230	0,0086	0,0032	

Tabla 24: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
NOX	Intrazonal	VL	0,39	0,35	0,31	0,28	0,15	g/km.veh
		BUS	8,57	7,58	3,50	1,41	0,61	
		C2E	4,07	3,81	2,35	1,45	0,83	
		CM2	8,70	8,17	3,38	1,41	0,56	
	Interzonal	VL	0,43	0,38	0,35	0,32	0,17	
		BUS	4,31	3,59	2,03	1,25	0,81	
		C2E	3,06	2,55	1,38	0,78	0,45	
		CM2	4,68	3,38	1,11	0,40	0,15	

b. Pesimista

Tabla 25: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO2 Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	234	230	224	211	160	g/km.veh
		BUS	948	918	804	428	319	
		C2E	459	450	440	429	332	
		CM2	941	922	904	895	826	
	Interzonal	VL	190	186	182	176	133	
		BUS	589	590	590	578	462	
		C2E	403	400	396	387	301	
		CM2	603	590	577	574	534	

Tabla 26: Factores de emisión por categoría y ámbito, CO Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	1,13	0,52	0,27	0,22	0,15	g/km.veh
		BUS	2,30	2,27	1,85	0,72	0,33	
		C2E	1,01	0,98	0,93	0,59	0,36	
		CM2	2,11	2,09	1,87	0,72	0,34	
	Interzonal	VL	0,96	0,62	0,44	0,37	0,26	
		BUS	1,14	1,14	1,05	0,59	0,34	
		C2E	0,65	0,65	0,64	0,43	0,27	
		CM2	1,28	1,26	1,13	0,42	0,19	

Tabla 27: Factores de emisión por categoría y ámbito, CH4 Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,0066	0,0033	0,0021	0,0019	0,0014	g/km.veh
		BUS	0,0749	0,0499	0,0198	0,0078	0,0037	
		C2E	0,0344	0,0224	0,0106	0,0067	0,0043	
		CM2	0,0708	0,0420	0,0139	0,0075	0,0054	
	Interzonal	VL	0,0044	0,0034	0,0031	0,0030	0,0022	
		BUS	0,0287	0,0208	0,0114	0,0073	0,0046	
		C2E	0,0116	0,0081	0,0042	0,0028	0,0018	
		CM2	0,0405	0,0258	0,0095	0,0056	0,0042	

Tabla 28: Factores de emisión por categoría y ámbito, VOC Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	0,086	0,030	0,010	0,007	0,005	g/km.veh
		BUS	0,361	0,229	0,093	0,036	0,019	
		C2E	0,208	0,126	0,060	0,041	0,027	
		CM2	0,388	0,238	0,086	0,057	0,045	
	Interzonal	VL	0,044	0,020	0,009	0,007	0,005	
		BUS	0,166	0,125	0,073	0,052	0,035	
		C2E	0,079	0,046	0,019	0,014	0,010	
		CM2	0,163	0,100	0,037	0,026	0,021	

Tabla 29: Factores de emisión por categoría y ámbito, BC Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,0036	0,0022	0,0011	0,0008	0,0005	g/km.veh
		BUS	0,0493	0,0353	0,0192	0,0074	0,0033	
		C2E	0,0254	0,0179	0,0117	0,0070	0,0042	
		CM2	0,0534	0,0367	0,0205	0,0075	0,0034	
	Interzonal	VL	0,0053	0,0031	0,0014	0,0009	0,0005	
		BUS	0,0260	0,0207	0,0145	0,0081	0,0047	
		C2E	0,0171	0,0119	0,0073	0,0043	0,0025	
		CM2	0,0312	0,0214	0,0117	0,0041	0,0018	

Tabla 30: Factores de emisión por categoría y ámbito, PM2.5 Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
PM2.5	Intrazonal	VL	0,0120	0,0072	0,0037	0,0025	0,0016	g/km.veh
		BUS	0,1642	0,1176	0,0641	0,0248	0,0111	
		C2E	0,0848	0,0597	0,0389	0,0233	0,0141	
		CM2	0,1781	0,1225	0,0684	0,0250	0,0114	
	Interzonal	VL	0,0178	0,0104	0,0047	0,0029	0,0017	
		BUS	0,0868	0,0690	0,0485	0,0271	0,0158	
		C2E	0,0569	0,0395	0,0243	0,0142	0,0085	
		CM2	0,1040	0,0712	0,0391	0,0138	0,0060	

Tabla 31: Factores de emisión por categoría y ámbito, NOX Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
NOX	Intrazonal	VL	0,39	0,35	0,32	0,29	0,21	g/km.veh
		BUS	8,57	7,58	5,46	2,15	0,96	
		C2E	4,07	3,81	3,42	2,10	1,28	
		CM2	8,70	8,17	6,94	2,55	1,15	
	Interzonal	VL	0,43	0,38	0,38	0,34	0,24	
		BUS	4,31	3,59	2,59	1,50	0,93	
		C2E	3,06	2,55	1,95	1,13	0,66	
		CM2	4,68	3,38	1,81	0,63	0,26	

3.3 Emisiones de contaminantes 2020-2050 en Chile.

Utilizando ambas metodologías presentadas para el ámbito intrazonal como el interzonal se obtienen las emisiones estimadas para las categorías definidas para los años 2017 el cual fue el año utilizado de base para los cálculos y 2050 el año final.

Tabla 32: Emisiones CO2 [kTon/año] 2017-2050

CO2 [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	7199	7199	13419	17173
	BUS	1779	1779	566	686
	C2E	961	961	1408	1776
	CM2	1970	1970	3107	4117
Intrazonal	VL	4677	4677	8393	9994
	BUS	1233	1233	705	782
	C2E	424	424	1033	1330
	CM2	0	0	0	0
Emisiones país		18244	18244	28630	35858

Tabla 33: Emisiones CO [kTon/año] 2017-2050

CO [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	27942	27942	10953	15641
	BUS	2886	2886	305	397
	C2E	877	877	100	920
	CM2	4242	4242	839	1683
Intrazonal	VL	19028	19028	5972	7062
	BUS	2117	2117	235	369
	C2E	803	803	772	1181
	CM2	0	0	0	0
Emisiones país		57894	57894	19175	27254

Tabla 34: Emisiones MP2.5 [kTon/año] 2017-2050

MP2.5 [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	202	202	140	148
	BUS	211	211	12	15
	C2E	74	74	19	26
	CM2	351	351	43	66
Intrazonal	VL	77	77	71	74
	BUS	153	153	12	15
	C2E	67	67	36	47
	CM2	0	0	0	0
Emisiones país		1135	1135	332	391

Tabla 35: Emisiones BC [kTon/año] 2017-2050

BC [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	0,08	0,08	0,11	0,11
	BUS	0,06	0,06	0,00	0,00
	C2E	0,02	0,02	0,00	0,01
	CM2	0,11	0,11	0,02	0,03
Intrazonal	VL	0,03	0,03	0,06	0,06
	BUS	0,05	0,05	0,01	0,01
	C2E	0,02	0,02	0,01	0,01
	CM2	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones país		0,38	0,38	0,21	0,23

Tabla 36: Emisiones NOx [kTon/año] 2017-2050

NOx [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	14107	14107	18479	25532
	BUS	1930	1930	561	632
	C2E	4522	4522	2541	3202
	CM2	15437	15437	1215	2204
Intrazonal	VL	6764	6764	8126	11119
	BUS	599	599	462	527
	C2E	3391	3391	3404	4862
	CM2	0	0	0	0
Emisiones país		46751	46751	34788	48078

Tabla 37: Emisiones CH4 [kTon/año] 2017-2050

CH4 [kTon]		2017		2050	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	0,14	0,14	0,15	0,22
	BUS	0,07	0,07	0,00	0,00
	C2E	0,02	0,02	0,00	0,01
	CM2	0,13	0,13	0,02	0,04
Intrazonal	VL	0,11	0,11	0,05	0,06
	BUS	0,07	0,07	0,00	0,00
	C2E	0,03	0,03	0,01	0,01
	CM2	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones país		0,57	0,57	0,25	0,34

Para poder validar el método se realiza la comparación con otros inventarios, el NDC 2016-2050 (Gobierno de Chile, 2020) y con un inventario realizado con COPERT 5 utilizando la misma metodología de tecnologías, pero con emisiones desagregadas por región, categoría vehicular. A continuación, se presenta una serie de gráficos comparando las emisiones que se proyectan en los inventarios descritos previamente:

Gráfico 11: Comparativa de emisiones CO2 [GTon/año] 2017-2050

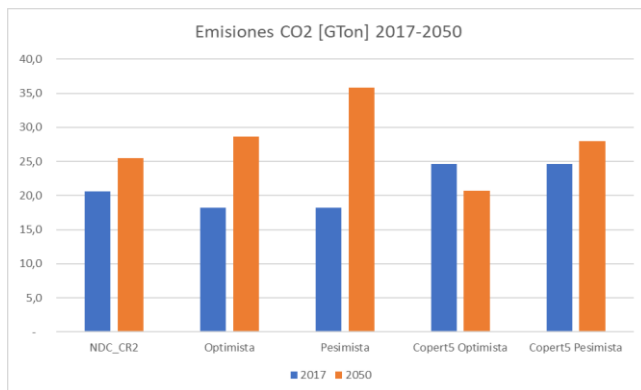


Gráfico 12: Comparativa de emisiones CO [kTon/año] 2017-2050

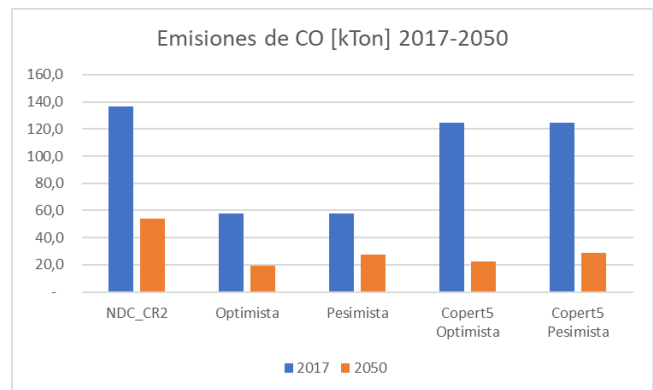


Gráfico 13: Comparativa de emisiones MP2.5 [kTon/año] 2017-2050

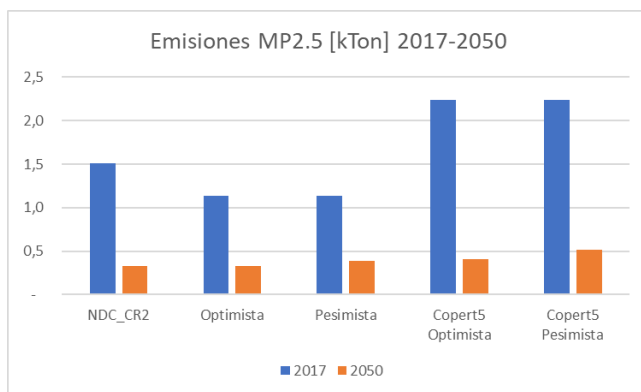


Gráfico 14: Comparativa de emisiones BC [kTon/año] 2017-2050

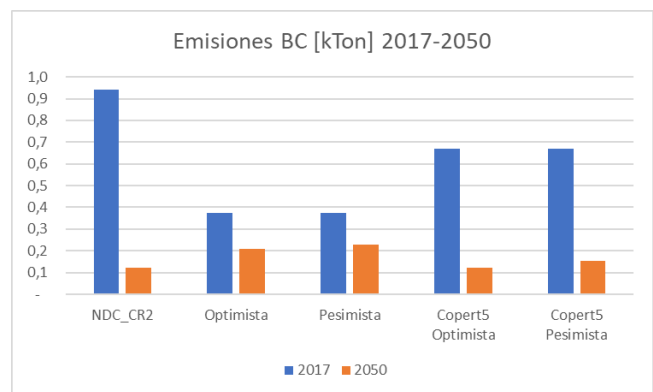


Gráfico 15: Comparativa de emisiones NOx [kTon/año] 2017-2050

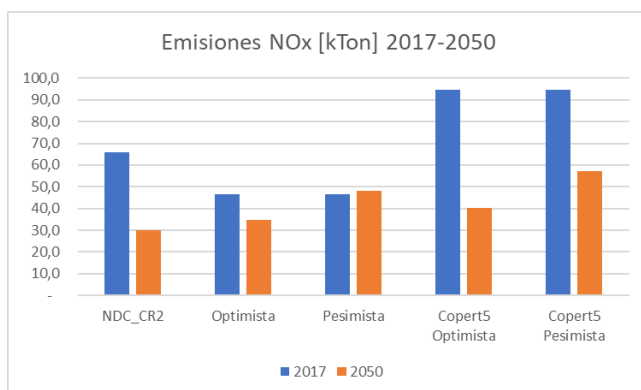
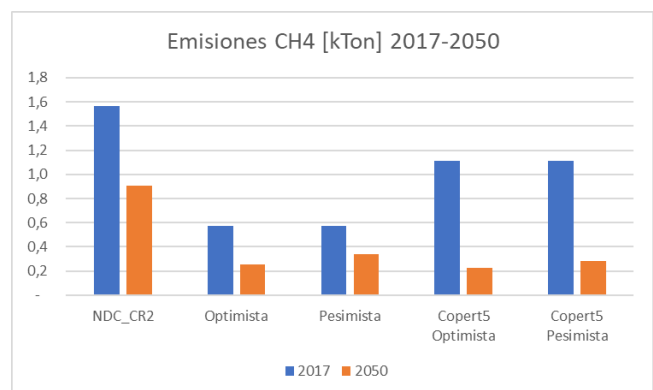


Gráfico 16: Comparativa de emisiones CH4 [kTon/año] 2017-2050



Primero se debe considerar que los tres inventarios tienen diferentes metodologías tanto para el cálculo de los factores de emisión como para la actividad que multiplica estos. Como se puede apreciar en los gráficos las diferencias entre los inventarios son mínimas (se mantienen en el mismo orden de magnitud y son consistentes respecto a los demás) y pueden atribuirse a diferentes valores de actividad proyectada. Dicho esto, se considera al método validado.

Habiendo construido así un método válido para obtener factores de emisión simples y fraccionados por año a partir de factores desagregados y específicos. Pudiendo así utilizar datos de actividad de fácil obtención sin perder la complejidad y detalle del parque automotriz nacional. Agregando diferentes variables específicas a categorías y tecnologías.

Luego de validar el método se procede a calcular las emisiones del periodo 2020-2050. Si bien solamente se tienen las actividades para los años 2017 y 2050 se sabe de parte de los que proyectaron la actividad que tiene un crecimiento lineal. De esta manera teniendo la actividad se confecciona una regresión de la actividad.

Gráfico 17: Regresión lineal de actividad 2017-2050

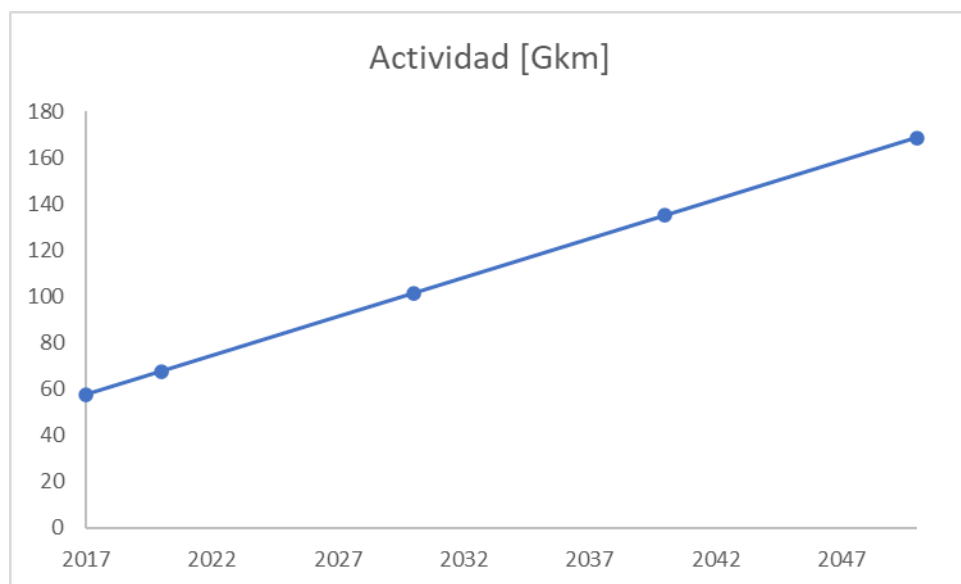


Tabla 38: Regresión de actividad 2017-2050

Actividad [Gkm]		2017	2020	2030	2040	2050
Interzonal	VL	32,0	38,1	58,4	78,6	98,9
	BUS	2,5	2,3	1,9	1,4	1,0
	C2E	1,3	1,5	2,0	2,6	3,1
	CM2	3,3	3,8	5,4	6,9	8,5
Intrazonal	VL	16,9	20,1	31,0	41,9	52,8
	BUS	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1
	C2E	0,8	1,0	1,8	2,5	3,3
	CM2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Con esta actividad y los factores de emisión se puede realizar el cálculo para ver la evolución durante los años de los contaminantes.

Utilizando la misma metodología se obtienen los resultados finales para cada escenario.

3.3.1 Emisiones por escenario

Teniendo ya los factores de emisión validados y la actividad generada se procede a calcular las emisiones por categoría, ámbito y escenario.

a. Optimista

Tabla 39: Emisiones de CO2 escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	3942	4627	6939	8710	6095	kTon/año
		BUS	873	863	818	425	258	
		C2E	364	458	783	1069	786	
		CM2	0	0	0	0	0	
	Interzonal	VL	6062	7092	10629	13635	9393	
		BUS	1455	1380	1119	827	345	
		C2E	524	586	800	977	676	
		CM2	1996	2232	3114	3878	2814	

Tabla 40: Emisiones de CO escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	19,0	10,5	8,4	9,0	6,0	kTon/año
		BUS	2,1	2,1	1,2	0,5	0,2	
		C2E	0,8	1,0	1,1	1,0	0,8	
		CM2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Interzonal	VL	30,7	23,7	25,2	28,3	19,1	
		BUS	2,8	2,7	1,3	0,6	0,2	
		C2E	0,8	0,9	0,9	0,8	0,6	
		CM2	4,2	4,8	2,9	1,6	0,8	

Tabla 41: Emisiones de CH4 escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,112	0,066	0,065	0,078	0,052	kTon/año
		BUS	0,069	0,047	0,020	0,008	0,004	
		C2E	0,027	0,023	0,019	0,017	0,012	
		CM2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Interzonal	VL	0,142	0,130	0,180	0,234	0,155	
		BUS	0,071	0,049	0,022	0,011	0,004	
		C2E	0,015	0,012	0,008	0,007	0,005	
		CM2	0,134	0,098	0,051	0,038	0,022	

Tabla 42: Emisiones de VOC escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	1,44	0,61	0,30	0,29	0,19	kTon/año
		BUS	0,33	0,22	0,10	0,04	0,02	
		C2E	0,17	0,13	0,11	0,11	0,08	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	1,41	0,76	0,55	0,57	0,38	
		BUS	0,41	0,29	0,14	0,08	0,03	
		C2E	0,10	0,07	0,04	0,04	0,03	
		CM2	0,54	0,38	0,22	0,18	0,11	

Tabla 43: Emisiones de BC escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	kTon/año
		BUS	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00	
		C2E	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	0,17	0,12	0,08	0,07	0,04	
		BUS	0,06	0,05	0,02	0,01	0,00	
		C2E	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
		CM2	0,10	0,08	0,04	0,02	0,01	

Tabla 44: Emisiones de MP2.5 escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
MP2.5	Intrazonal	VL	0,20	0,14	0,11	0,11	0,07	kTon/año
		BUS	0,15	0,11	0,05	0,02	0,01	
		C2E	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	0,57	0,40	0,27	0,22	0,14	
		BUS	0,21	0,16	0,07	0,03	0,01	
		C2E	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	
		CM2	0,34	0,27	0,12	0,06	0,03	

Tabla 45: Emisiones de NOX escenario optimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
NOX	Intrazonal	VL	6,6	7,0	9,5	11,6	7,7	kTon/año
		BUS	7,9	7,1	3,5	1,5	0,7	
		C2E	3,2	3,9	4,2	3,7	2,7	
		CM2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Interzonal	VL	13,7	14,5	20,4	25,4	17,0	
		BUS	10,6	8,4	3,9	1,8	0,8	
		C2E	4,0	3,7	2,8	2,0	1,4	
		CM2	15,5	12,8	5,9	2,8	1,3	

b. Pesimista

Tabla 46: Emisiones de CO2 escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	3942	4627	6943	8849	8427	kTon/año
		BUS	873	863	811	461	365	
		C2E	364	458	777	1080	1083	
		CM2	0	0	0	0	0	
	Interzonal	VL	6062	7092	10634	13839	13148	
		BUS	1455	1380	1117	838	465	
		C2E	524	586	797	989	932	
		CM2	1996	2232	3091	3973	4542	

Tabla 47: Emisiones de CO escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	19,0	10,5	8,5	9,1	7,9	kTon/año
		BUS	2,1	2,1	1,9	0,8	0,4	
		C2E	0,8	1,0	1,6	1,5	1,2	
		CM2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Interzonal	VL	30,7	23,7	25,9	29,1	25,4	
		BUS	2,8	2,7	2,0	0,8	0,3	
		C2E	0,8	0,9	1,3	1,1	0,8	
		CM2	4,2	4,8	6,0	2,9	1,7	

Tabla 48: Emisiones de CH4 escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,11	0,07	0,06	0,08	0,07	kTon/año
		BUS	0,07	0,05	0,02	0,01	0,00	
		C2E	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	0,14	0,13	0,18	0,24	0,22	
		BUS	0,07	0,05	0,02	0,01	0,00	
		C2E	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	
		CM2	0,13	0,10	0,05	0,04	0,04	

