



*Al servicio  
de las personas  
y las naciones*

**INFORME FINAL**

# **“ESCENARIO LÍNEA BASE DE EMISIONES GEI DEL SECTOR DE TRANSPORTE Y URBANISMO”**

PNUD SDP 109/2012



**SISTEMAS  
SUSTENTABLES**

**JUNIO 2013**

# ÍNDICE

1	Introducción .....	1
1.1	Iniciativa MAPS .....	1
1.2	Estrategia de Investigación.....	2
1.3	Objetivo del Estudio.....	5
1.4	Visión del Sector Transporte Nacional hacia el 2006.....	6
2	Revisión de Antecedentes .....	9
2.1	Modelos Internacionales .....	9
2.2	Modelos Nacionales .....	24
2.3	Perspectivas para el Transporte.....	28
2.4	Análisis Crítico y Levantamiento de la Información .....	32
3	Metodología de Proyección de Emisiones y Consumo Energético para el Sector Transporte .....	41
3.1	Modelos y Cálculo de Emisiones .....	41
3.2	Proyección de Variables de Entrada.....	49
4	Proyección del Parque Vehicular.....	59
4.1	Modelos Generales de Proyección .....	59
4.2	Proyección del Parque de Vehículos Livianos y Medianos .....	60
5	Resultados de Proyecciones.....	62
5.1	Consumo Energético Aéreo y Marítimo .....	62
5.2	TKM.....	71
5.3	PKM .....	73
6	Resultados de Emisiones Sector Transporte.....	90
6.1	Resultados Modo Aéreo y Marítimo.....	94
6.2	Resultados Transporte de Carga Terrestre .....	101
6.3	Resultados Transporte de Pasajeros Terrestre.....	105
6.4	Análisis de Sensibilidad .....	111
6.5	Comparación de Resultados.....	119
6.6	Coherencia de Parque Vehicular y Emisiones .....	126
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	134
7.1	Conclusiones Generales .....	134
7.2	Conclusiones Específicas .....	136

---

7.3	Recomendaciones.....	141
8	Bibliografía.....	146
8.1	Bibliografía Internacional .....	146
8.2	Bibliografía Nacional .....	147

## ANEXOS

ANEXO A “CONSUMO DE COMBUSTIBLE HISTÓRICO AÉREO Y MARÍTIMO”

ANEXO B “METODOLOGÍA SERIE HISTÓRICA TKM”

ANEXO C “METODOLOGÍA SERIE HISTÓRICA PKM”

ANEXO D “PARQUE HISTÓRICO VEHICULAR”

ANEXO E “RESULTADOS MODELOS ECONÓMICOS”

ANEXO F “SERIES PROYECTADAS”

ANEXO G “ANÁLISIS MATEMÁTICO DE ANOMALÍA DE PROYECCIÓN”

ANEXO H “SERIES DE EMISIONES DE CO<sub>2E</sub> POR MODO”

ANEXO I “LISTADO DE ANEXOS DIGITALES”

ANEXO J “USO DE HERRAMIENTAS DE CÁLCULO DE EMISIONES”

ANEXO K “DEFINICIÓN DE PARTICIÓN MODAL ALTERNATIVA”

ANEXO L “ANÁLISIS DE COHERENCIA TRANSPORTE DE CARGA”

## RESUMEN EJECUTIVO

En las siguientes páginas se presenta el Resumen Ejecutivo del estudio “**Escenario Línea Base 2007 o Crecimiento Sin Restricciones de Emisiones de GEI para el Sector de Transporte y Urbanismo**”, el cual se enmarca dentro de las actividades del proyecto MAPS-Chile, fase 1.

El **objetivo general** del presente estudio es proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el sector Transporte a nivel nacional para el escenario Línea Base o Crecimiento Sin Restricciones (CSR), en el horizonte de evaluación 2007-2050, considerando como año de inicio el año 2007 y detallando los resultados para los años 2020, 2030 y 2050.