Tabla 49: Emisiones de VOC escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	1,44	0,61	0,30	0,29	0,24	kTon/año
		BUS	0,33	0,22	0,09	0,04	0,02	
		C2E	0,17	0,13	0,11	0,10	0,09	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	1,41	0,76	0,54	0,57	0,48	
		BUS	0,41	0,29	0,14	0,08	0,03	
		C2E	0,10	0,07	0,04	0,04	0,03	
		CM2	0,54	0,38	0,20	0,18	0,18	

Tabla 50: Emisiones de BC escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,061	0,043	0,034	0,032	0,026	kTon/año
		BUS	0,045	0,033	0,019	0,008	0,004	
		C2E	0,020	0,018	0,021	0,018	0,014	
		CM2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Interzonal	VL	0,171	0,119	0,082	0,068	0,051	
		BUS	0,064	0,048	0,028	0,012	0,005	
		C2E	0,022	0,017	0,015	0,011	0,008	
		CM2	0,103	0,081	0,063	0,029	0,015	

Tabla 51: Emisiones de MP2.5 escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
MP2.5	Intrazonal	VL	0,20	0,14	0,11	0,11	0,09	kTon/año
		BUS	0,15	0,11	0,06	0,03	0,01	
		C2E	0,07	0,06	0,07	0,06	0,05	
		CM2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Interzonal	VL	0,57	0,40	0,27	0,23	0,17	
		BUS	0,21	0,16	0,09	0,04	0,02	
		C2E	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	
		CM2	0,34	0,27	0,21	0,10	0,05	

Tabla 52: Emisiones de NOX escenario pesimista

Emisiones	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
NOX	Intrazonal	VL	6,6	7,0	10,1	12,2	10,9	kTon/año
		BUS	7,9	7,1	5,5	2,3	1,1	
		C2E	3,2	3,9	6,1	5,3	4,2	
		CM2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Interzonal	VL	13,7	14,5	21,9	26,8	24,0	
		BUS	10,6	8,4	4,9	2,2	0,9	
		C2E	4,0	3,7	3,9	2,9	2,1	
		CM2	15,5	12,8	9,7	4,3	2,2	

c. Gráficos

Gráfico 18: Emisiones de CO2 según escenario

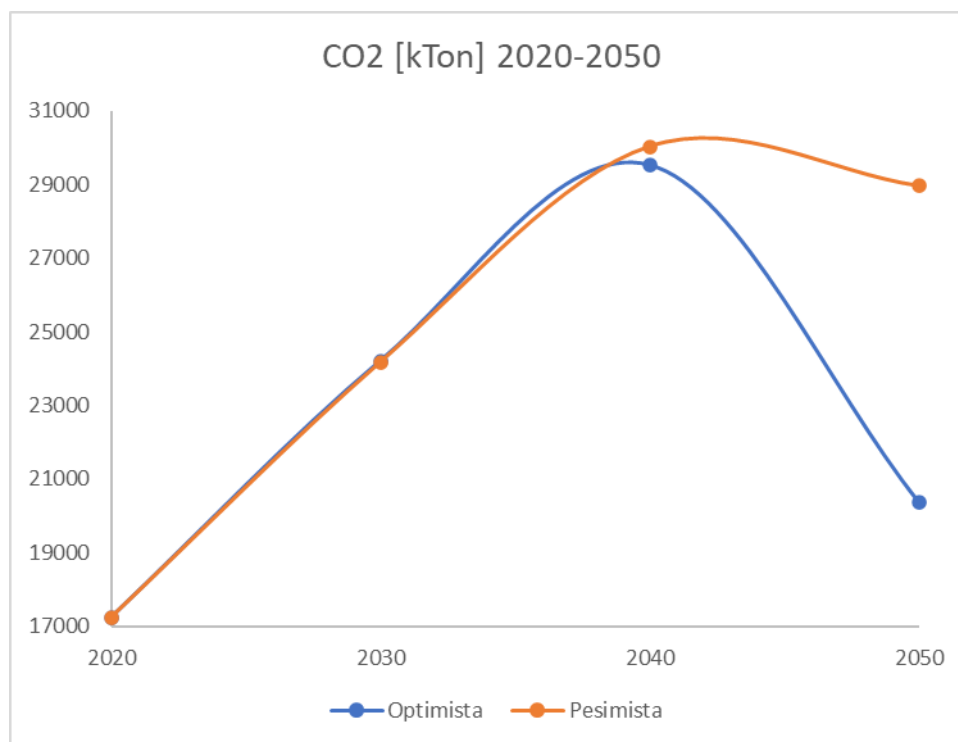


Gráfico 19: Emisiones de CO según escenario

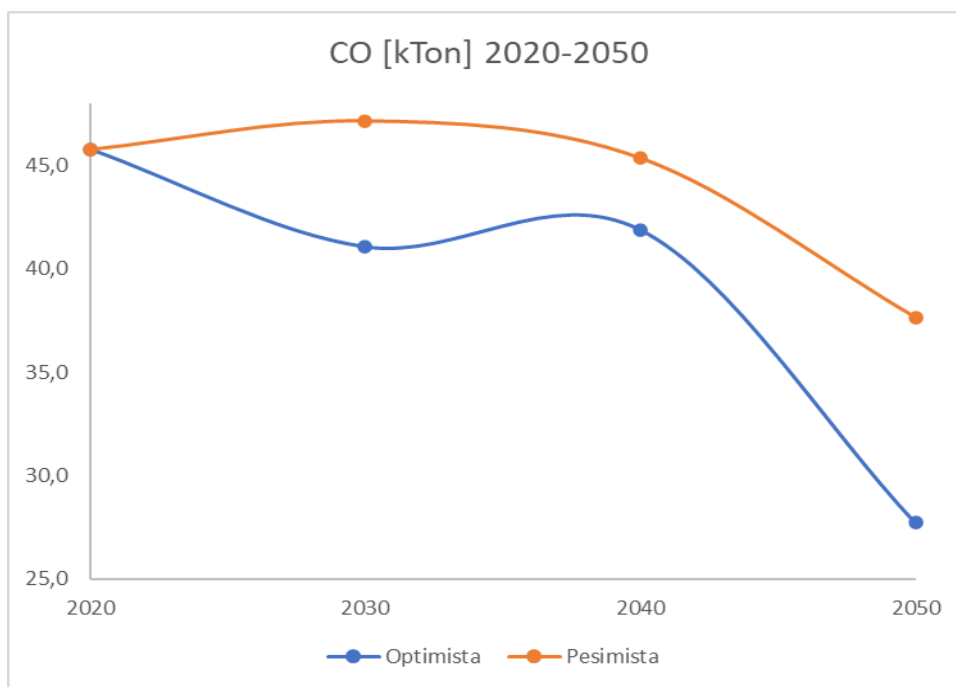


Gráfico 20: Emisiones de CH4 según escenario

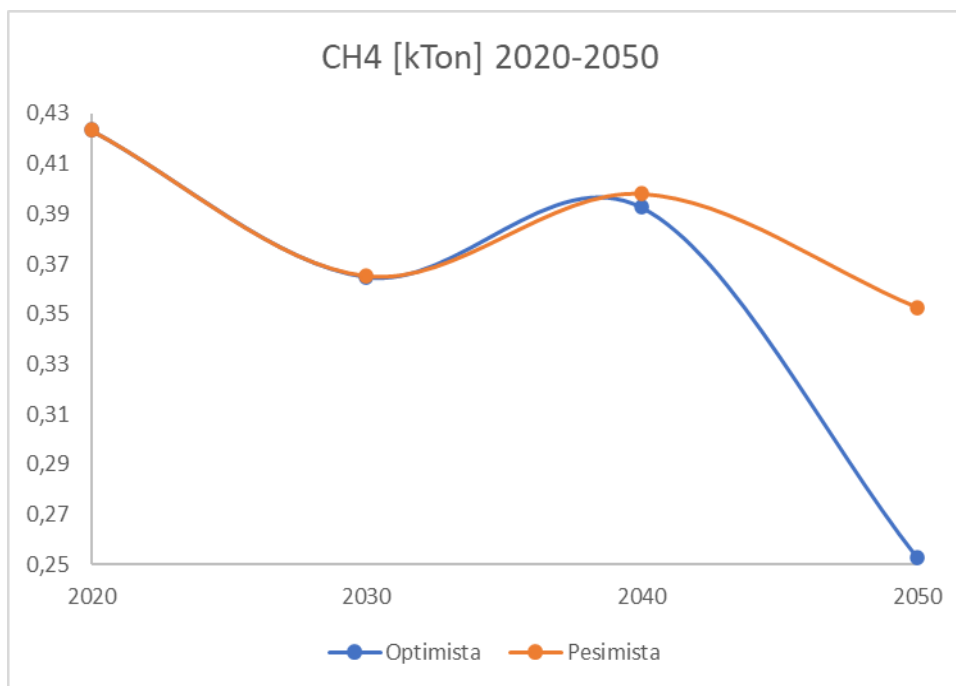


Gráfico 21: Emisiones de VOC según escenario

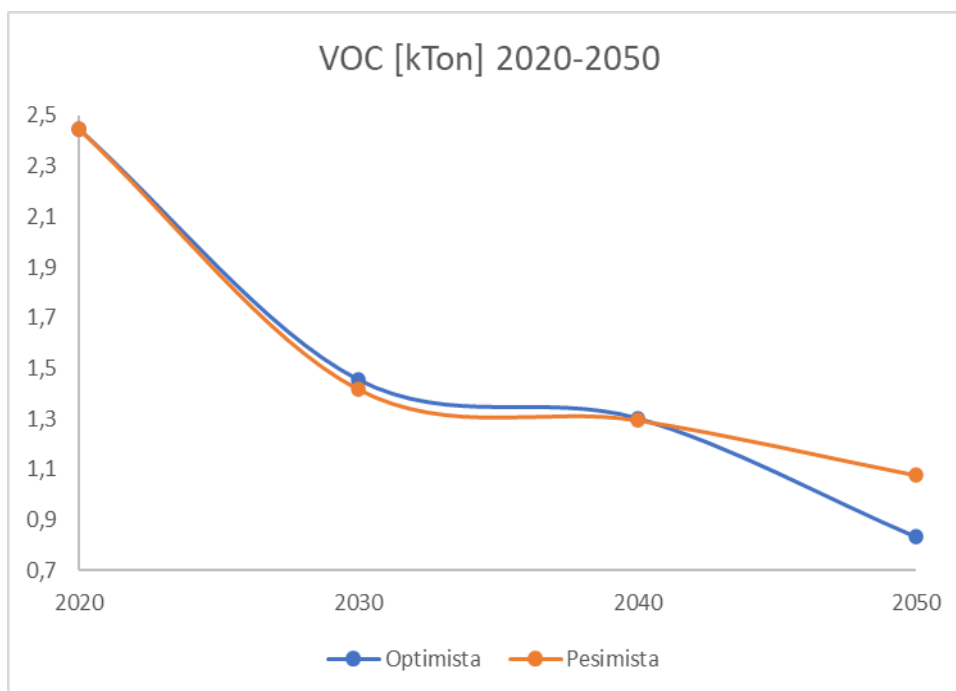


Gráfico 22: Emisiones de BC según escenario

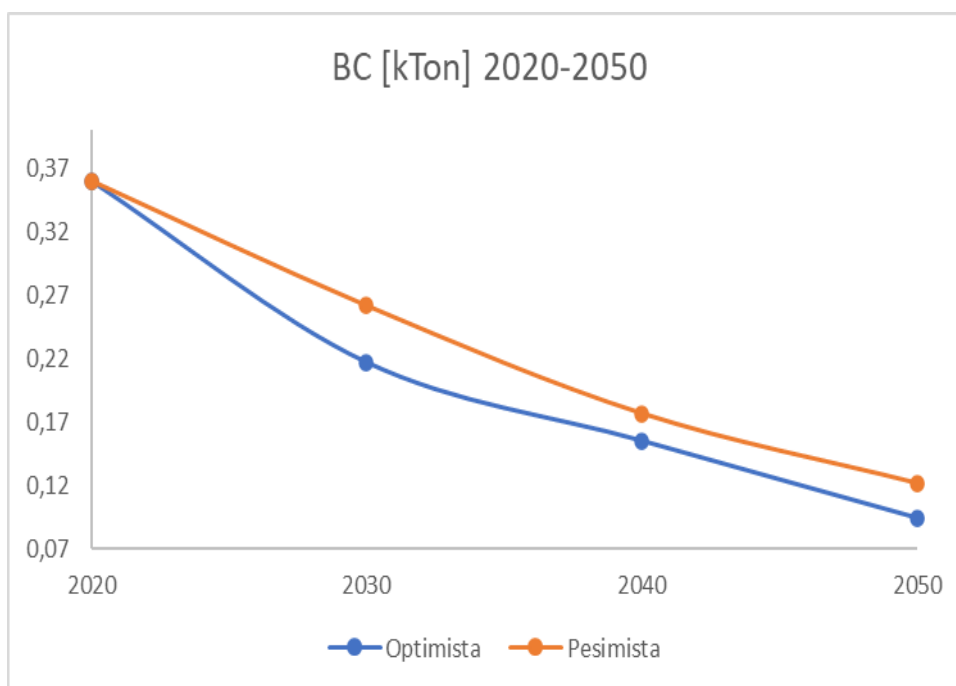


Gráfico 23: Emisiones de PM2.5 según escenario

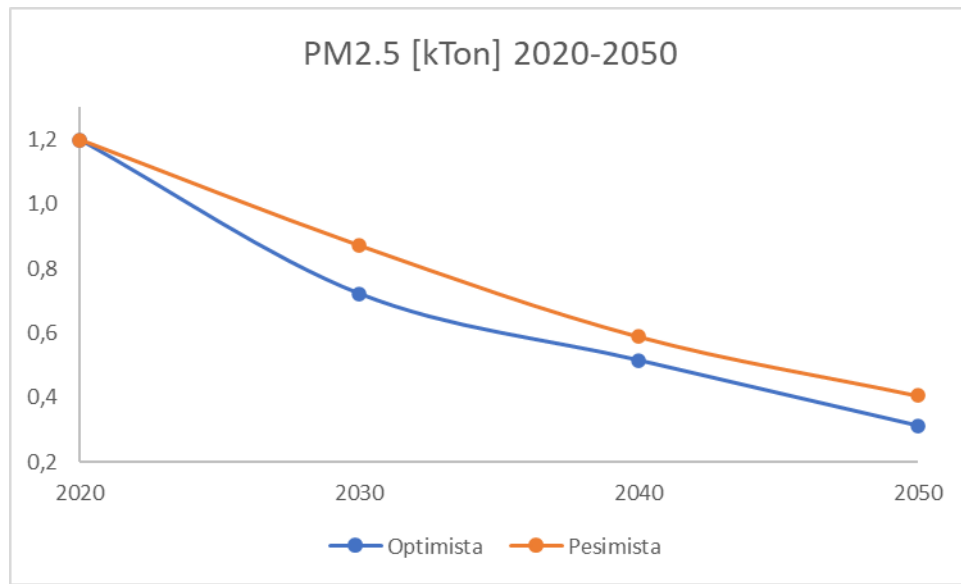
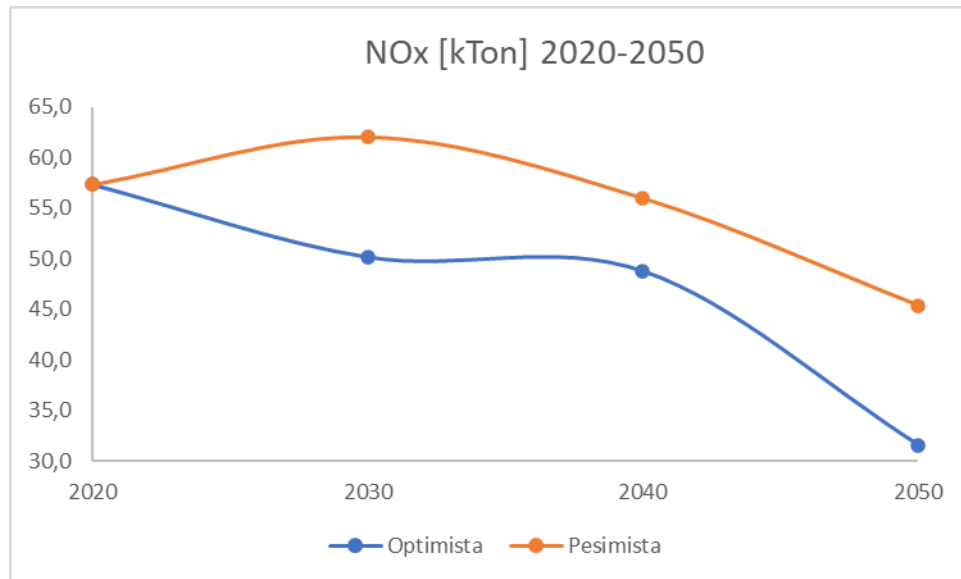


Gráfico 24: Emisiones de NOx según escenario



Se puede apreciar en los gráficos que la influencia de las medidas presentadas tanto tecnológicas como normativas influyen de manera significativa en las emisiones proyectadas para el 2050.

En el gráfico del CO2 podemos ver hasta que no se ingresan de manera agresiva los vehículos eléctricos en los vehículos particulares (2040) no existe una baja considerable en las emisiones totales, también se aprecia que la diferencia en el caso del CO2 es significativa entre los dos escenarios. Esto se repite también para el CO, pero con menor magnitud que en el caso del CO2.

En los gráficos de CO, BC, MP2.5 y NOx se puede apreciar la diferencia en la entrada de la normal E6/EVI ya que hasta que no ingresa dicha norma la curva de contaminantes no comienza a disminuir. Además, se puede ver en los dichos gráficos que existe otro punto de inflexión que es el momento de ingreso agresivo de la electromovilidad en los vehículos privados, en el caso del CH4 y el CO el aumento de actividad sobrepasa la disminución neta de contaminantes aumentando antes de descender al ingresar los vehículos eléctricos.

De esta manera se puede concluir que para la disminución considerable de emisiones de CO2 a nivel país se debe invertir en fomentar la electromovilidad en todos los tipos de vehículo ya que la norma E6/EVI no es factor de cambio en las emisiones. Sin embargo, para el caso de los contaminantes locales el ingreso de la norma E6/EVI si genera un cambio significativo, pero no suficiente a lo largo de los años debido a la creciente actividad vehicular proyectada para el país.

Finalmente, en los gráficos de CO2, CH4 y VOC se nota que las emisiones del escenario optimista son ligeramente superiores al escenario pesimista, esto se produce por las características de la norma E6/VI la cual permite emisiones ligeramente mayores que la norma E5/V en estos casos. Sin embargo, en los demás casos disminuye drásticamente la emisión.

Luego, para poder analizar la efectividad del plan se calcula la reducción de emisiones respecto a los escenarios.

Gráfico 25 Reducción de emisiones de CO2 [kTon/año]

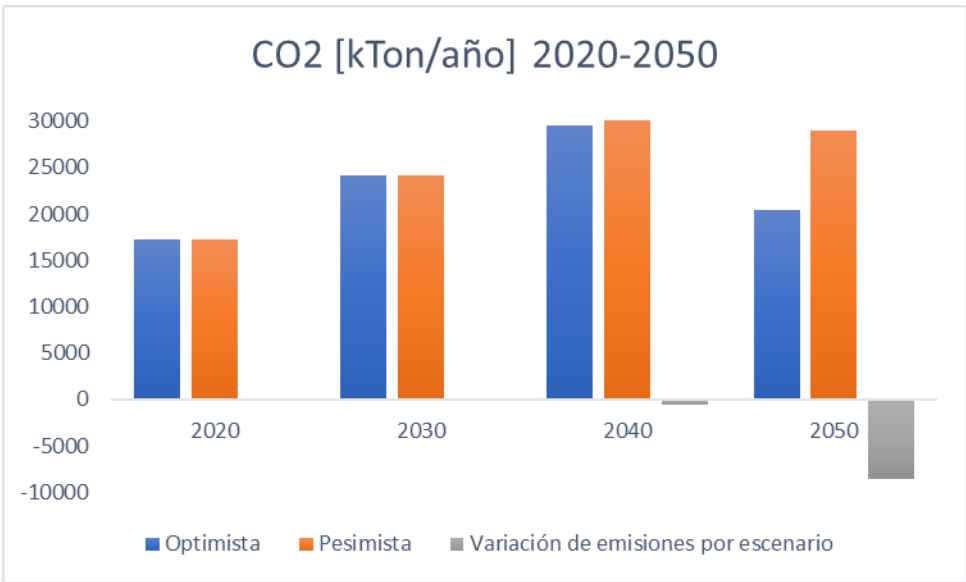


Gráfico 26 Reducción de emisiones de CO [kTon/año]

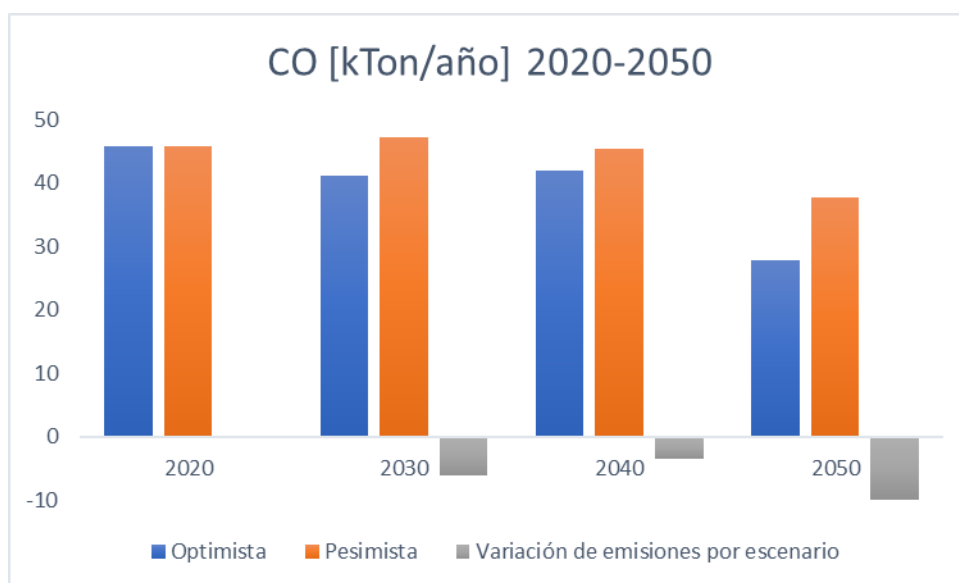


Gráfico 27 Reducción de emisiones de CH4 [kTon/año]

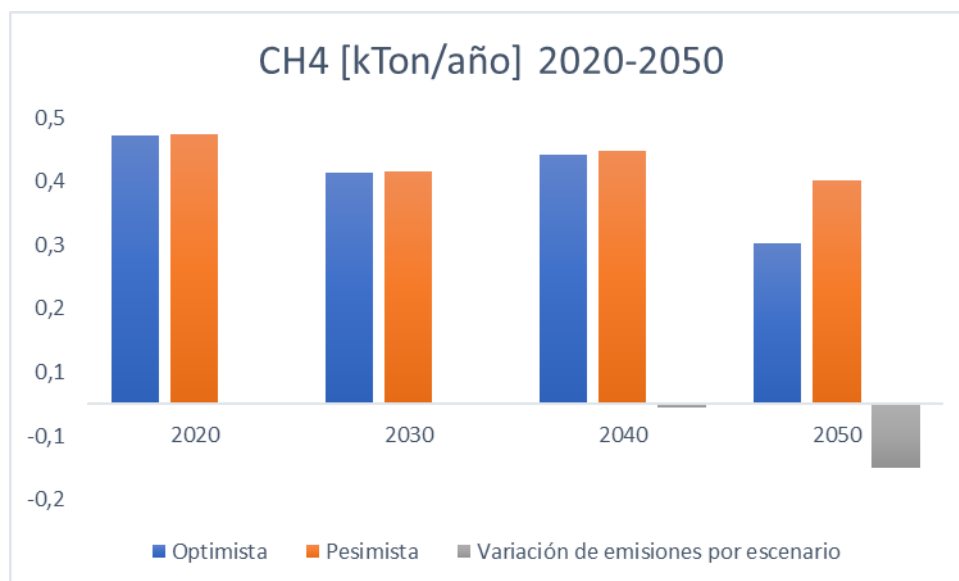


Gráfico 28 Reducción de emisión de VOC [kTon/año]

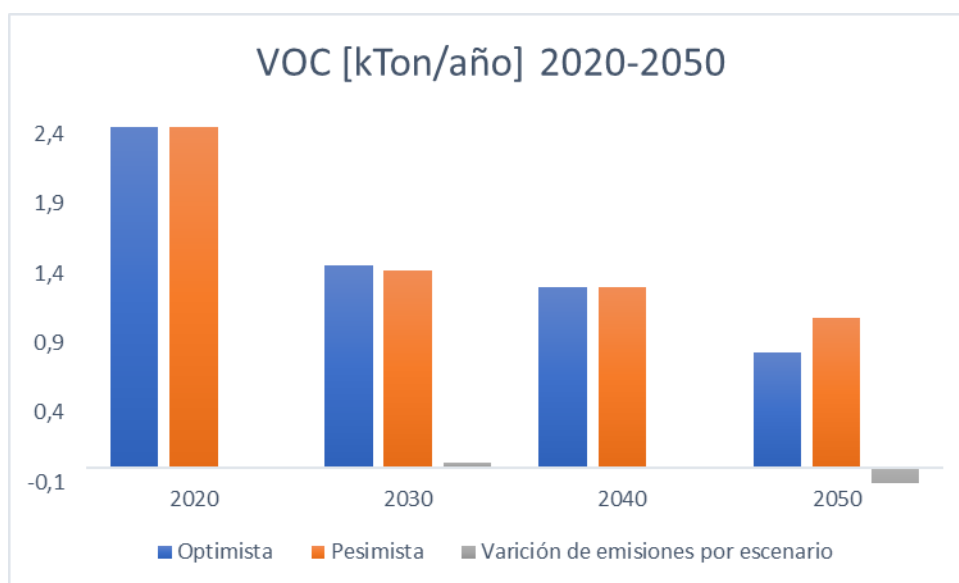


Gráfico 29 Reducción de emisión de BC [kTon/año]

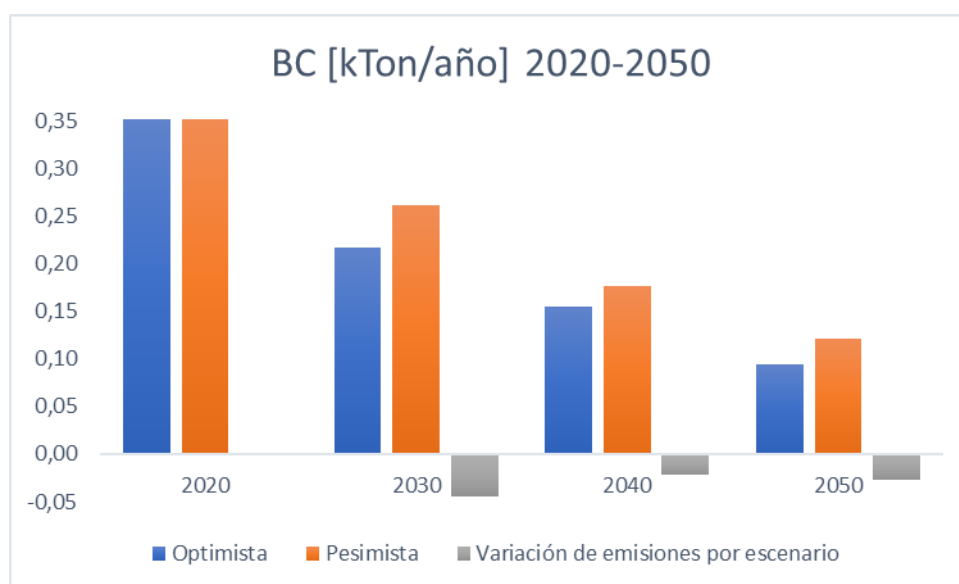


Gráfico 30 Reducción de emisiones de MP2.5 [kTon/año]

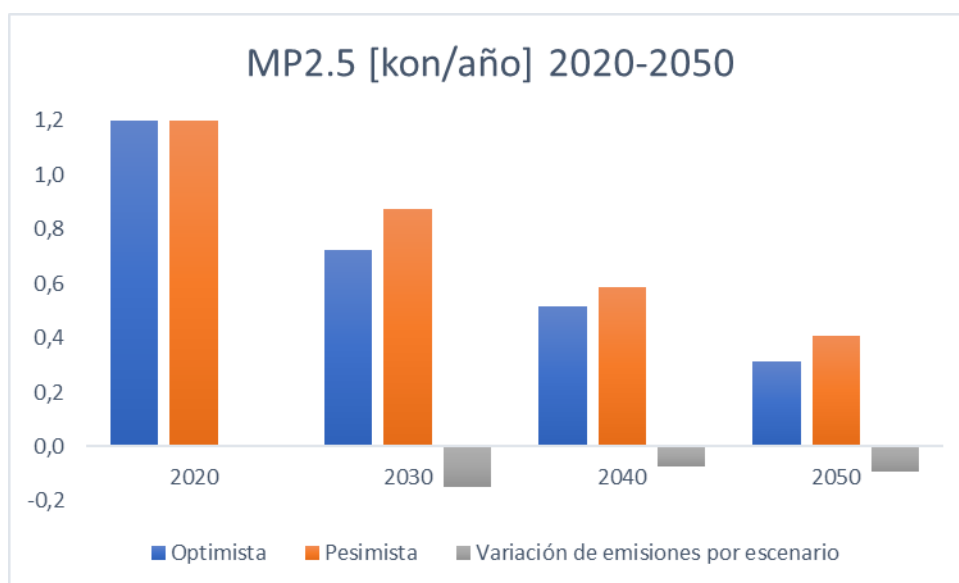


Gráfico 31 Reducción de emisiones de NOx [kTon/año]

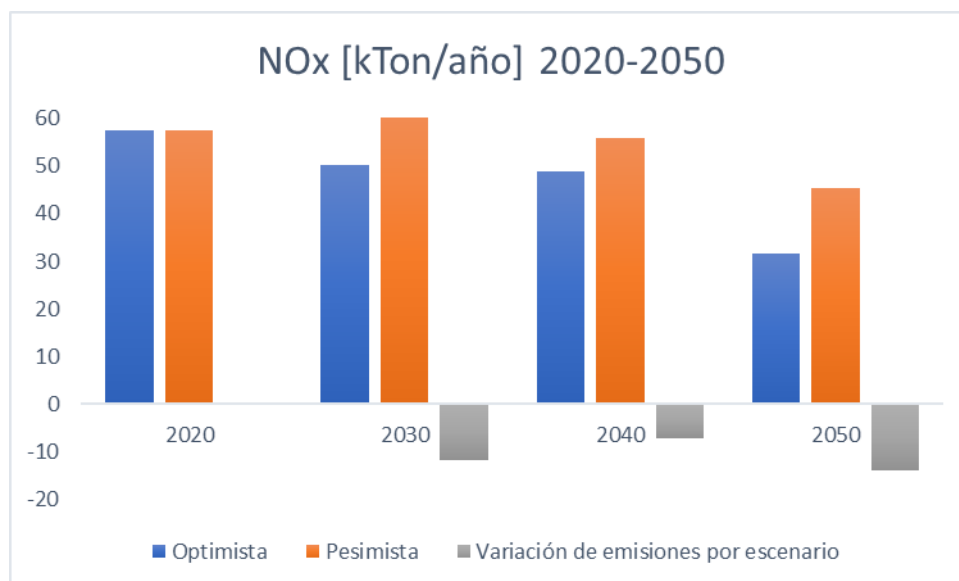


Tabla 53 Variación de emisiones por escenario

Variación de emisiones por escenario	2020	2030	2040	2050
CO2	0%	0%	-2%	-30%
CO	0%	-13%	-8%	-26%
CH4	0%	0%	-1%	-28%
VOC	0%	3%	1%	-23%
BC	0%	-17%	-12%	-23%
MP2.5	0%	-17%	-12%	-23%
NOx	0%	-19%	-13%	-30%

Como se muestra en los gráficos y la tabla la magnitud de la variación de emisiones debido a los escenarios es baja respecto a las emisiones totales. Se puede observar que para el CO2 la mayor reducción sucede el año 2050 con una diferencia de 8600 [kTon/año]

Tabla 54 Variación de emisiones por escenario

Contaminante	2020	2030	2040	2050
CO2	0%	0%	-2%	-30%
CO	0%	-13%	-8%	-26%
CH4	0%	0%	-1%	-28%
VOC	0%	3%	1%	-23%
BC	0%	-17%	-12%	-23%
MP2.5	0%	-17%	-12%	-23%
NOx	0%	-19%	-13%	-30%

Al revisar la tabla presentada se desprende que la reducción de emisiones respecto a los dos escenarios no supera el 30% para ninguno de los contaminantes. Donde el contaminante menos afectado por los diferentes escenarios es el VOC con una reducción del 23% el año 2050. De esta misma manera se puede apreciar tanto en la tabla como en los gráficos presentados que la mayor diferencia existe en el año 2050 ya que es el año estudiado donde existe la mayor brecha en porcentaje de vehículos eléctricos privados, 30% en el caso pesimista y 50% en el caso optimista.

Luego, para poder comparar las reducciones de emisiones con lo presentado en la NDC (Gobierno de Chile, 2020) se procede a calcular las emisiones de GEI en CO2 eq:

Tabla 55 CO2eq emitido por año y por escenario [kTon/año]

CO2eq	2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
Optimista	33574	34331	39157	44067	29783	[kTon/año]
Pesimista	33574	34332	42664	46718	42500	

Tabla 56 Variación de emisiones de CO2eq respecto al año 2017

CO2eq		2020	2030	2040	2050
Variación respecto al 2017	Optimista	2%	17%	31%	-11%
	Pesimista	2%	27%	39%	27%

Aquí se puede ver como la meta de reducir en un 30% las emisiones de GEI para el año 2030 respecto al año 2016 no se cumplen con los planes presentados, llegando un aumento del 17% de las emisiones en el mejor escenario. Esto se debe a que como ya se comentó previamente las emisiones de GEI en el sector transporte no se ven afectadas en gran magnitud por la introducción de la normativa E6/VI y no se proyecta el ingreso de vehículos eléctricos en masa hasta el año 2040, año en el cual comienza a disminuir las emisiones de GEI llegando hasta una reducción de 11% el año 2050 en el caso optimista.

De la misma manera que con el CO2eq se analiza el BC:

Tabla 57 BC emitido por año y por escenario [kTon/año]

BC	2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
Optimista	0,5	0,36	0,22	0,15	0,09	[kTon/año]
Pesimista	0,5	0,36	0,26	0,18	0,12	

Tabla 58 Variación de emisiones de BC respecto al año 2017

BC		2020	2030	2040	2050
Variación respecto al 2017	Optimista	-26%	-55%	-68%	-81%
	Pesimista	-26%	-46%	-64%	-75%

A diferencia del CO2eq el BC se puede apreciar una gran disminución respecto al año 2017 superando con creces la disminución del 25% presentada en la NDC. Si bien esta reducción solamente se aplica al sector transporte refleja que las medidas presentadas para las emisiones de BC cumplen con lo presentado internacionalmente.

3.3.2 Emisiones por categoría

Como en la sección anterior ya se presentaron las emisiones no se volverán a mostrar. Sin embargo, es de interés analizar las diferentes categorías y sus emisiones. Para este análisis se utilizará el escenario optimista debido a que representa de mejor manera el impacto de la electromovilidad.