Los objetivos específicos de estudio son:

- 1) Disponer de un modelo validado en común acuerdo con la contraparte técnica para representar y simular el sector específico.
- 2) Asegurar la coherencia de los modelos propuestos y de los datos básicos utilizados, con aquellos utilizados en los otros sectores modelados.
- 3) Conocer la información disponible y respaldada, que representen las emisiones del año 2007 y los parámetros requeridos para la proyección del escenario Línea Base o CSR.
- 4) Completar los vacíos que deje la información disponible a 2007, con información adicional validada por la contraparte técnica, de manera de proyectar adecuadamente el escenario Línea Base o CSR. Se requiere especificar los supuestos considerados para las principales variables en base a la información adicional.
- 5) Proyectar las emisiones de GEI para el escenario Línea Base o CSR a nivel nacional, con un horizonte de evaluación 2007-2050, detallando los resultados para los años 2020, 2030 y 2050.
- 6) Usando la misma metodología de proyección del punto 5, y con los datos reales de las variables relevantes para la proyección, estimar las emisiones del sector para el periodo 2007-2011. Explicar las diferencias observadas en relación a proyección del escenario Línea Base o CSR.

### METODOLOGÍA GENERAL

La metodología desarrollada en el presente estudio contempló dos líneas de trabajo principales:

- *Metodología de cálculo de emisiones*, la cual definió la elaboración de modelos de emisiones que mejor representarían al sector transporte y que además fueran un aporte para la fase posterior de MAPS-Chile en términos de permitir modelar posibles medidas de mitigación.

- *Metodología de proyección*, la cual definió los modelos econométricos de las variables relevantes para el cálculo de emisiones del sector transporte, basados en series de PIB, PIB per cápita y PIB regional, dependiendo de cada caso. Las tasas de crecimiento del PIB (5 escenarios) y población nacional fueron entregadas por la contraparte técnica del proyecto y fueron las mismas que utilizaron los estudios que se realizaron en forma paralela a esta consultoría. No obstante, los criterios de desagregación de la población nacional a nivel regional fueron distintos<sup>1</sup>.

Los modelos finales desarrollados tanto para la proyección de variables como para la estimación de emisiones consideraron la revisión de antecedentes locales e internacionales, así como también un completo levantamiento de información histórica asociada al sector transporte, considerando información referenciada previa al 2007.

La Figura representa el diagrama general de la metodología empleada para el cálculo de emisiones al año 2050, la cual consideró tres tipologías de modelos: la primera para los modos aéreo y marítimo, la segunda para el transporte de carga terrestre y la tercera para el transporte de pasajeros terrestre.

Los modelos marítimo y aéreo están basados en el consumo histórico de energía. En tanto los modelos de transporte de carga (TKM) y de pasajeros (PKM) están basados en la demanda histórica definida como tonelada-kilómetro y pasajero-kilómetro per cápita, respectivamente. Estas últimas 2 series no existían como información local y fueron determinadas de manera indirecta a partir de consumos históricos y variables de transporte como tasa de ocupación, tasa de carga, factores de consumo, entre otros, para luego ser proyectadas al 2050.

---

<sup>1</sup> Asimismo, para el periodo 2020-2030 se detectó que la tasa de crecimiento de la población nacional utilizada en este estudio presenta algunas diferencias con respecto a la tasa utilizada por los otros estudios que se desarrollaron en forma paralela.

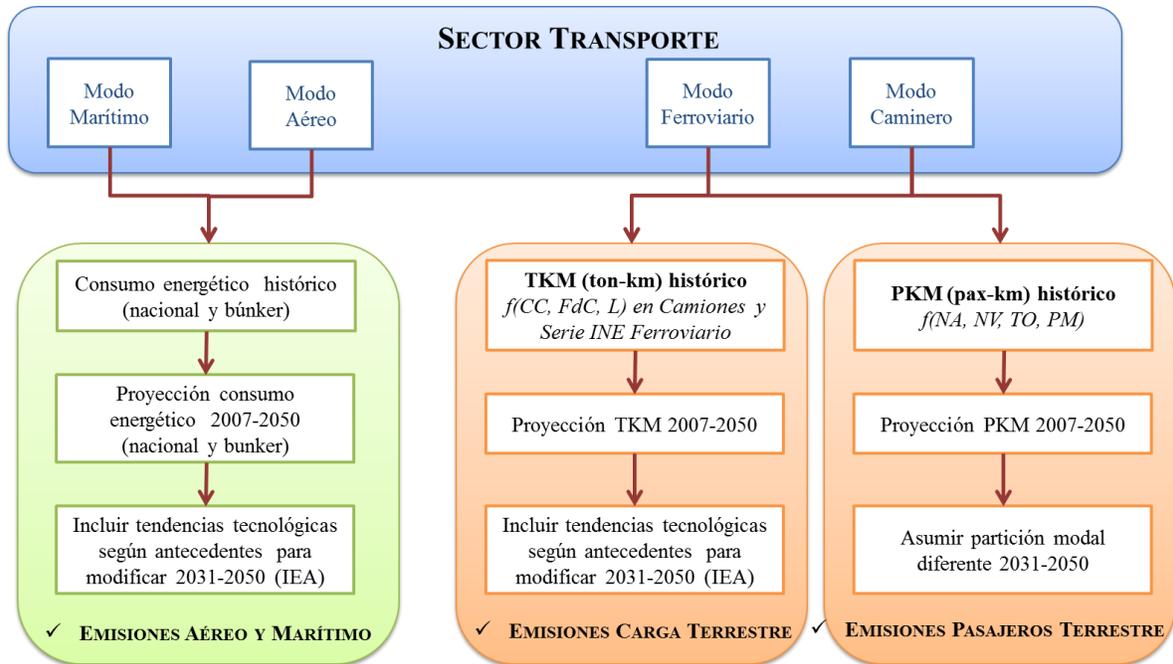


Figura 1 Esquema general para proyectar emisiones en el sector transporte

### MODELOS PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES

El cálculo de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte se realiza a través de factores de emisión del IPCC 2006, en base a los consumos energéticos anuales que se obtienen para cada modo, desagregados por tipo de combustible. La obtención de los consumos energéticos de cada modo se obtienen a través de la proyección de las variables, según se resume a continuación:

- Para los modos aéreo y marítimo se emplearon modelos econométricos de proyección que relacionaron el consumo energético de ambos modos con el PIB nacional. Con esto se tiene el consumo energético directo y en consecuencia las emisiones. La información histórica considerada para estos modos pertenece a los años 1991-2006.
- Para el modelo de transporte de carga terrestre se empleó un modelo econométrico de proyección que relacionó el PIB nacional con la serie histórica de tonelada-kilómetro (TKM) para los años 1998-2006, que integra la demanda de TKM en camiones y trenes. El cálculo de emisiones para el modelo de carga define primero una desagregación por modo (ferroviario y caminero-camión), la cual se supuso que se mantenía fija para el periodo 2007-2050. El porcentaje asignado a cada modo se basa en el promedio de participación modal observado en la serie histórica considerada. Luego, se determinan los consumos energéticos respectivos a partir de parámetros como tasas de carga y rendimientos, tanto para el modo ferroviario como por categoría de camión (liviano, mediano y pesado). Con los consumos energéticos determinados, se procede al cálculo de emisiones anuales.

Para el modelo de transporte de pasajeros terrestre se empleó un modelo econométrico de proyección que relacionó el PIB per cápita regional con la serie histórica de pasajero-kilómetro per cápita regional (kilómetro por persona) para los años 1998-2006, que integra la demanda de en vehículos particulares, taxis y buses<sup>2</sup>. De manera similar al caso de carga, el cálculo de emisiones para el modelo de pasajeros define primero una desagregación por modo (vehículo particular, taxi y bus). En este estudio no se desarrolló un modelo para proyectar la partición modal. Para abordar esto, en realizaron varias sensibilidades, entre las cuales destaca aquella que supone que la partición modal se mantiene constante para el periodo 2007-2050 de acuerdo a la participación observada en el año 2006, y otra en que se asume que la partición modal varía de acuerdo a las variaciones observadas en la serie histórica. Luego, se determinan los consumos energéticos respectivos a partir de parámetros como tasas de ocupación y rendimientos, para las distintas categorías mencionadas, incluyendo también la penetración de tecnologías eléctricas e híbridas para los vehículos livianos que ingresan al parque<sup>3</sup>, todos los cuales fueron recopilados a lo largo del estudio. Con los consumos energéticos determinados, se procede al cálculo de emisiones anuales.

Cabe destacar que la información disponible para caracterizar el transporte de carga es bastante limitada (tasas de carga, distancias recorridas, rendimientos, etc.). Asimismo, tampoco se desarrollaron modelos para proyectar la partición modal tanto de transporte de carga como de pasajeros. Por lo tanto, existe espacio para mejorar estos aspectos de modelación, lo cual será abordado en las próximas fases del proyecto MAPS-Chile.