Gráfico 32: Emisiones de CO2 por categoría Urbano

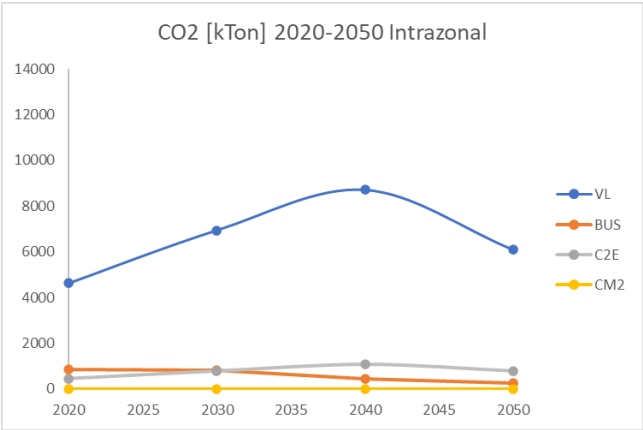


Gráfico 33: Emisiones de CO2 por categoría Interurbano

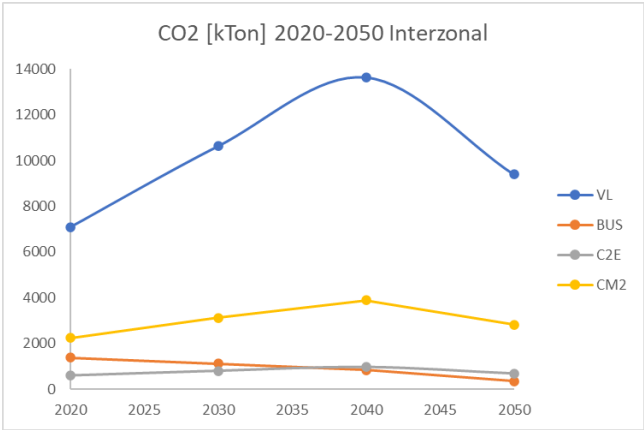


Gráfico 34: Emisiones de CO por categoría Urbano

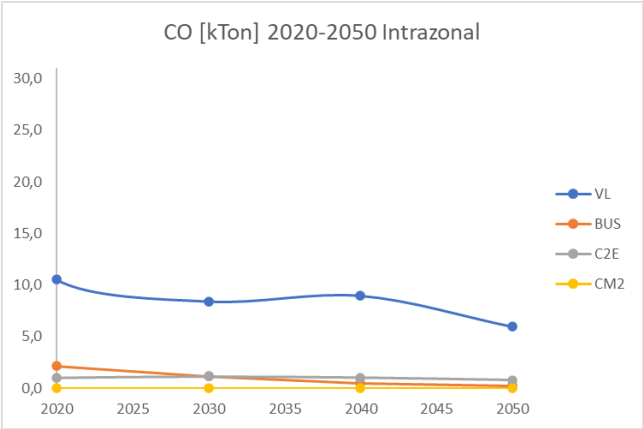


Gráfico 35: Emisiones de CO por categoría Interurbano

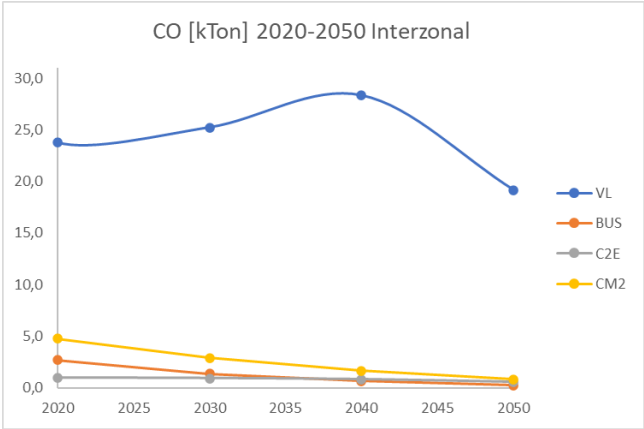


Gráfico 36: Emisiones de CH4 por categoría Urbano

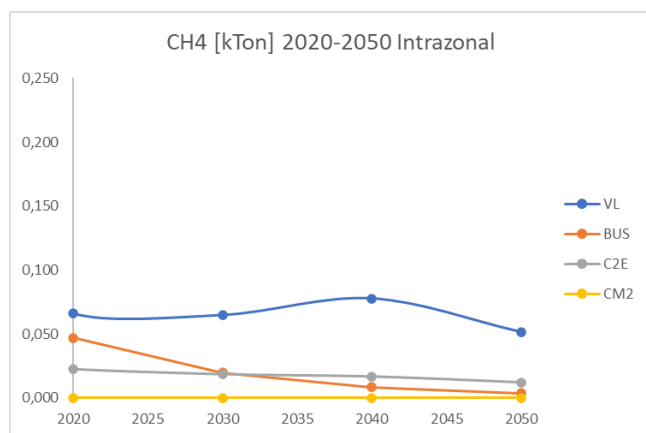


Gráfico 37: Emisiones de CH4 por categoría Interurbano

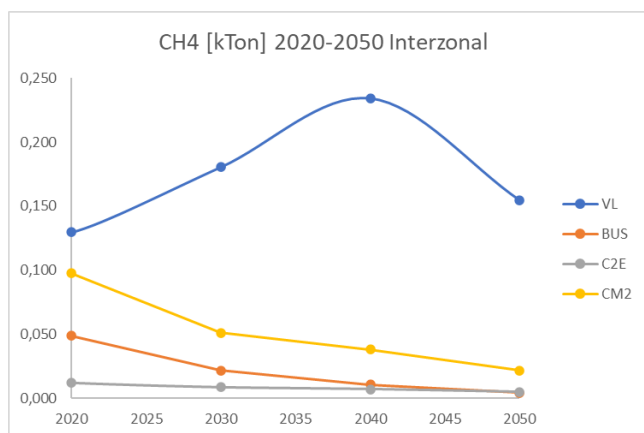


Gráfico 38: Emisiones de VOC por categoría Urbano

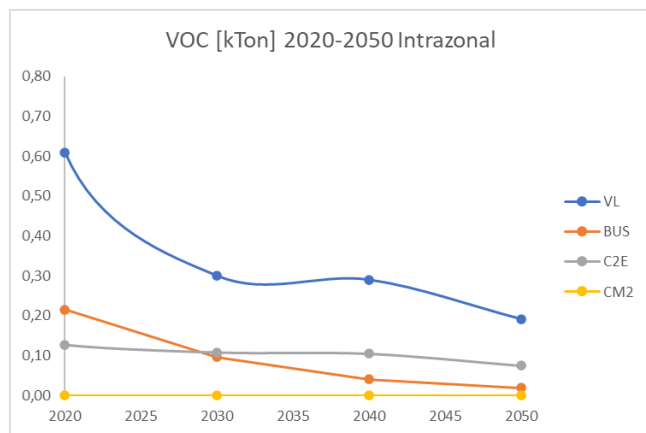


Gráfico 39: Emisiones de VOC por categoría Interurbano

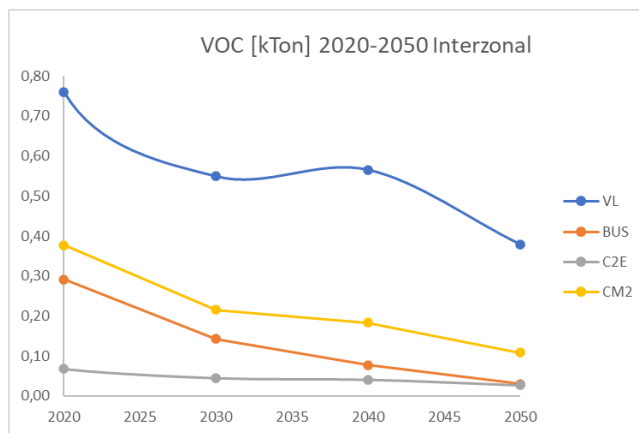


Gráfico 40: Emisiones de BC por categoría Urbano

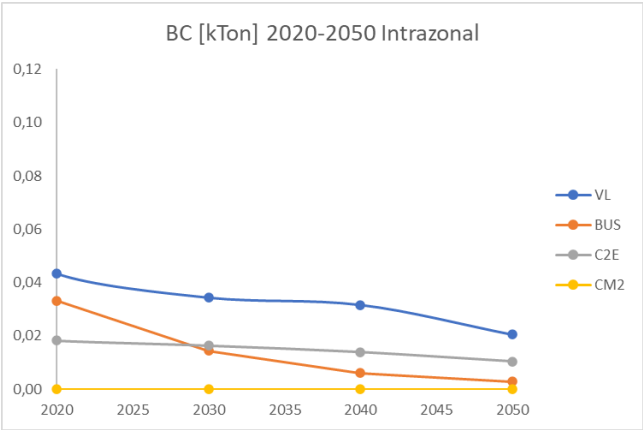


Gráfico 41: Emisiones de BC por categoría Interurbano

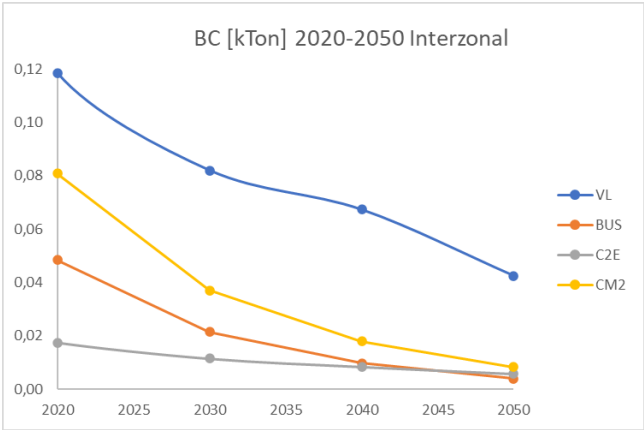


Gráfico 42: Emisiones de MP2.5 por categoría Urbano

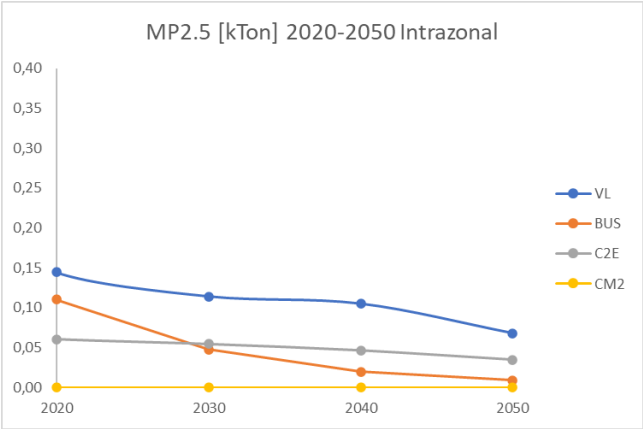


Gráfico 43: Emisiones de MP2.5 por categoría Interurbano

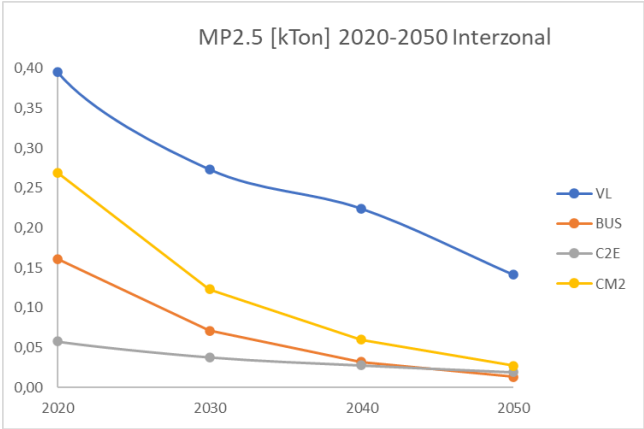


Gráfico 44: Emisiones de NOx por categoría Urbano

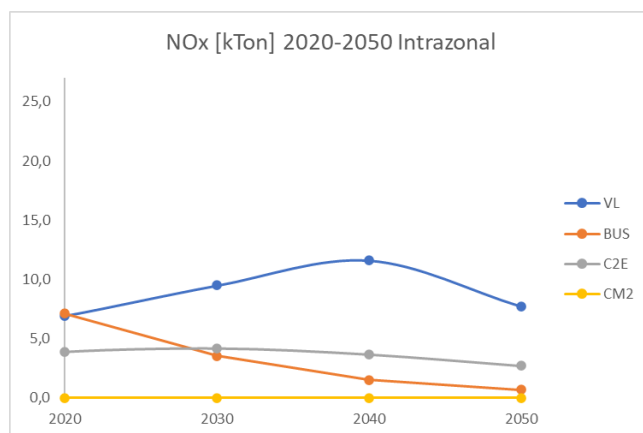
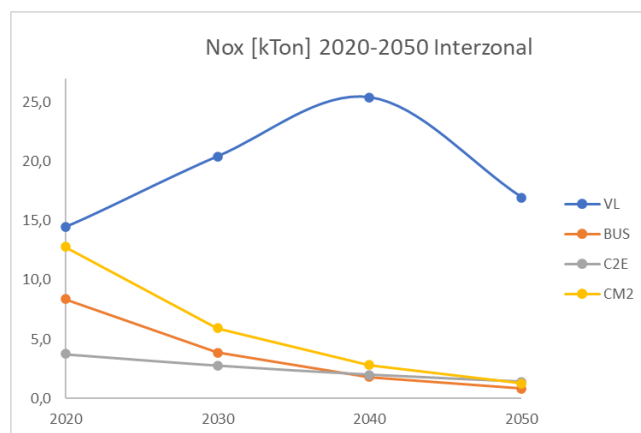


Gráfico 45: Emisiones de NOx por categoría Interurbano



A primera vista se aprecia que la principal fuente de emisiones, independiente del contaminante, proviene de los vehículos livianos. Lo que llevaría a pensar que el principal público de políticas públicas e incentivos para el recambio vehicular hacia la electromovilidad. Otra solución posible, debido a que como se puede ver comparativamente en los gráficos, es cambiar el modo de transporte interurbano. Esto debe ser compensado con un cambio de modo de transporte a uno más limpio o eficiente en términos de PKM (personas por kilómetro recorrido), ya sea bus, tren o vehículos livianos con mayor ocupación (vehículos compartidos).

También se puede ver en el gráfico interzonal o interurbano que la influencia del hidrógeno en los camiones pesados es suficiente para generar una curva descendente en el CO₂.

En el caso de la norma E6/EVI es efectiva en la mayoría de los casos exceptuando el CO₂ y el NO_x. Sin embargo, en el caso de los vehículos livianos para el CO y CH₄ se ve sobrepasada por el aumento de actividad sin poder empezar una curva descendente hasta el ingreso de la electromovilidad.

3.4 Conclusiones Capítulo 3

En el Capítulo 3 se utilizan las categorías y normas presentadas en el Capítulo 2 para que con la metodología COPERT 5 se obtengan factores de emisiones para cada uno de los contaminantes seleccionados (CO₂, CO, CH₄, VOC, BC, MP_{2.5} y NO_x).

Se obtiene un conjunto de factores de emisión para los dos escenarios en los cuales se ven representados los cambios tecnológicos y normativos que se proyectaron en el Capítulo 2, esto luego de reclasificar los vehículos respecto a las categorías descritas en la actividad que se recibió. Estos están representados en los años 2020, 2030, 2040 y 2050

Para poder realizar el cálculo de emisiones es requerido además de los factores de emisión, la actividad de cada vehículo. Al realizar un análisis a la actividad entregada es necesario destacar los

supuestos realizados para llegar a esta proyección. La proyección de actividad entregada asume un crecimiento de actividad lineal, asumiendo que no existirá un cambio de paradigma en los modos de transporte utilizados en el país. Esto se ve reflejado tanto en el número de actividad como en la tasa de ocupación que se mantiene constante al valor actual. Asumiendo así que no se adoptara ningún tipo de tecnología disruptiva de forma de tipos de movilidad.

Con los factores de emisión y la actividad se obtienen las emisiones proyectadas para los años 2017 (como año base) y 2050, esto se compara con diferentes inventarios y se considera que el método está validado debido a la consistencia de los resultados.

Una vez validado el método se procede a hacer una regresión de la actividad para poder utilizar los factores seccionados por décadas para poder así obtener una evolución de las emisiones durante el periodo para un mejor análisis.

Al obtener los resultados seccionados por décadas se obtiene que la diferencia de emisiones por escenario no supera el 30% de reducción de emisiones para ningún contaminante, estando la mayor brecha en el año 2050 donde existe una diferencia en los vehículos privados eléctricos de 20% de presencia, siendo 50% en el caso optimista. En el caso del CO₂ la diferencia entre escenarios para el año 2050 es equivalente a 8600 [kTon/año]. Por un lado, al analizar la variación respecto al año 2017 se concluye que para el caso del CO₂eq no se cumplen con las metas de la NDC (Gobierno de Chile, 2020) ya que para el año 2030 se tiene un aumento del 17-27% según escenario a diferencia de la disminución del 30% presentada. Por otro lado, en el caso del BC la NDC presenta una disminución del 25% al año 2030 la cual se cumple y se supera con una disminución del 46-55% al año 2030.

De manera cualitativa se puede concluir que en el caso de la norma E6/EVI es efectiva en la mayoría de los casos exceptuando el CO₂ y el NO_x. Sin embargo, en el caso de los vehículos livianos para el CO y CH₄ se ve sobrepasada por el aumento de actividad sin poder empezar una curva descendiente hasta el ingreso de la electromovilidad. Lo que vuelve a insinuar una necesidad de cambio mayor a nuevas tecnologías y normas, más enfocadas a los modos y métodos de transporte. Para el caso del CO₂, contaminante que es principal indicador de la participación en el calentamiento global, se ve que el cambio normativo no es suficiente para llegar a una disminución real. Se requiere un incentivo más grande y de mayor impacto a la electromovilidad, no solamente en términos de precio de vehículo sino en inversión de infraestructura y formación de cultura alrededor de los vehículos eléctricos, de no ser así la penetración de los vehículos eléctricos no será la suficiente para disminuir las emisiones de CO₂ del país.

Luego, se concluye a partir de los resultados que la mayoría de las emisiones independientes del contaminante son proporcionadas por los vehículos livianos. Esto debido a que su actividad es alta y no disminuye a lo largo del tiempo. Esto es algo que puede disminuir de varias maneras, se podría aumentar la ocupación vehicular a futuro o podría disminuir el uso de vehículos livianos para ciertos tipos de viajes. Notar también que la gran mayoría de vehículos livianos son privados por lo que los incentivos

para realizar un recambio tecnológico o normativo deben ser enfocados al usuario personal de vehículo a diferencia de lo que sucede con los buses.

Finalmente se observa que la mayor concentración de emisión de contaminantes está presente en la zona interurbana, debido a que la actividad es mayor. Como se consideró previamente para cambiar la actividad se necesita un cambio estructural a los modos de transporte, ya sea cambiando completamente el vehículo de transporte o aumentando su ocupación.

4. Conclusiones

En la siguiente sección se presentan las conclusiones del trabajo realizado y se dejan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

4.1 Conclusiones del trabajo

Se exploraron las metodologías y proyecciones utilizadas para el cálculo de emisiones de contaminantes vehiculares, eligiendo ahí COPERT 5 debido a la información de las características vehiculares que se tenían. Aprovechando así el detalle sobre la tecnología, norma, combustible y velocidades para los vehículos. Pudiendo abarcar todas las normas vehiculares chilenas, desde no catalítico o convencional pasando por Euro 1, 2, 3, 4, 5 hasta la implementación y adopción de la norma Euro 6.

Después de revisar la bibliografía y las normativas vehiculares chilenas se concluye que lo que más va a influir en la emisión de contaminantes en Chile durante el periodo 2020-2050 será el ingreso a mayor o menor escala de la electromovilidad de manera transversal en los vehículos terrestre en ruta del país y la adaptación e implementación de la norma Euro 6/VI. Se definen las metas del gobierno como eje para la penetración de la electromovilidad y se toma la promulgación de la norma Euro 6/VI como referencia de su ingreso y puesta en marcha en el país. Además, se utilizan las consideraciones sobre el uso de hidrógeno en los camiones pesados presente en el NDC para proyectar el uso de estos mismos.

Luego se concluye que para poder realizar un análisis comparativo se debe considerar dos escenarios que representan el que se consideró era el espectro de posibilidades respecto a las variables que consideramos influyen en la emisión de contaminantes y pueden ser manejadas en el modelo.

Optimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2023.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 50% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 50% al 2050.

Pesimista:

- Implementación Euro6/VI en Chile al 2030.
- Transporte público 100% eléctrico al 2040.
- Transporte privado 30% eléctrico al 2050.
- Camiones pesados a hidrógeno 10% al 2050.

Como se debió proyectar los años 2020 al 2050 se confeccionó una distribución tecnológica utilizando las disminuciones y aumentos históricos y el comportamiento de las tecnologías disruptivas en el mercado. Para ello se utilizan las categorías presentes en los decretos nacionales. Y para cada una de las categorías se produce una distribución tecnológica por región y escenario.

Se consigue realizar una serie de factores de emisión utilizando COPERT 5, uno para cada una de las categorías, región, norma y combustible seleccionados.

Al recibir la actividad a utilizar se concluye que es necesario transformar las categorías utilizadas a las categorías entregadas, teniendo así que realizar una ponderación de los vehículos en la flota para así obtener factores de emisión para los años 2017, 2020, 2030, 2040 y 2050.

Con los factores de emisión se obtienen las emisiones proyectadas para los años 2017 (como año base) y 2050, esto se compara con diferentes inventarios y se considera que el método está validado debido a la consistencia de los resultados.

Una vez validado el método se procede a hacer una regresión de la actividad para poder utilizar los factores seccionados por décadas para poder así obtener una evolución de las emisiones durante el periodo para un mejor análisis.

Al obtener los resultados seccionados por décadas se obtiene que la diferencia de emisiones por escenario no supera el 30% de reducción de emisiones para ningún contaminante, estando la mayor brecha en el año 2050 donde existe una diferencia en los vehículos privados eléctricos de 20% de presencia, siendo 50% en el caso optimista. En el caso del CO₂ la diferencia entre escenarios para el año 2050 es equivalente a 8600 [kTon/año]. Por un lado, al analizar la variación respecto al año 2017 se concluye que para el caso del CO₂eq no se cumplen con las metas de la NDC (Gobierno de Chile, 2020) ya que para el año 2030 se tiene un aumento del 17-27% según escenario a diferencia de la disminución del 30% presentada. Por otro lado, en el caso del BC la NDC presenta una disminución del 25% al año 2030 la cual se cumple y se supera con una disminución del 46-55% al año 2030.

De manera cualitativa se puede concluir que en el caso de la norma E6/EVI es efectiva en la mayoría de los casos exceptuando el CO₂ y el NO_x. Sin embargo, en el caso de los vehículos livianos para el CO y CH₄ se ve sobrepasada por el aumento de actividad sin poder empezar una curva descendiente hasta el ingreso de la electromovilidad. Lo que vuelve a insinuar una necesidad de cambio mayor a nuevas tecnologías y normas, más enfocadas a los modos y métodos de transporte. Para el caso del CO₂, contaminante que es principal indicador de la participación en el calentamiento global, se ve que el cambio normativo no es suficiente para llegar a una disminución real. Se requiere un incentivo más

grande y de mayor impacto a la electromovilidad, no solamente en términos de precio de vehículo sino en inversión de infraestructura y formación de cultura alrededor de los vehículos eléctricos, de no ser así la penetración de los vehículos eléctricos no será la suficiente para disminuir las emisiones de CO₂ del país.

Luego, se concluye a partir de los resultados que la mayoría de las emisiones independientes del contaminante son proporcionadas por los vehículos livianos. Esto debido a que su actividad es alta y no disminuye a lo largo del tiempo. Esto es algo que puede disminuir de varias maneras, se podría aumentar la ocupación vehicular a futuro o podría disminuir el uso de vehículos livianos para ciertos tipos de viajes. Notar también que la gran mayoría de vehículos livianos son privados por lo que los incentivos para realizar un recambio tecnológico o normativo deben ser enfocados al usuario personal de vehículo a diferencia de lo que sucede con los buses.

Finalmente se observa que la mayor concentración de emisión de contaminantes está presente en la zona interurbana, debido a que la actividad es mayor. Como se consideró previamente para cambiar la actividad se necesita un cambio estructural a los modos de transporte, ya sea cambiando completamente el vehículo de transporte o aumentando su ocupación.

4.2 Recomendaciones

Si se desea continuar con este trabajo o realizar un trabajo similar es necesario estar consciente de las mejoras y diferentes supuestos que se podrían realizar.

Desde un punto de vista metodológico se recomienda utilizar el factor de deterioro al calcular las emisiones, esto debido a que el uso deteriora a los vehículos causando mayor emisión de contaminantes para una misma actividad. En este trabajo no se considera por lo que se podría decir que las emisiones están subestimadas, sin embargo, como no se tenía claridad de la calidad de la actividad entregada se optó por no utilizar los factores de deterioro.

Continuando con lo anterior, es recomendable realizar una proyección propia de actividad donde se presenten los conceptos presentados en el Capítulo 1 realizando cambios de ocupación y proyectando un cambio de actividad hacia modos de transporte compartidos para poder comparar así el impacto de estos cambios en las emisiones.

Finalmente se recomienda actualizar los factores eléctricos a las tendencias actuales en términos de limpieza de la red eléctrica. Sin embargo, si se está realizando un inventario donde esté presente la generación de energía se requiere retirar los factores eléctricos del cálculo ya que se estaría considerando dos veces en el inventario general.

5. Bibliografía

- BloombergNEF. (2019). Electric Vehicle Outlook 2019. *BloombergNEF*.
- Bond, T. (2013). Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.
- Byungruyong, K., Hojoong, K., Chmoon, H., & Chuhwan, Y. (1996). A DEMAND-BASED MODEL FOR FORECASTING INNOVATION DIFFUSION. *Pergamon*.
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovaator's Dilemma*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.
- Comisión Nacional de Energía. (2020, Septiembre 29). *Energía Abierta*. Retrieved from [energiaabierta.cl: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/](http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/)
- Department for Transport. (2019). *Future of Mobility: Urban Strategy*. London: Department for Transport.
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC Guildelines for National Greenouse Gas Inventories*. Japan: IGES.
- European Enviroment Agency. (2016). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016*. Copenhagen: European Enviroment Agency.
- European Enviroment Agency. (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. Copenhagen: European Enviroment Agency.
- Farías, F., & Mager, J. (2016). *Segundo Informe Bienal de Actualización de Chile*. Ministerio de Media Ambiente.
- Gallardo, L., Basoa, K., Tolvett, S., Osses, M., Bustos, S., Barraza, J., & Ogaz, G. (2020). *Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Informe extendido y anexos*. Centro de Ciencia del Clima y la Resilencia para el Ministerio del Medio Ambiente a través de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la iniciativa Supporting National Action and Planing on Short-Lived Climate Pollutants.
- Gobierno de Chile. (2015). *Contribución nacional tentativa de chile (INDC) para el acuerdo climático París 2015*. Santiago de Chile: Gobierno de Chile.
- Gobierno de Chile. (2018). *Ruta Energética 2018-2022*. Gobierno de Chile.
- Gobierno de Chile. (2019). *Contribución Determinada a nivel Nacional de Chile*. Gobierno de Chile.
- Gobierno de Chile. (2020). *Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) de Chile: Actualización 2020*. Santiago de Chile: Gobierno de Chhile.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Parque de Vehículos en Circulación, 2017*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas.
- Meyer, G., & Shaheen, S. (2017). *Disrupting Mobility: Impacts of Shareing Economy and Innovaative Transportation on Cities*. Berlin, Germany: Springer.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (2017). *Plan de mitigación de gases de efencto invernaadero para el sector energía*.

- Ministerio de Energía; Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2018). *Generación de simulaciones de transporte a nivel estratégico para el proyecto RETC, Etapa VII*. Santiago: República de Chile.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2020, Septiembre 29). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Retrieved from bcn.cl: <http://bcn.cl/2fd6i>
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2020, Septiembre 29). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Retrieved from bcn.cl: <http://bcn.cl/2lbuv>
- others, T. B. (2013). Bounding the Role of Black Carbon in thhe Climate System: A Scientific Assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.
- Tan, Z. (2014). *Air Pollution and Greenhouse Gases*. Waterloo: Department of Mechanical and Mechhatronic Engineering.
- Wilson, C. (2017). Disruptive low-carbon innovations. *Energy Research & Social Science*.
- Wilson, C., Pettifor, H., Cassar, E., Kerr, L., & Wilson, M. (2018). The potential contribution of disruptive low-carbon innovations to 1.5°C climate mitigation. *Energy Efficiency*.