### **RESULTADOS DE PROYECCIÓN DE EMISIONES**

Los resultados de emisiones de GEI para el sector transporte nacional se presentan en la Figura 2 la cual contiene las cinco trayectorias de emisiones según cada escenario de PIB para el periodo 2007-2050. Estos resultados suponen que la partición modal asociada al transporte de pasajeros se mantiene constante para el periodo de evaluación.

Se observa que para el sector transporte hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> se incrementará en 1,36 veces respecto al 2007 para el escenario *PIB Medio Alto*, alcanzando el valor de 46,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 2,02 veces (59,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 58% (31 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte serán 2,78 veces (74,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 3,3 veces (84,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,3 veces (44,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

La Tabla 1 indica el resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte, desagregado por escenario de PIB y para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050.

---

<sup>2</sup> También se consideró tren urbano en las regiones que tienen, como son los casos de la RM, RV y RVIII

<sup>3</sup> Se asumió una tasa de ingreso del 0,002% del total de vehículos nuevos para el período 2007-2030 y 0,004% entre 2031-2050

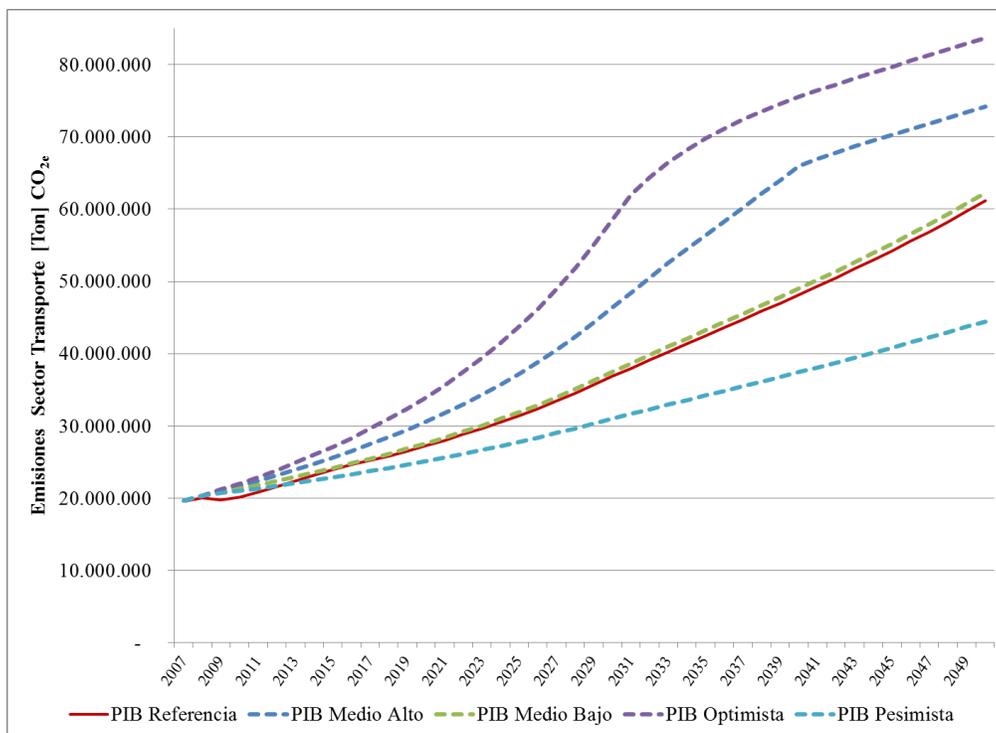


Figura 2 Emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB

Tabla 1 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.529.758	27.269.431	36.853.807	61.170.614
PIB Medio Alto	19.620.083	30.591.062	46.400.147	74.205.053
PIB Medio Bajo	19.620.083	27.619.831	37.460.169	62.295.654
PIB Optimista	19.620.083	34.210.456	59.268.260	84.369.468
PIB Pesimista	19.620.083	25.142.225	31.042.442	44.479.784

En referencia a la participación en la emisiones por modo (camionero, ferroviario, marítimo y aéreo), en general, hacia el año 2030 se observa que la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> tiene como mayor responsable al modo camionero, siendo un 77% para el escenario *PIB Medio Alto* (35,5 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>), un 69% para el escenario *PIB Optimista* (41,1 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y un 87% para el *PIB Pesimista* (27,1 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>). Hacia el 2050 el modo camionero reduce su participación debido al incremento en las emisiones del modo aéreo nacional. Luego, la participación del modo camionero hacia el 2050 en las emisiones de CO<sub>2e</sub> representan el 75% para el escenario *PIB Medio Alto* (55,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 65% para el *PIB Optimista* (54,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y un 85% para el *PIB Pesimista* (37,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>).