6. Anexo

6.1 Datos históricos distribución tecnológica

a. Urbano

Gráfico 46: R13 BUS ART URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: BUS ART - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

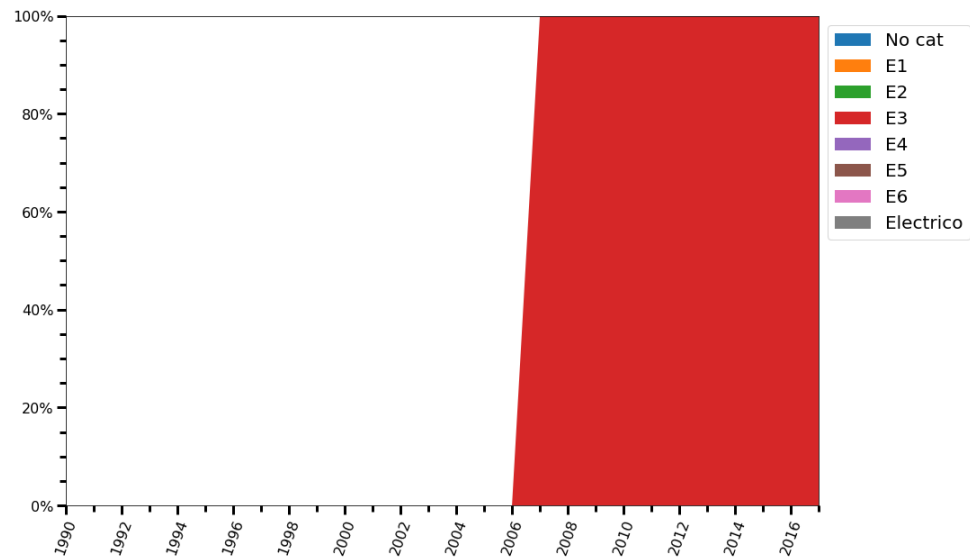


Gráfico 47: R13 BUS RIG URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: BUS RIG - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

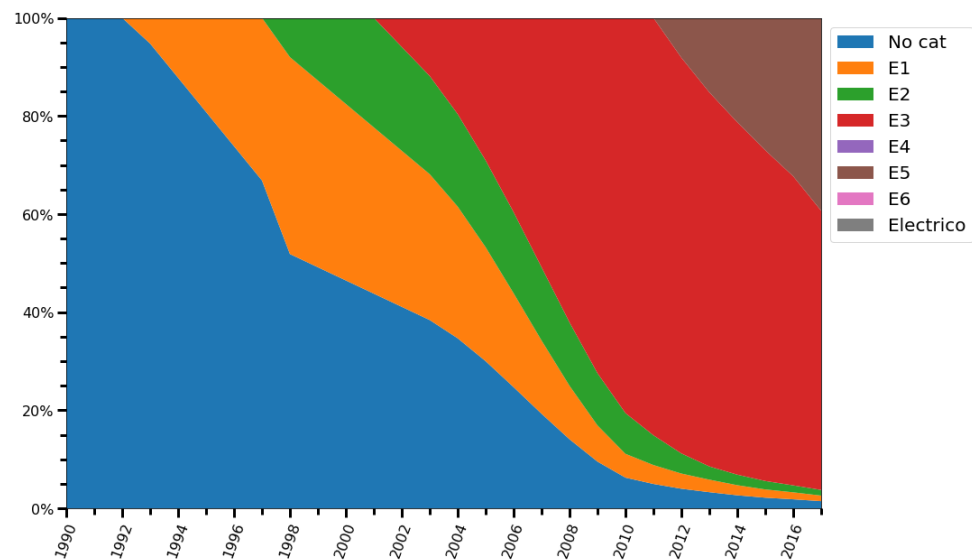


Gráfico 48: R13 CAM LIV URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

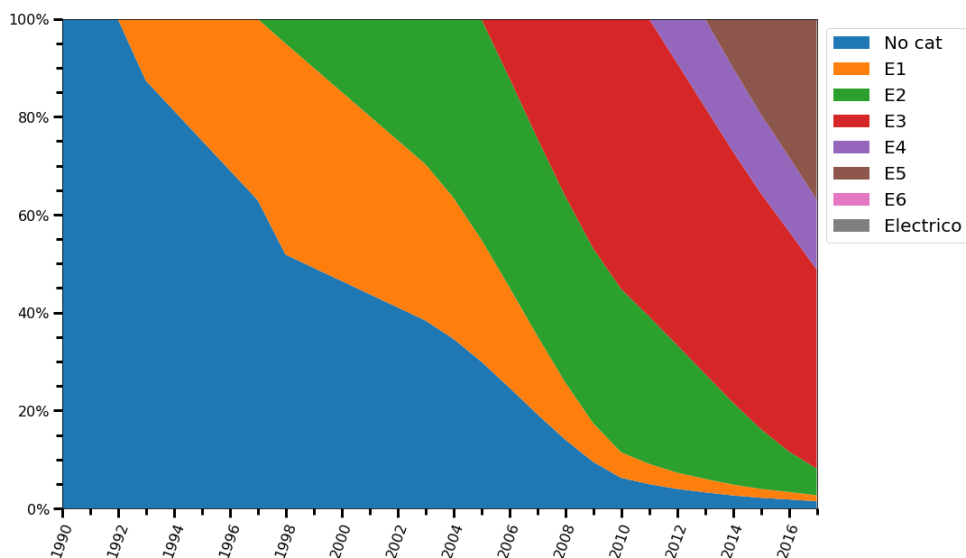


Gráfico 49: R13 CAM MED URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

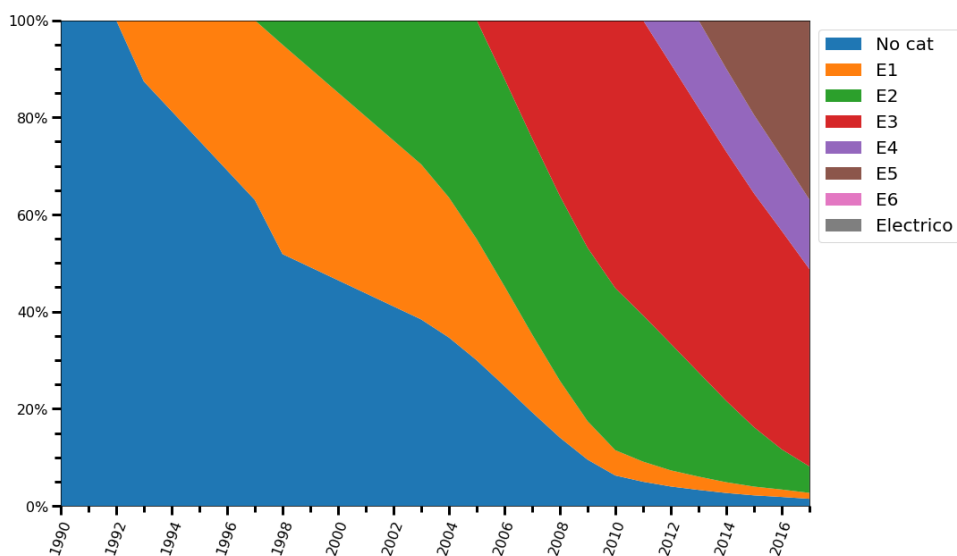


Gráfico 50: R13 CAM PES URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

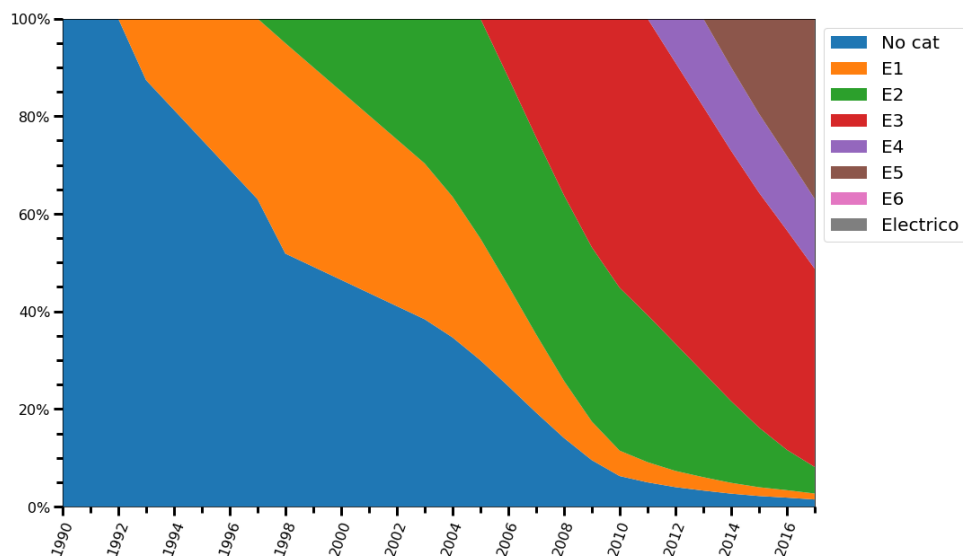


Gráfico 51: R13 TAX URBANO GASOLINA

Región: R13 - Categoría: TAX - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

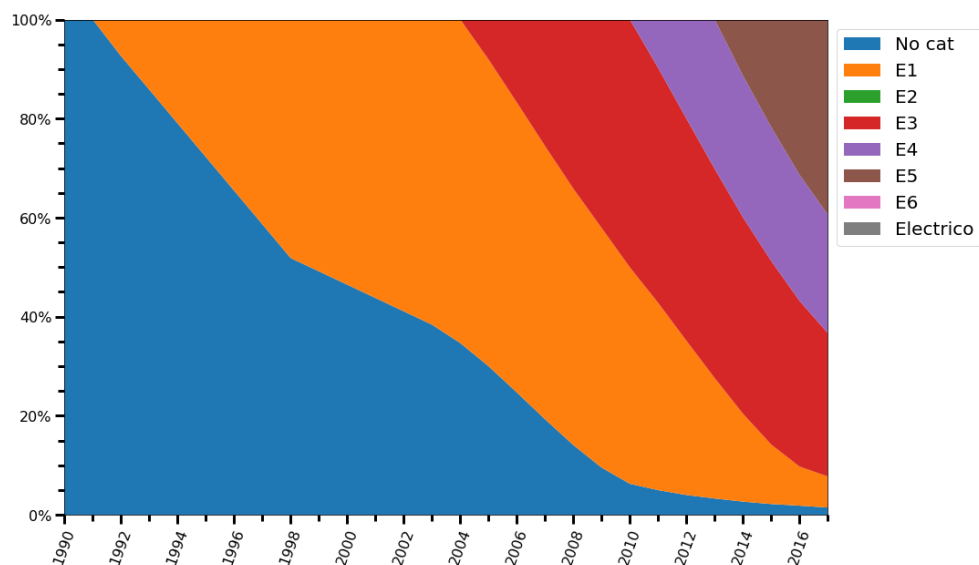


Gráfico 52: R13 VLC URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

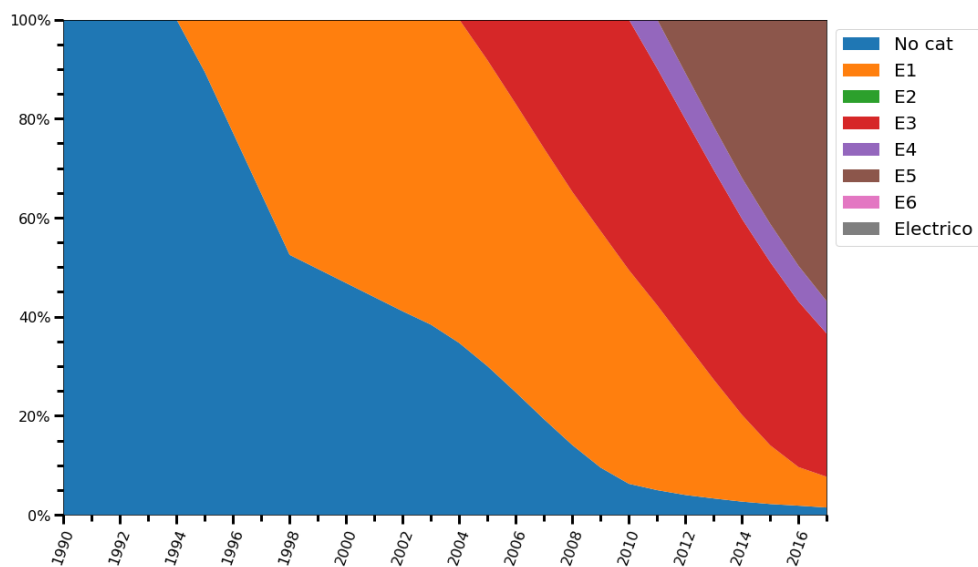


Gráfico 53: R13 VLC URBANO GASOLINA

Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

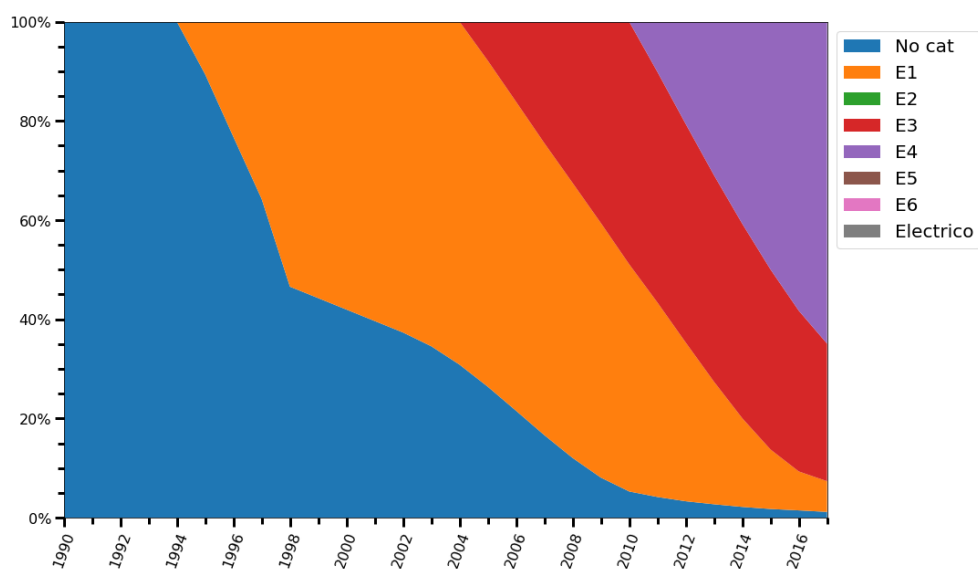


Gráfico 54: R13 VLP URBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

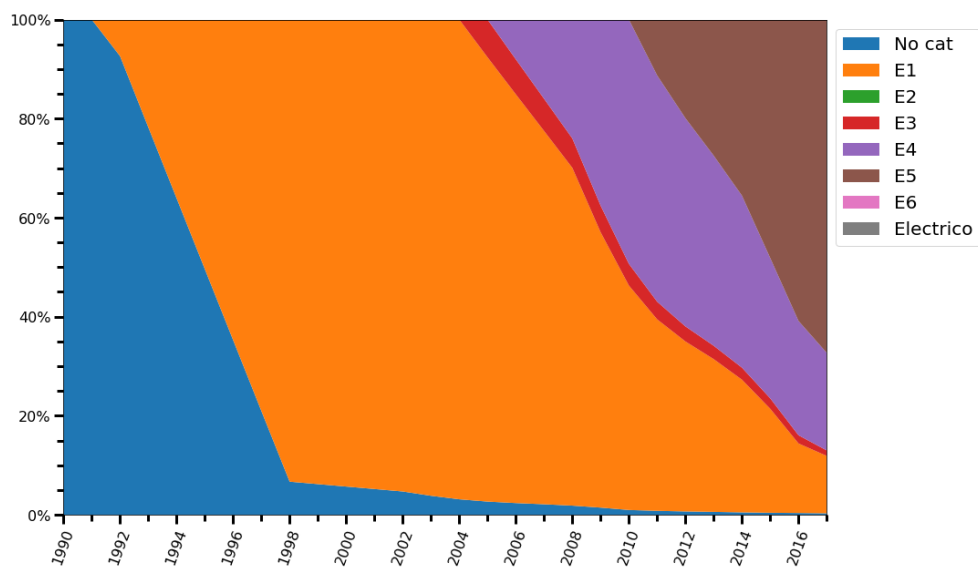
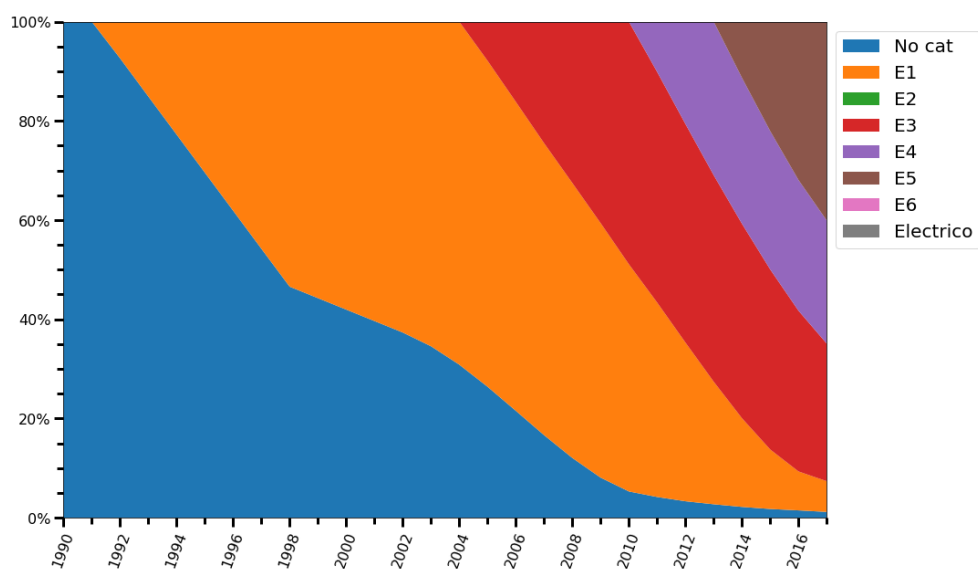


Gráfico 55: R13 VLP URBANO GASOLINA

Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina



b. Interurbano

Gráfico 56: R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: BUS INT PROV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

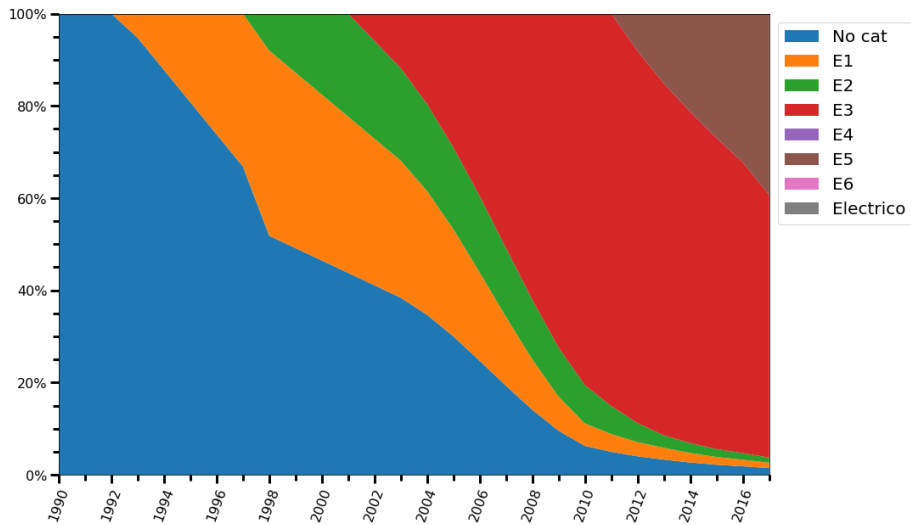


Gráfico 57: R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

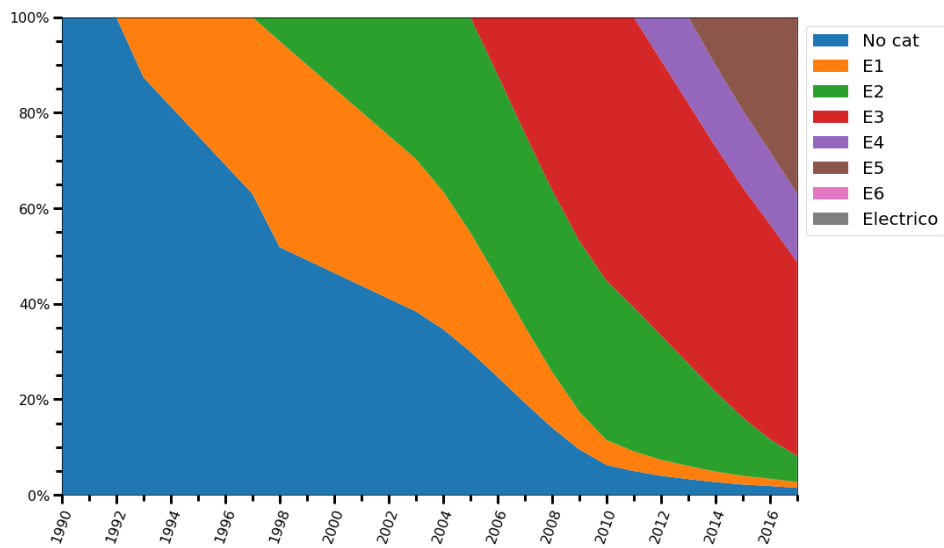


Gráfico 58: R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

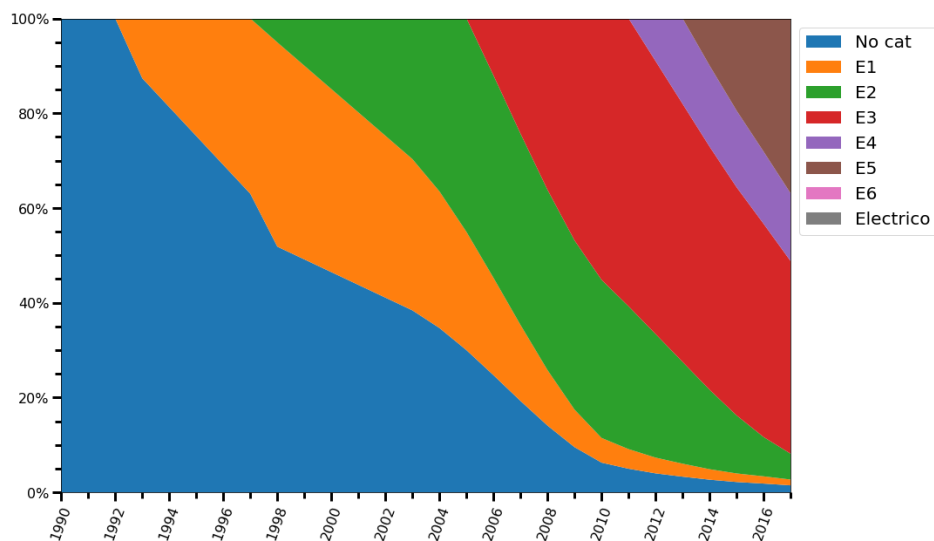


Gráfico 59: R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

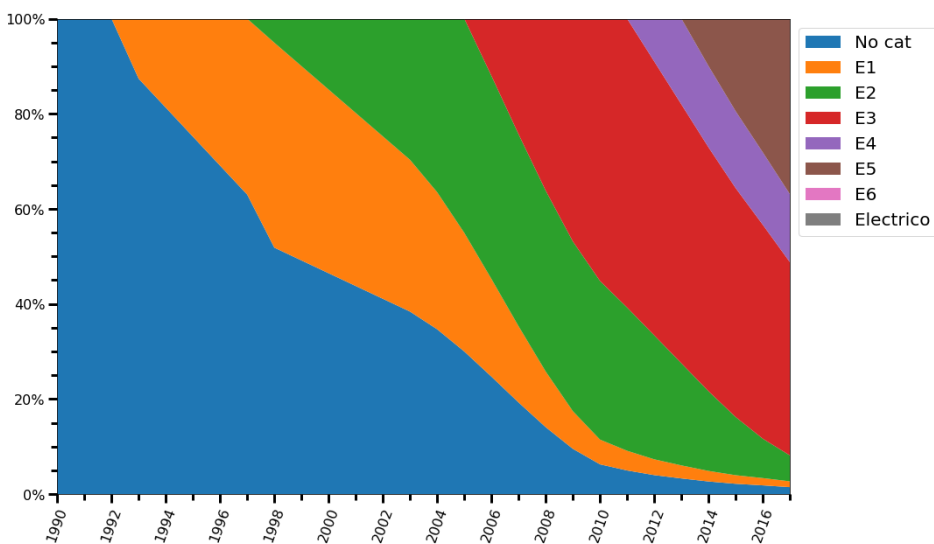


Gráfico 60: R13 VLC INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

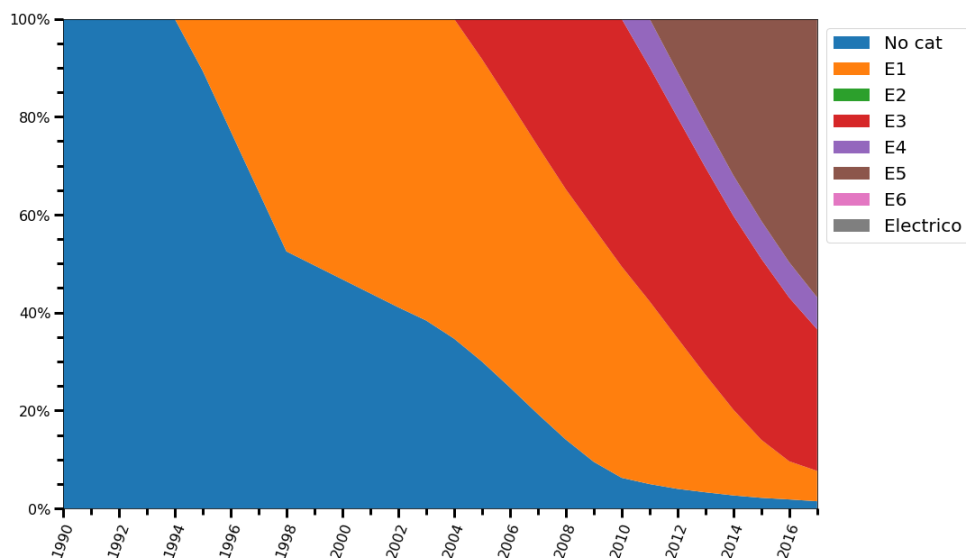


Gráfico 61: R13 VLC INTERURBANO GASOLINA

Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina

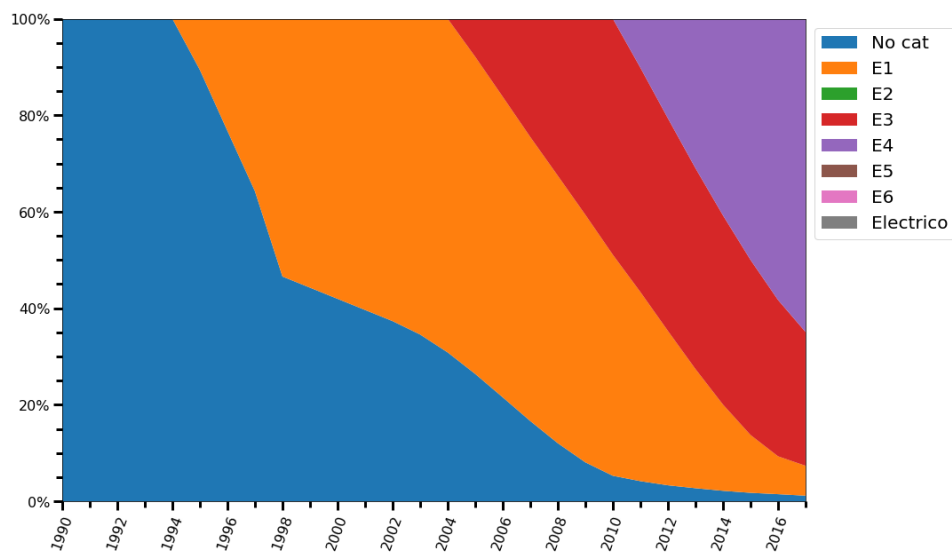


Gráfico 62: R13 VLP INTERURBANO DIESEL

Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

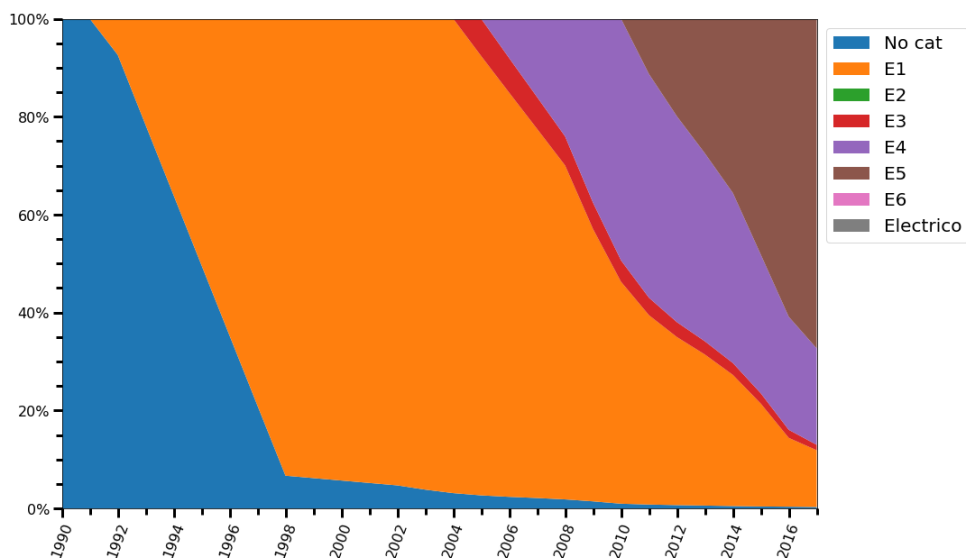
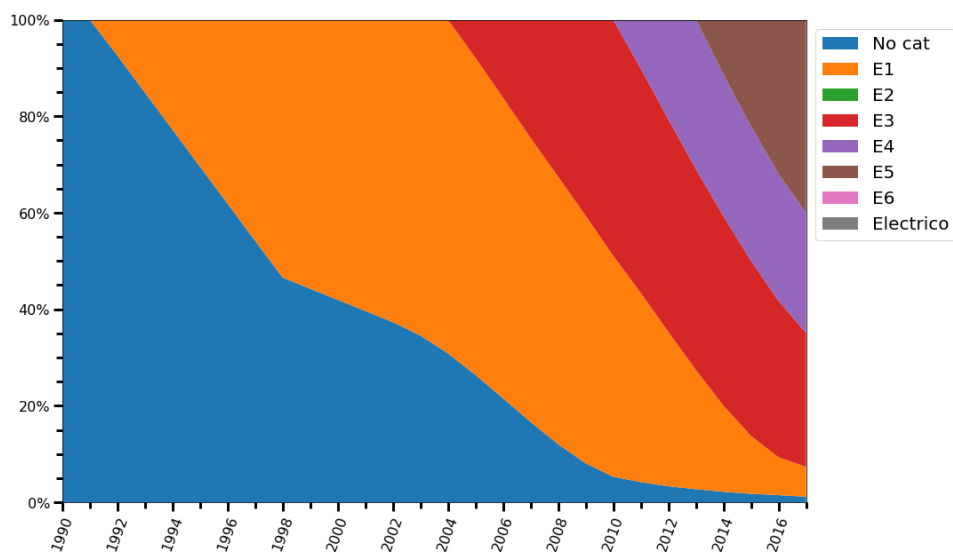


Gráfico 63: R13 VLP INTERURBANO GASOLINA

Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina



6.2 Proyección distribución tecnológica

a. Optimista

Urbano

Gráfico 64: OPTIMISTA R13 BUS ART URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: BUS ART - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

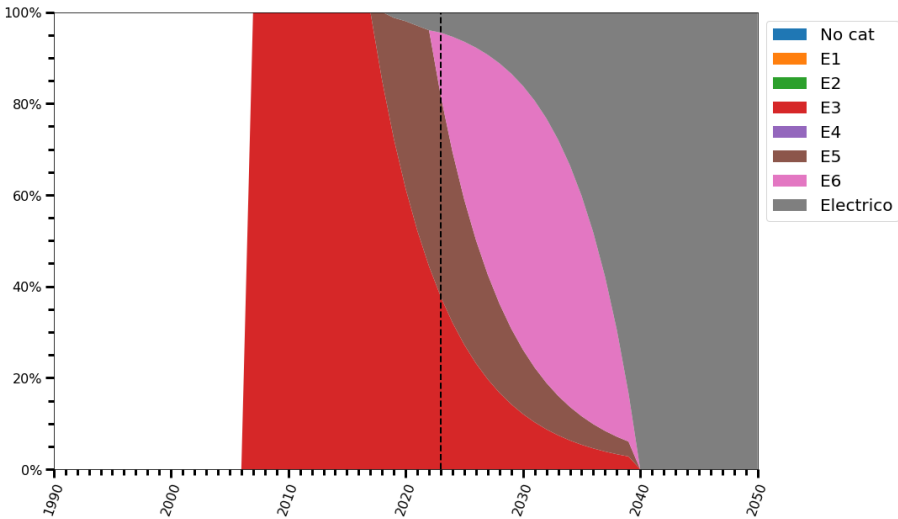


Gráfico 65: OPTIMISTA R13 BUS RIG URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: BUS RIG - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

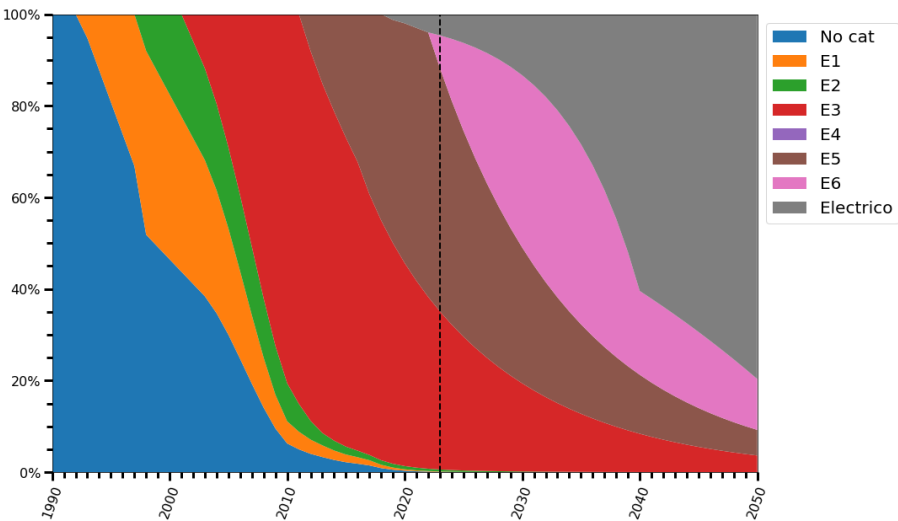


Gráfico 66: OPTIMISTA R13 CAM LIV URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

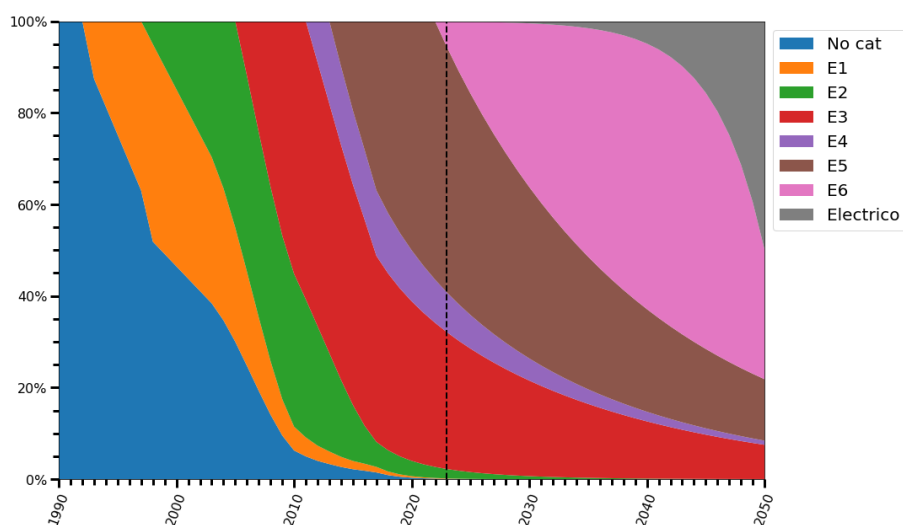


Gráfico 67: OPTIMISTA R13 CAM MED URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

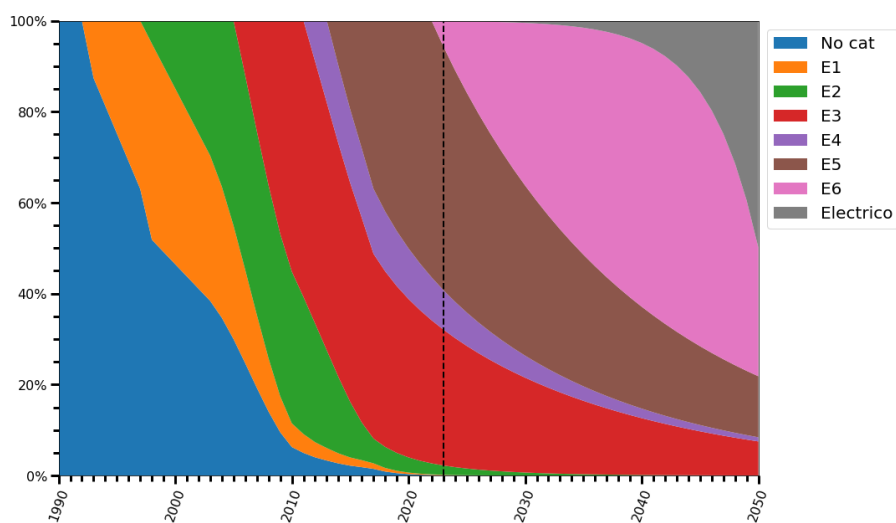


Gráfico 68: OPTIMISTA R13 CAM PES URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

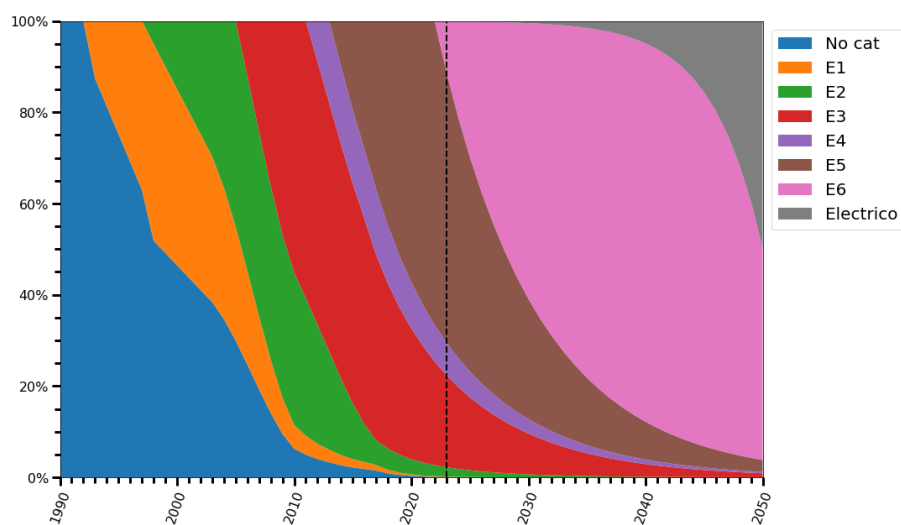


Gráfico 69: OPTIMISTA R13 TAX URBANO GASOLINA

Optimista - Región: R13 - Categoría: TAX - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

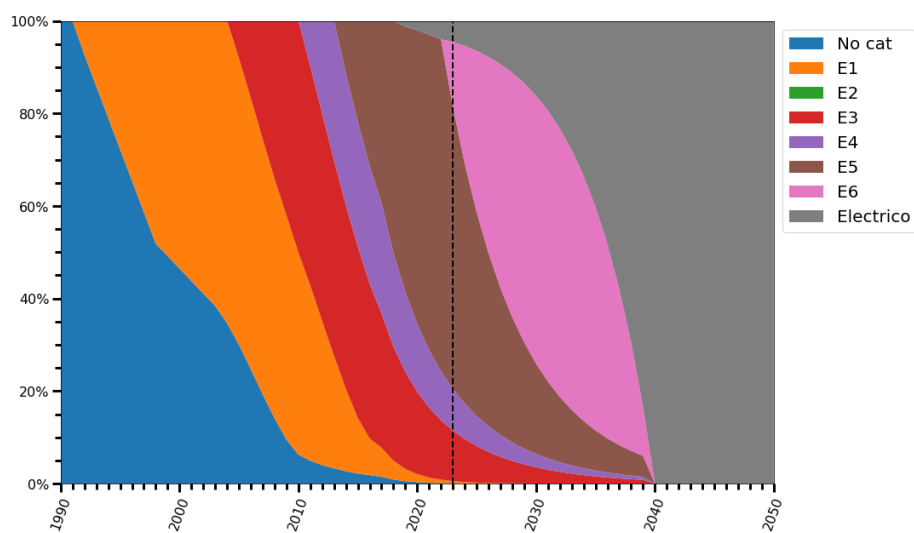


Gráfico 70: OPTIMISTA R13 VLC URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

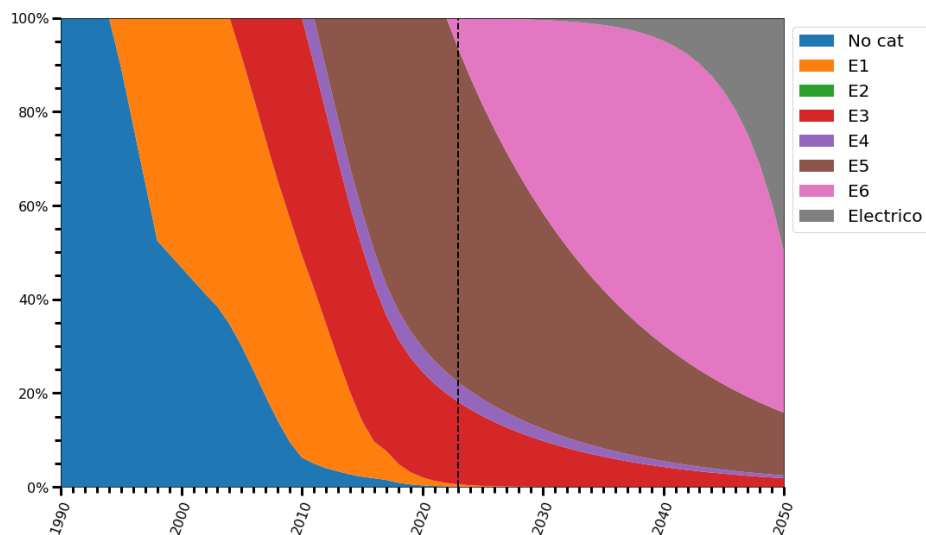


Gráfico 71: OPTIMISTA R13 VLC URBANO GASOLINA

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

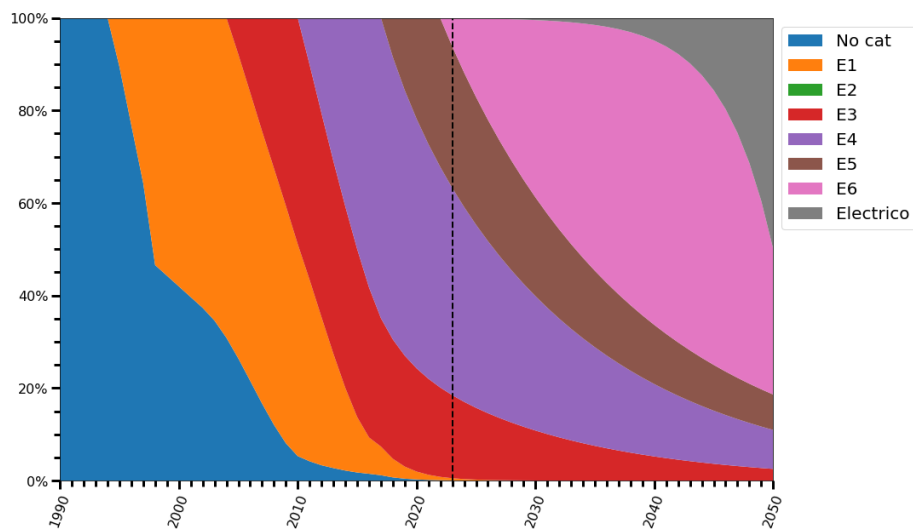


Gráfico 72: OPTIMISTA R13 VLP URBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