La Figura 3 indica la participación por modo de transporte en las emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2030 y 2050 para el escenario *PIB de Medio Alto*.

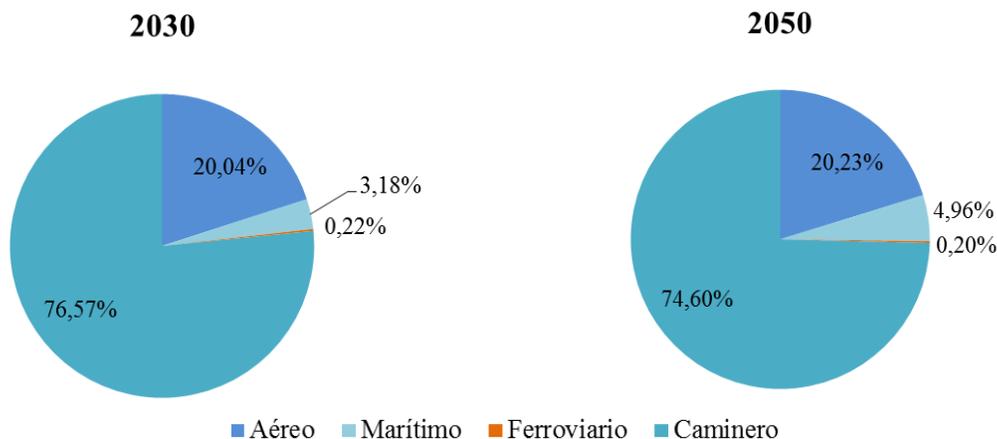


Figura 3 Participación por modo de transporte en las emisiones de CO<sub>2e</sub>, *PIB de Medio Alto* para los años 2030 y 2050

Respecto al análisis de subsectores, la Figura 4 muestra la distribución de las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el subsector carga y pasajeros terrestre al 2050 para el escenario *PIB Medio Alto*.

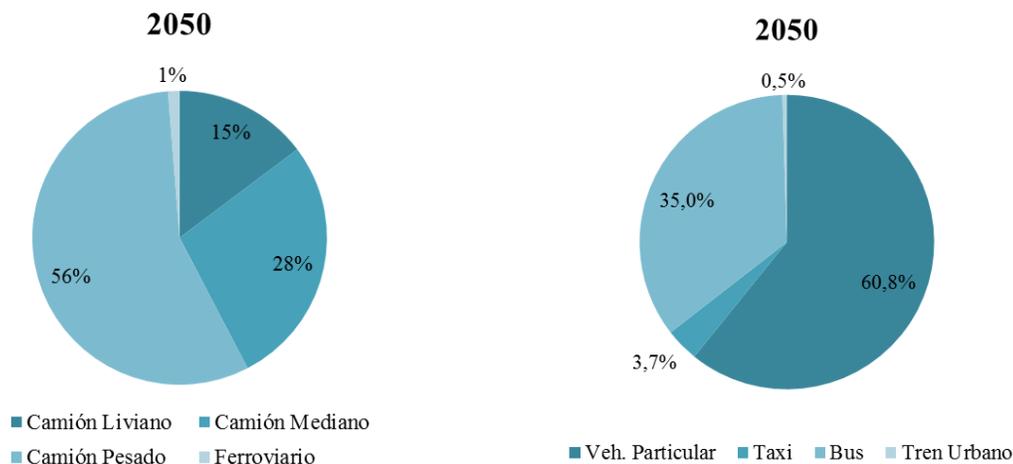


Figura 4 Distribución de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de carga y pasajeros terrestre según categoría año 2050, *PIB Medio Alto*

Para el escenario *PIB Medio Alto*, hacia el 2050 se observa que en el transporte de carga, el 15% de las emisiones de CO<sub>2e</sub> las generan los camiones livianos (1,7 millones de tCO<sub>2e</sub>), 28% por camiones medianos (3,3 millones de tCO<sub>2e</sub>), 56% por camiones pesados (6,7 millones de tCO<sub>2e</sub>) y solo el 1% el modo ferroviario (0,15 millones de tCO<sub>2e</sub>). En relación al transporte de pasajeros, se observa que hacia el 2050 el 60,8% de las emisiones de CO<sub>2e</sub> se generan por vehículos particulares (26,6 millones de tCO<sub>2e</sub>), 35% los buses (15,3 millones de tCO<sub>2e</sub>), 3,7% los taxis (1,6 millones de tCO<sub>2e</sub>) y solo el 0,5% el tren subterráneo (0,2 millones de tCO<sub>2e</sub>).