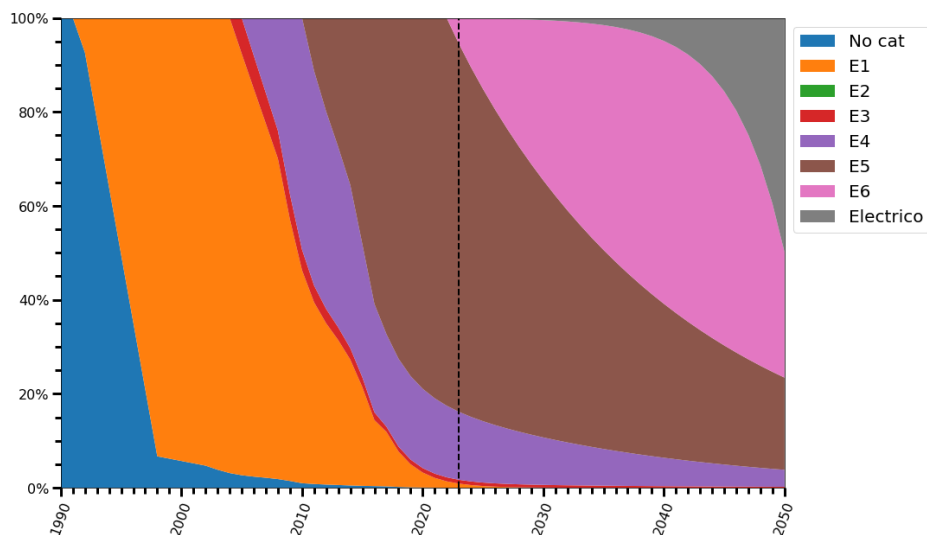
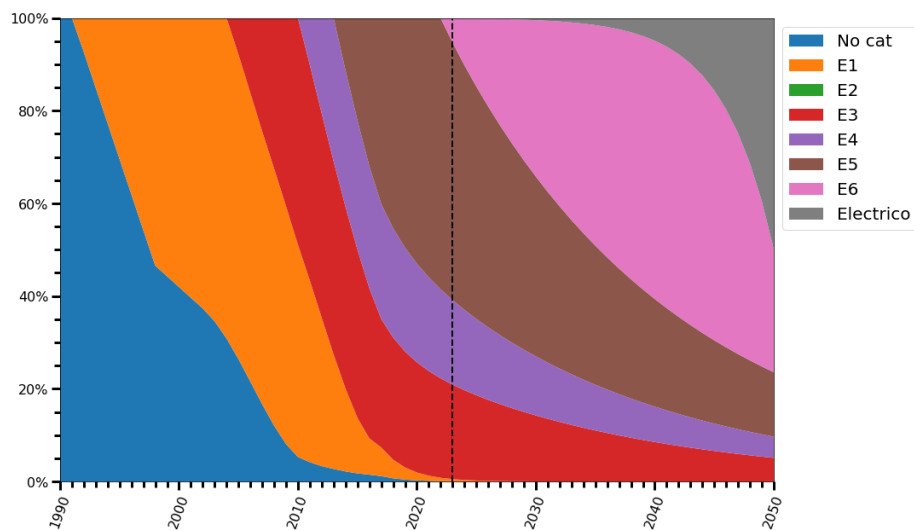


Gráfico 73: OPTIMISTA R13 VLP URBANO GASOLINA

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina



Interurbano

Gráfico 74: OPTIMISTA R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: BUS INT PROV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

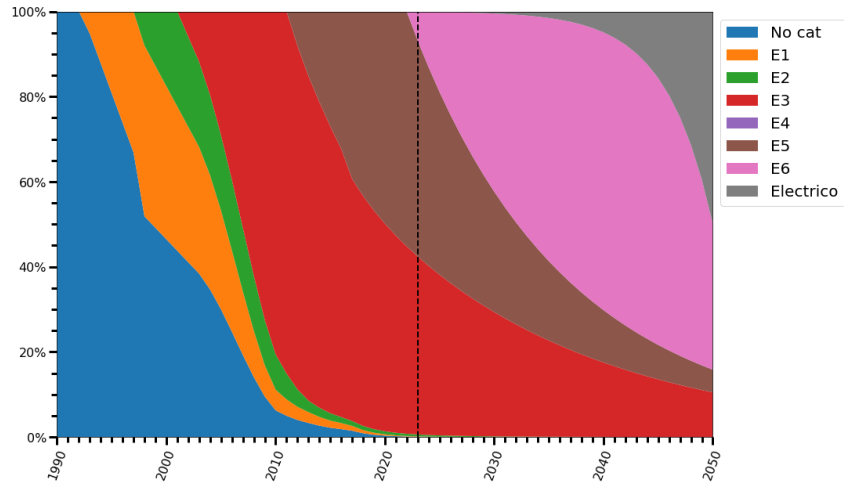


Gráfico 75: OPTIMISTA R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

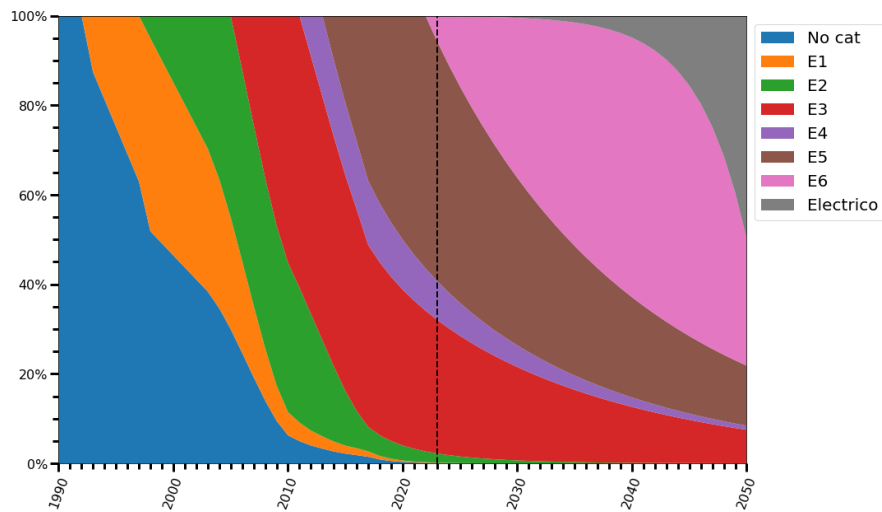


Gráfico 76: OPTIMISTA R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

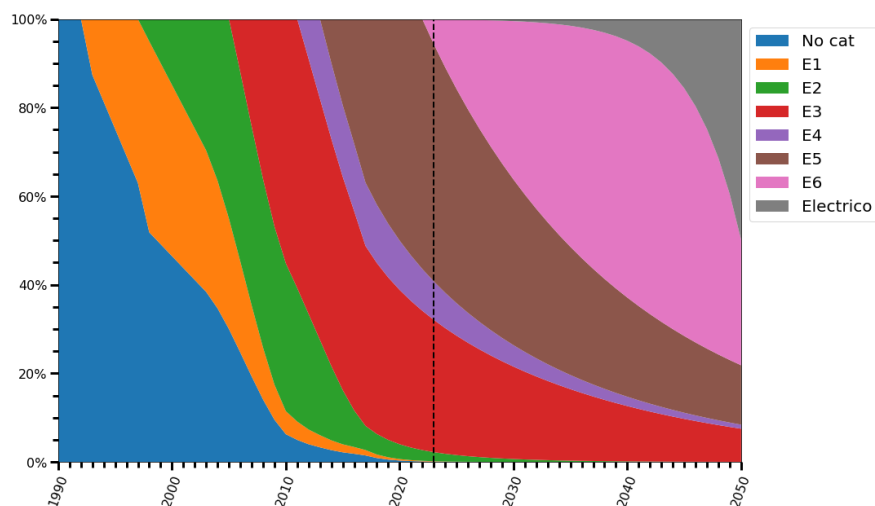


Gráfico 77: OPTIMISTA R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

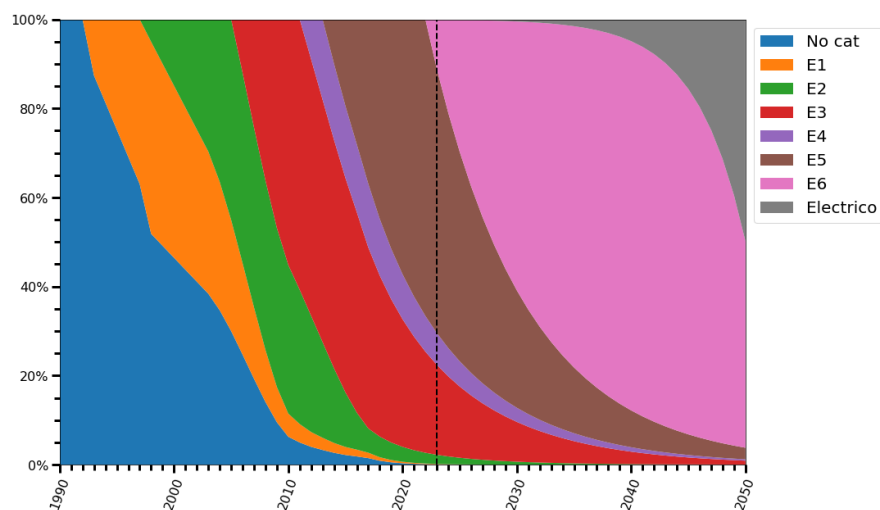


Gráfico 78: OPTIMISTA R13 VLC INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

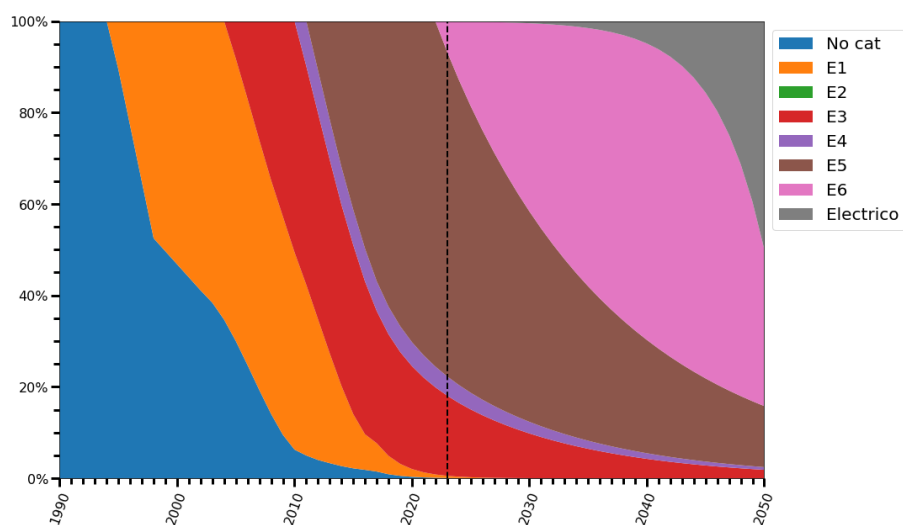


Gráfico 79: OPTIMISTA R13 VLC INTERURBANO GASOLINA

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina

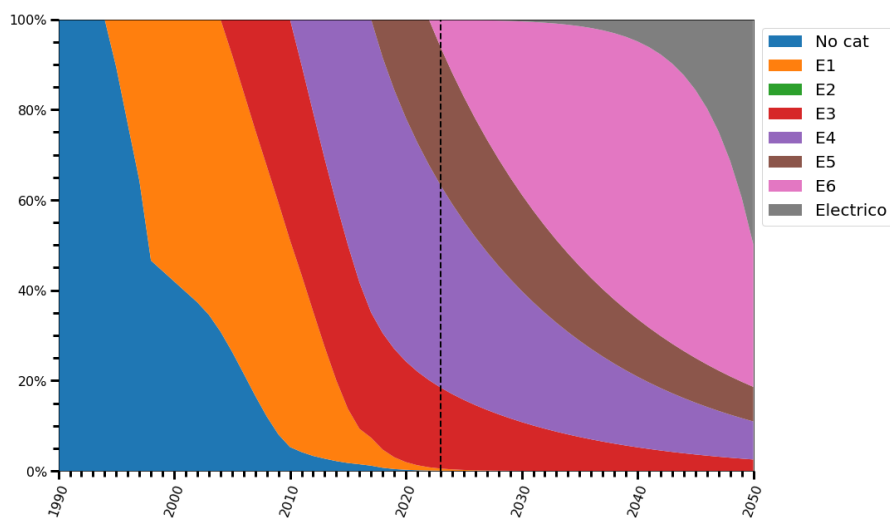


Gráfico 80: OPTIMISTA R13 VLP INTERURBANO DIESEL

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

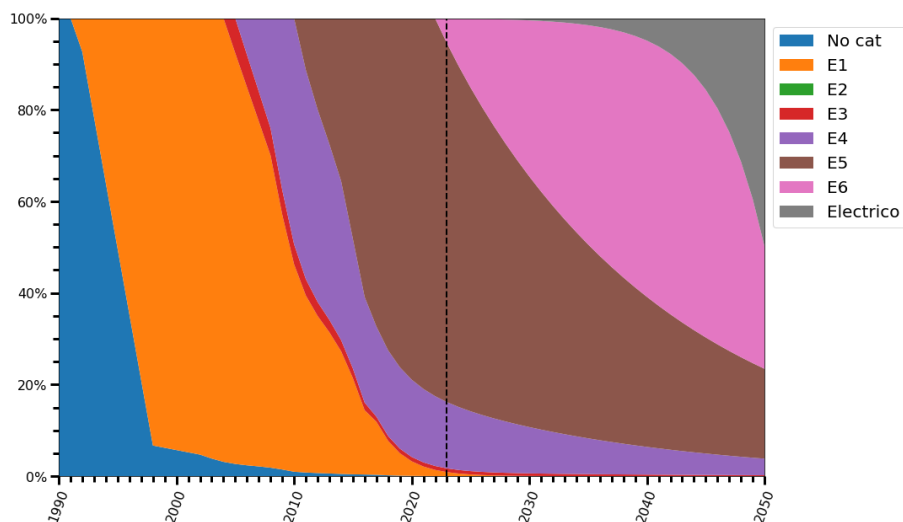
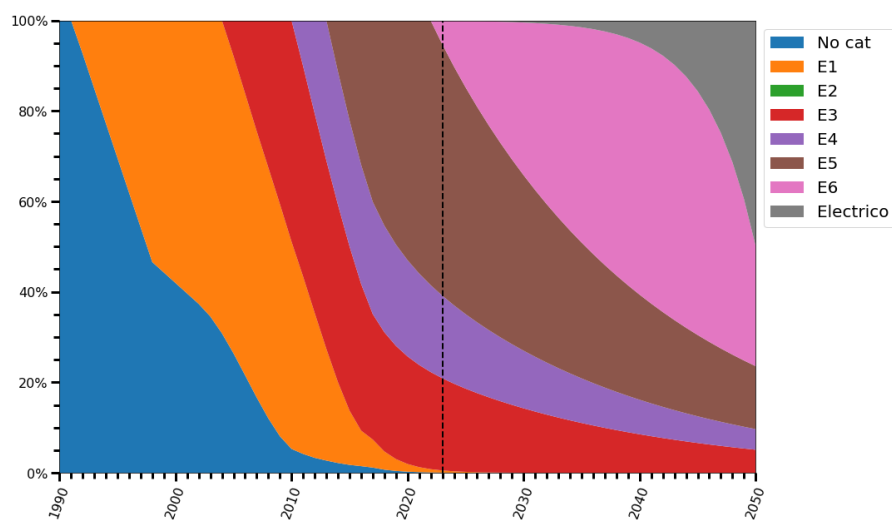


Gráfico 81: OPTIMISTA R13 VLP INTERURBANO GASOLINA

Optimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina



b. Pesimista

Urbano

Gráfico 82: PESIMISTA R13 BUS ART URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: BUS ART - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

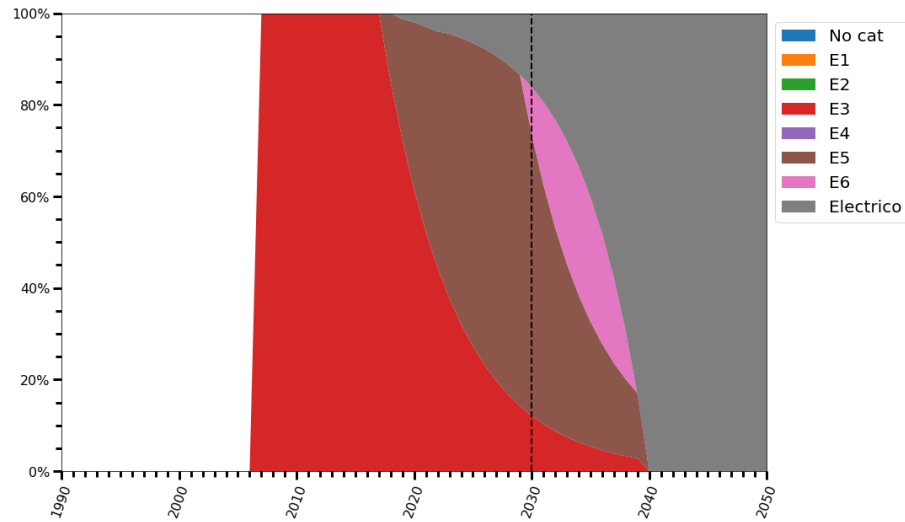


Gráfico 83: PESIMISTA R13 BUS RIG URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: BUS RIG - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

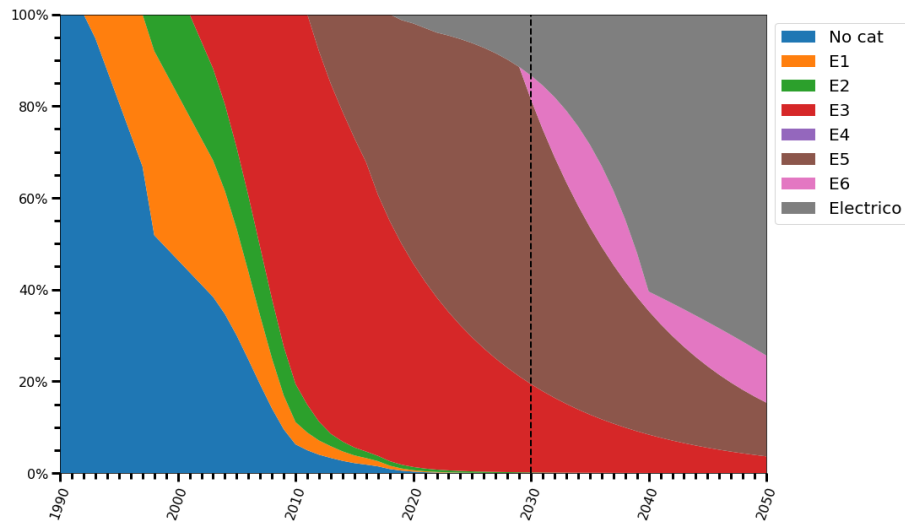


Gráfico 84: PESIMISTA R13 CAM LIV URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

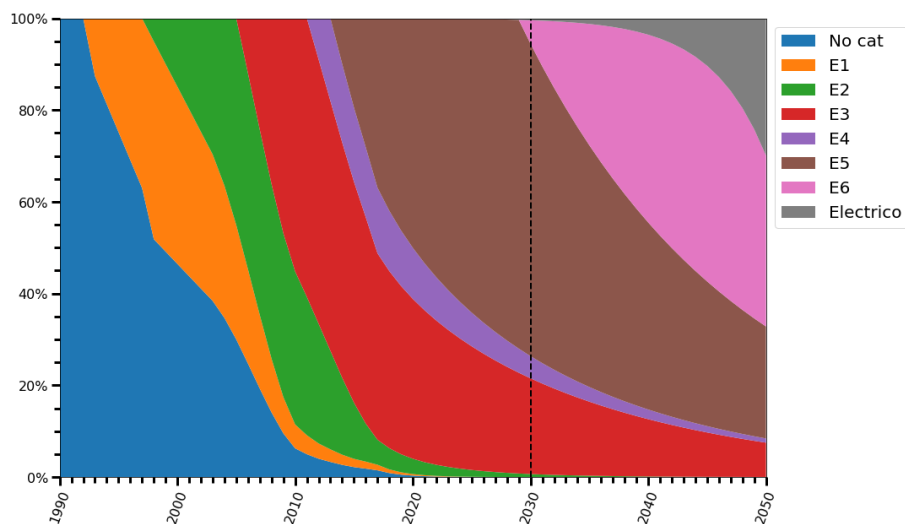


Gráfico 85: PESIMISTA R13 CAM MED URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

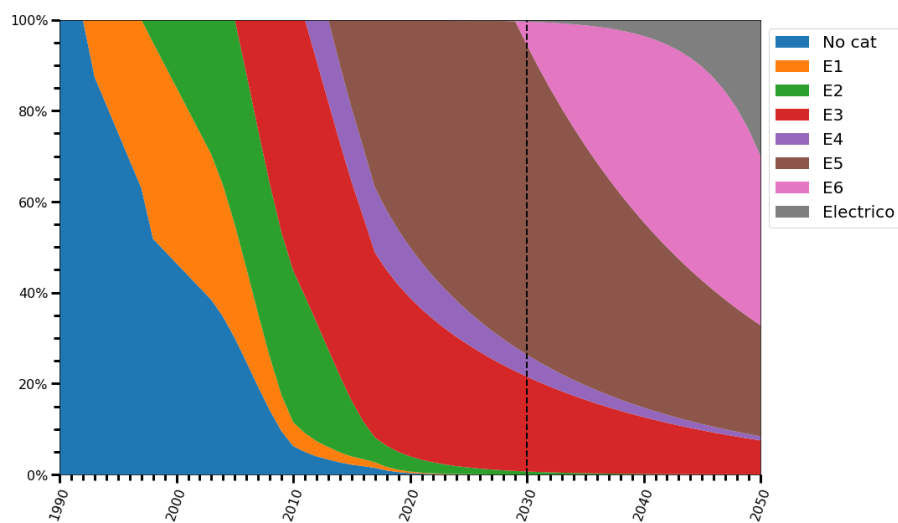


Gráfico 86: PESIMISTA R13 CAM PES URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