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Se desarrollaron sensibilidades a los modelos respecto a aquellas variables consideradas importantes para el cálculo de emisiones y que no disponían de una buena base a nivel de información local. Los tipos de análisis realizados fueron los siguientes:

- Subsector transporte de carga terrestre: se variaron los parámetros de partición modal de carga (TKM) entre el modo ferroviario y camión. También se modificó la partición en la categoría camión, entre los tipos de operación urbano e interurbano. Finalmente, se varió el valor referente a las tasas de carga ferroviaria y de camiones.
- Subsector transporte de pasajeros: se variaron las particiones modales entre las categorías vehículo particular y buses. También se modificaron las tasas de ocupación para la categoría vehículo particular. Finalmente, se evaluó el modelo con una partición modal distinta o alternativa<sup>4</sup> definida a partir de la información histórica observada en el periodo 1998-2006.

De todos los casos analizados de manera aislada, el caso de evaluar el modelo con una partición modal alternativa para el transporte de pasajeros es el que impacta de mayor manera al global de las emisiones del sector transporte. Esta nueva partición modal, denominado como escenario A.3 en el informe (para más detalle ver Anexo K), implica un incremento en las emisiones totales del sector transporte de 14,7% al año 2030 respecto a la situación de CSR, para el escenario *PIB Medio Alto* (ver Tabla 2)

Tabla 2 Emisiones del sector transporte con partición modal alternativa ( A.3), escenario *PIB Medio Alto*

ESCENARIO	CO <sub>2e</sub> [ton/año]		
	2007	2020	2030
CSR	19.620.083	30.591.062	46.400.147
A.3	19.917.421	33.880.189	53.241.937

Los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte bajo la condición de partición modal alternativa (A.3), se presentan en la Tabla 3 según los distintos escenarios de PIB.

<sup>4</sup> El modelo para el caso base consideró una partición modal constante para el periodo 2007-2050 a partir de los observado en el último año 2006

Tabla 3 Emisiones del sector transporte con partición modal alternativa (A.3)

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.826.562	30.369.327	42.933.217	77.413.936
PIB Medio Alto	19.917.421	33.880.189	53.241.937	91.893.957
PIB Medio Bajo	19.917.421	30.745.737	43.598.079	78.728.017
PIB Optimista	19.917.421	37.674.398	66.931.237	101.835.581
PIB Pesimista	19.917.421	28.115.514	36.573.471	57.493.603

Las trayectorias de emisiones del sector para los cinco escenarios de PIB bajo la condición de escenario A.3 se presenta en la Figura 5.

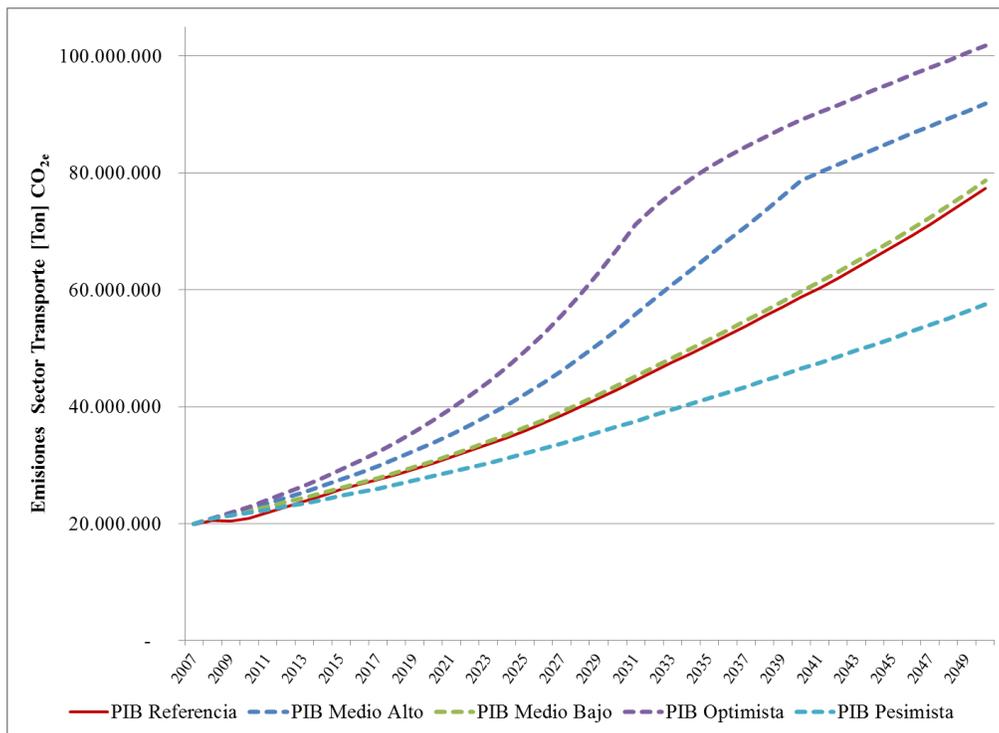


Figura 5 Emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB, Escenario A.3

## **PRINCIPALES CONCLUSIONES**

Se determinaron y proyectaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el sector transporte a nivel nacional para el período 2007-2050. Hacia el año 2030, las emisiones para el sector alcanzarían 46,6 millones de tCO<sub>2e</sub> para el caso base y 53,2 millones de tCO<sub>2e</sub> bajo la condición de partición modal alternativa (A.3). Esto representa un incremento respecto al año 2007 de 1,36 veces y 1,67 veces para el caso base y para el caso A.3, respectivamente.

En relación a los modos caminero y ferroviario, se desarrolló un nuevo enfoque metodológico para la estimación de emisiones el cual está basado en la proyección la demanda de transporte, ya sea de carga o de pasajeros, y no en la proyección del parque vehicular y consumo energético asociado (como había sido abordado en estudios previos del sector).

Los modelos desarrollados para estimar las emisiones de GEI, según sea la demanda de transporte de carga o transporte de pasajeros, representan un aporte para el sector transporte en términos metodológicos y de recopilación de información a nivel local. Además, este enfoque permite modelar de manera más representativa escenarios de mitigación de GEI, por lo que también dichos modelos representan un aporte para las etapas futuras del proyecto MAPS-Chile.

Los resultados de emisiones de GEI obtenidos en el presente estudio para el sector transporte fueron comparados con resultados provenientes de inventarios nacionales previos: INGEI<sup>5</sup> 2006 y el inventario 2005 de la RM, ambos del Ministerio de Medioambiente. El inventario INGEI 2006 presentó proyecciones de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte al 2025 las cuales resultaron ser 2,8% menores a los valores obtenidos en el 2025 para el presente estudio en el escenario *PIB de Referencia*.

En general, los resultados obtenidos en el presente informe para estimar y proyectar las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte están dentro de los órdenes de magnitud de inventarios generados en estudios previos nacionales para el sector, tanto en términos de magnitud de emisiones generadas por modo como en las tendencias proyectadas.

Las diferencias identificadas indicaron que el sector caminero tiene un crecimiento más amortiguado que los inventarios previos para el sector transporte. Esto se explica por el tratamiento metodológico, pues el nuevo enfoque no está directamente ligado al parque vehicular, que crece sostenidamente en el tiempo, sino con la demanda real de transporte, ya sea de carga o de pasajeros. Al asumir que el parque vehicular crece y que entonces, todo el parque se mueve y genera emisiones, puede sobreestimar el consumo de combustible y en consecuencia las emisiones, lo cual no necesariamente ocurre al incorporar variables como tasa de ocupación por tipo vehicular en un modelo basado en la demanda de pasajeros, por ejemplo.

---

<sup>5</sup> INGEI: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero

## 1 Introducción

El presente documento corresponde al *Informe Final* desarrollado por **Sistemas Sustentables** para el estudio “**Escenario Línea Base 2007 o Crecimiento Sin Restricciones de Emisiones de GEI para el Sector de Transporte y Urbanismo**” solicitado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Dicho estudio se enmarca dentro de las actividades del proyecto MAPS-Chile, fase 1, cuyo marco general se describe a continuación.