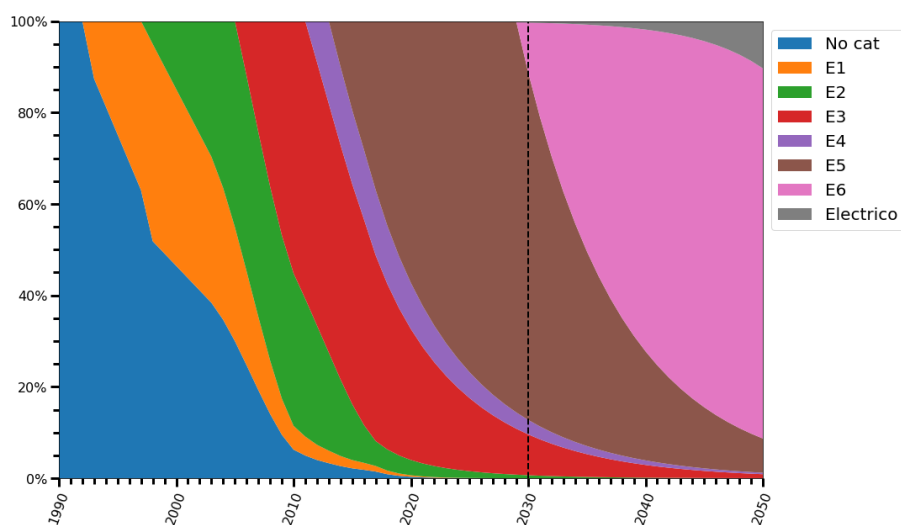


Gráfico 87: PESIMISTA R13 TAX URBANO GASOLINA

Pesimista - Región: R13 - Categoría: TAX - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

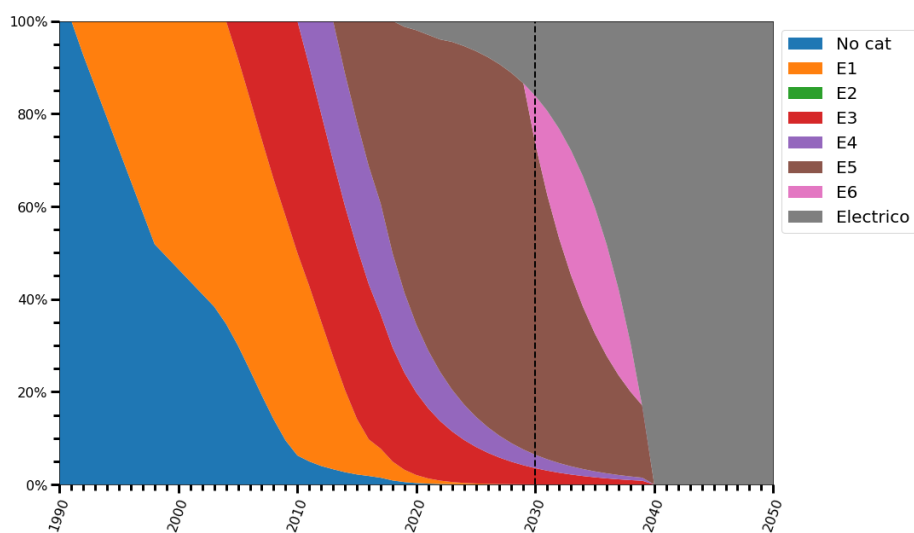


Gráfico 88: PESIMISTA R13 VLC URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

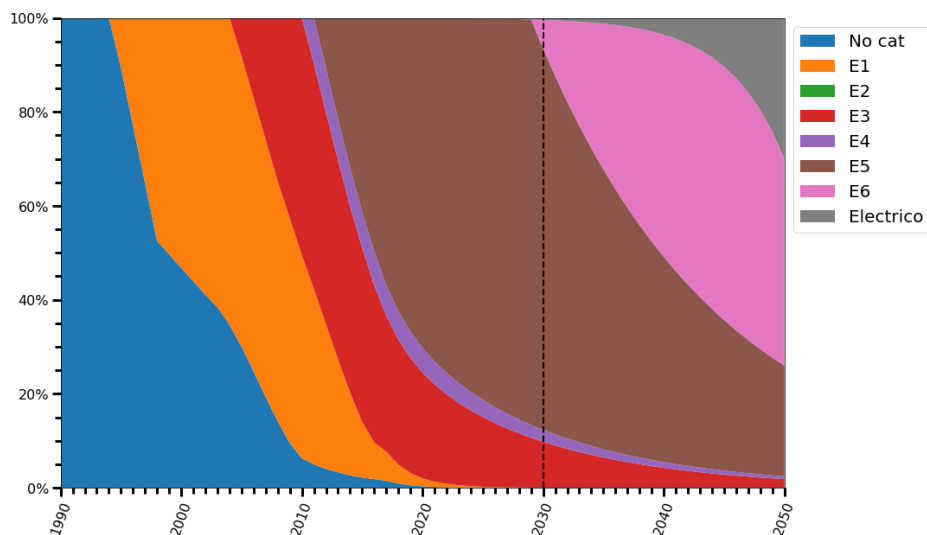


Gráfico 89: PESIMISTA R13 VLC URBANO GASOLINA

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina

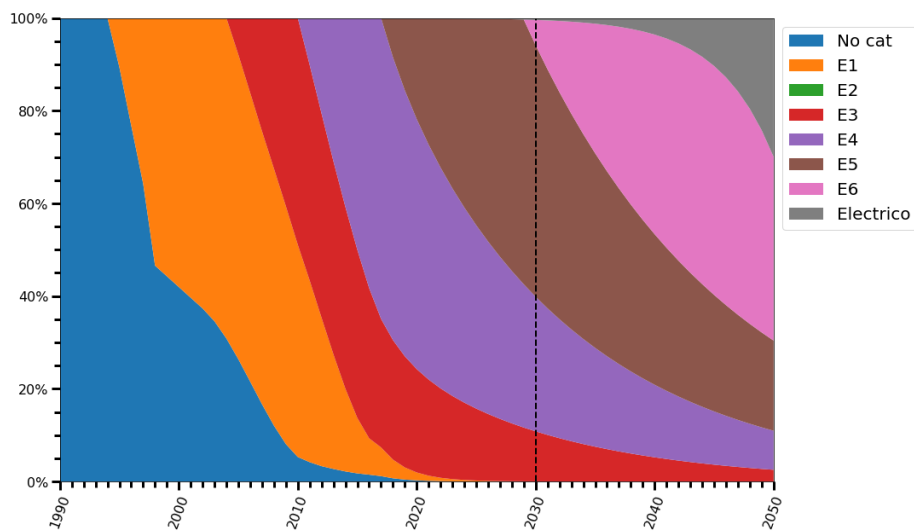


Gráfico 90: PESIMISTA R13 VLP URBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Diesel

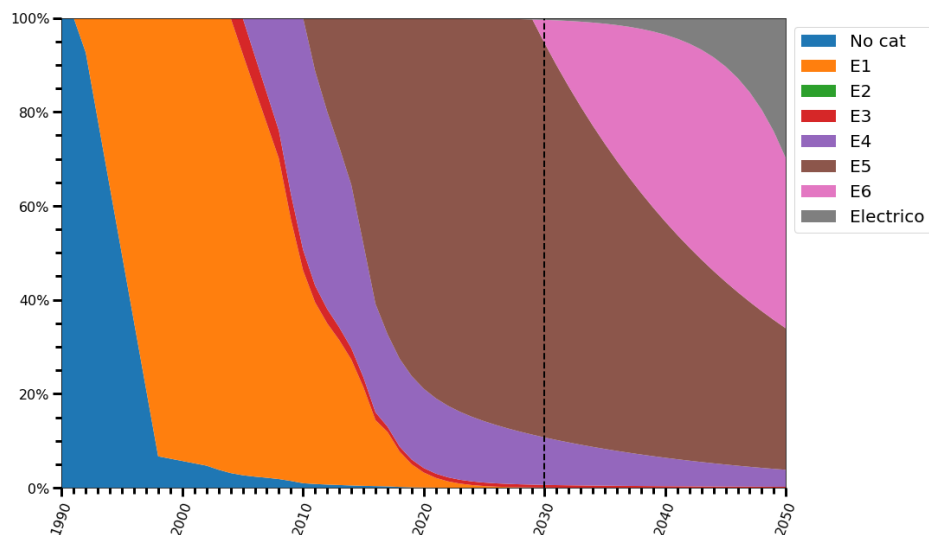
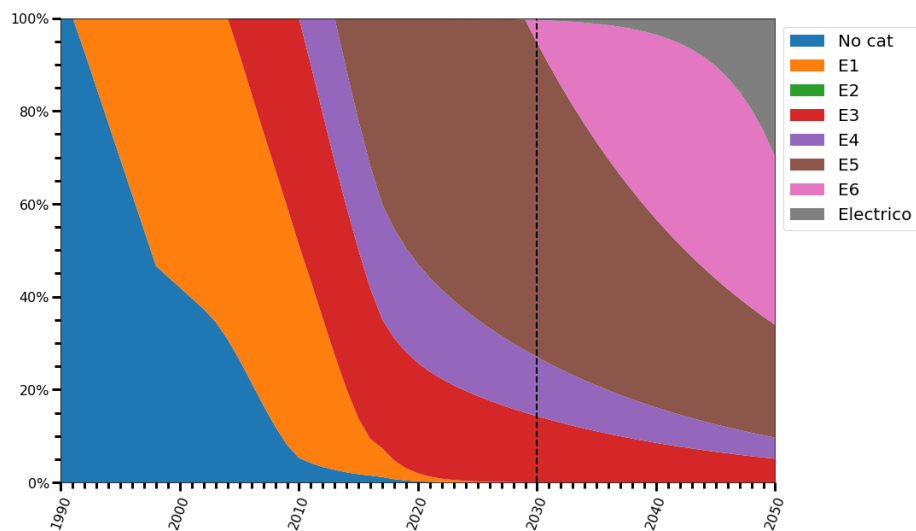


Gráfico 91: PESIMISTA R13 VLP URBANO GASOLINA

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Urbano - Motorización: Gasolina



Interurbano

Gráfico 92: PESIMISTA R13 BUS INT PROV INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: BUS INT PROV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

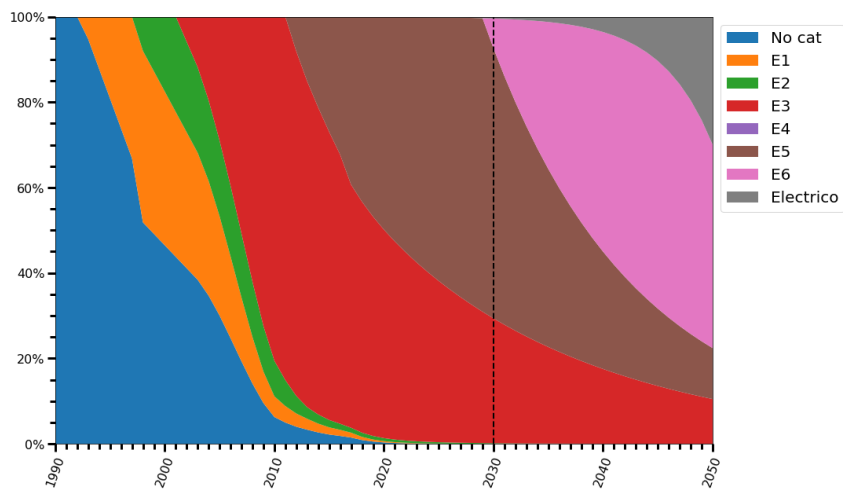


Gráfico 93: PESIMISTA R13 CAM LIV INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM LIV - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

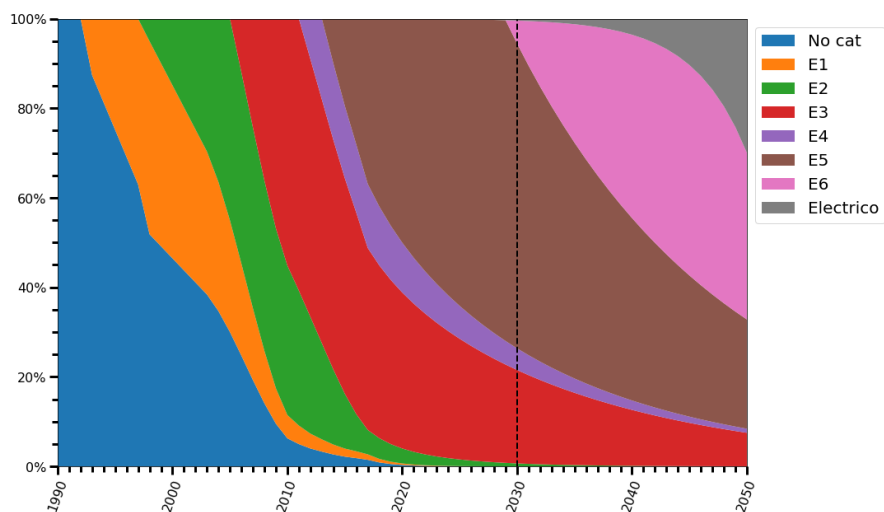


Gráfico 94: PESIMISTA R13 CAM MED INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM MED - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

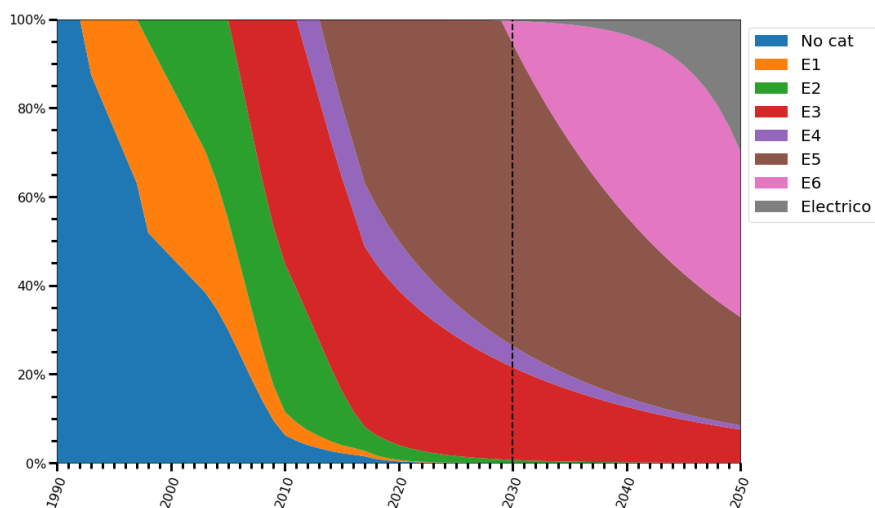


Gráfico 95: PESIMISTA R13 CAM PES INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: CAM PES - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

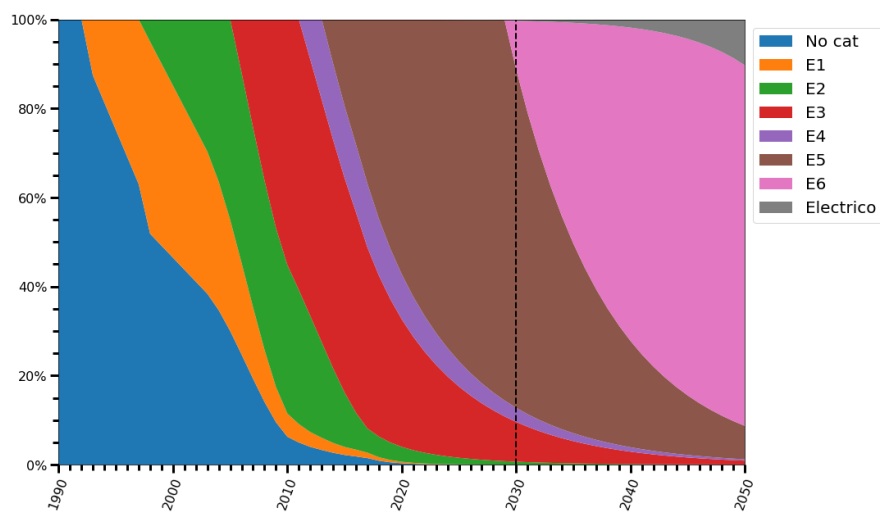


Gráfico 96: PESIMISTA R13 VLC INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

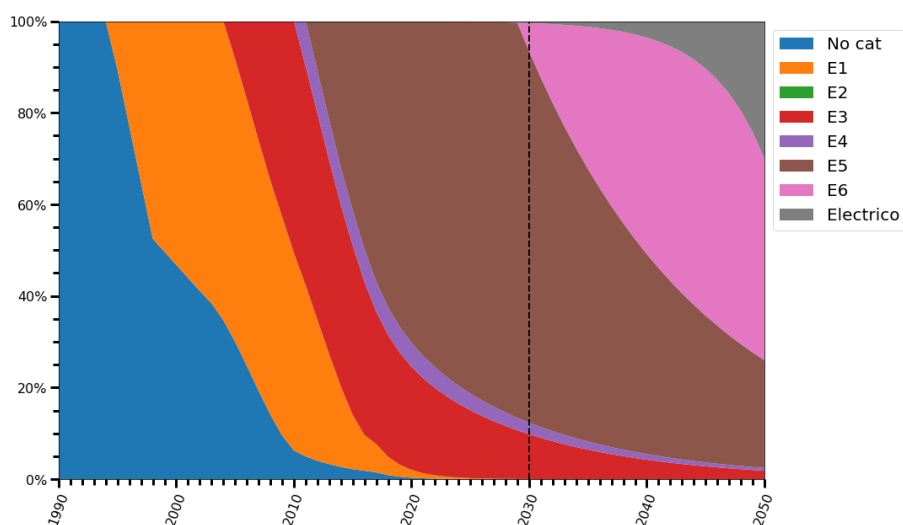


Gráfico 97: PESIMISTA R13 VLC INTERURBANO GASOLINA

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLC - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina

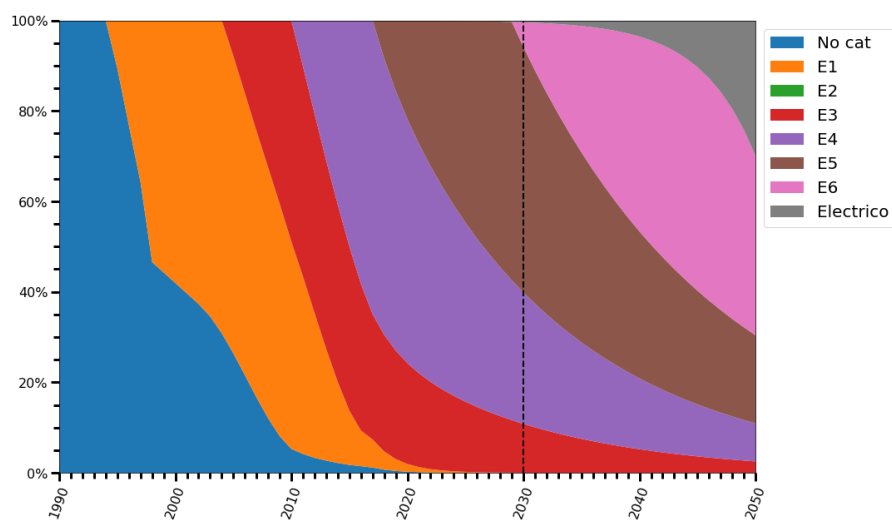


Gráfico 98: PESIMISTA R13 VLP INTERURBANO DIESEL

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Diesel

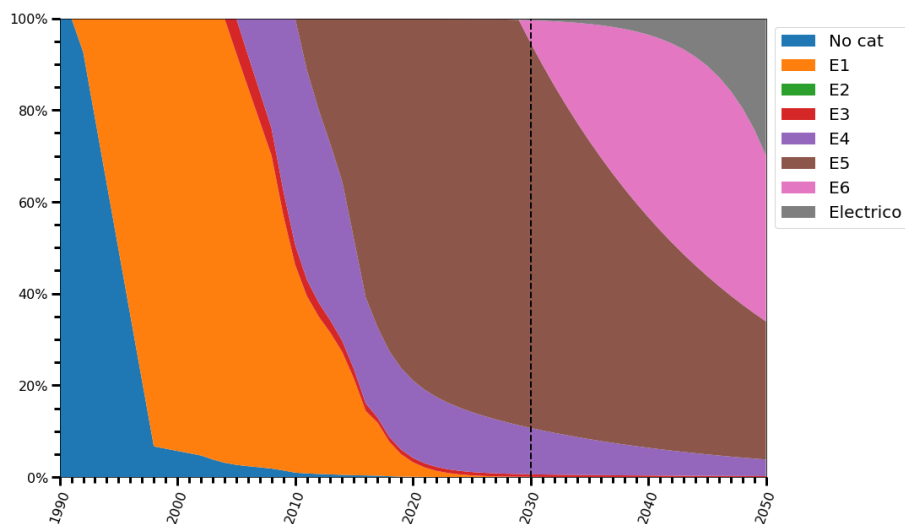


Gráfico 99: PESIMISTA R13 VLP INTERURBANO GASOLINA

Pesimista - Región: R13 - Categoría: VLP - Ámbito: Interurbano - Motorización: Gasolina