### 1.1 Iniciativa MAPS

El origen de la iniciativa MAPS (*Mitigation Action Plans and Scenarios*, por sus siglas en inglés) se remonta al proyecto “Escenarios de Mitigación de Largo Plazo” desarrollado en Sudáfrica entre 2005 y 2008. El proyecto resultó en un conjunto de escenarios de mitigación de emisiones para orientar las decisiones y contribuir a una postura del país frente a las negociaciones internacionales que se llevarían a cabo en Copenhague. Fruto de positivas evaluaciones nacionales e internacionales del proceso y de los resultados del proyecto, el año 2010 surgió la iniciativa MAPS.

MAPS es un programa de trabajo para apoyar a países en desarrollo a elaborar planes que sean compatibles con los desafíos climáticos asociados al cambio global. Es una iniciativa sudafricana liderada por el Centro de Investigación en Energía de la Universidad de Ciudad del Cabo con la colaboración del Centro *SouthSouthNorth*, y con el financiamiento de la Fundación del Fondo de Inversiones de la Niñez (*Children’s Investment Fund Foundation*, CIFF). Actualmente se desarrollan proyectos MAPS en Colombia, Perú, Brasil y Chile.

Si bien Chile tiene una participación muy menor en las emisiones globales de gases efecto invernadero (GEI), aproximadamente un 0,2%, las emisiones nacionales han experimentado un crecimiento significativo de 232% en el período 1990-2006.

Conscientes de la relevancia del cambio climático y de las necesidades y oportunidades que surgen a partir de su mitigación, el país comunicó en Copenhague el compromiso voluntario de implementar acciones de mitigación de modo de lograr una reducción de 20% por debajo de su trayectoria de emisiones de línea base al 2020, proyectadas desde el año base 2007.

Si bien en el país se han realizado iniciativas tendientes a identificar, cuantificar y proyectar las emisiones nacionales de algunos sectores específicos, no ha habido una iniciativa que integre y consolide información de los diversos sectores (actual y proyectada), que genere escenarios plausibles en el largo plazo, transforme los escenarios en posibles acciones de mitigación, y cuente con el respaldo de la mejor ciencia disponible, bajo un proceso participativo (con actores interesados del sector público, privado, academia, y de

organizaciones no-gubernamentales) facilitado profesionalmente. Esto es lo que el proyecto MAPS-Chile busca realizar.

El proyecto MAPS-Chile es dirigido por un Comité Interministerial en el que participan representantes de los Ministerios de: Relaciones Exteriores, Hacienda, Transportes y Telecomunicaciones, Agricultura, Energía, Minería y Medio Ambiente; este último actúa como Secretaría Ejecutiva del proyecto. Las actividades y decisiones sobre investigación son coordinadas por Rodrigo Palma (U. de Chile) y José Miguel Sánchez (Pontificia U. Católica). El proceso participativo es liderado por Hernán Blanco. La gestión administrativa del proyecto la realiza el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). El proceso participativo considera la implementación de un Grupo de Construcción de Escenarios (GCE) y de Grupos Técnicos de Trabajo. El GCE está compuesto por un conjunto de expertos que acompañarán el proyecto y definirán un conjunto de escenarios y opciones de mitigación (no vinculantes) para acciones futuras y que sirven como apoyo para las decisiones sobre políticas y enfoques de planificación.

## 1.2 Estrategia de Investigación

La Figura 1.1 describe el esquema metodológico del proceso de investigación de MAPS-Chile. Este proceso ha tomado como referencia la experiencia del proyecto MAPS en Sudáfrica. Sin embargo, se han introducido modificaciones tendientes a incorporar las características propias de Chile: sectores a considerar, aspectos transversales a los sectores, tipos medidas de mitigación, etc.

En primer lugar, se identifican los principales sectores a ser considerados: generación/transporte de electricidad, minería y otras industrias, transporte y urbanismo, otros sectores como comercial-residencial-público y emisiones de procesos productivos, agropecuario forestal y cambio de uso del suelo, y residuos. Para cada uno de estos sectores se requiere de una modelación sectorial que permita representar las condiciones actuales de operación del sector y de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del mismo. Asimismo, se requiere de la capacidad de proyectar la actividad y crecimiento del sector en los horizontes de tiempo del proyecto. Lo anterior incluye la posibilidad de representar la adaptación que seguirán los distintos sectores. Esta proyección debe incluir la posibilidad de incorporar acciones de mitigación específicas en escenarios futuros sujetos a incertidumbres de distinto tipo (precios de combustibles, desarrollos tecnológicos, hidrología, etc.).

Esta modelación no puede ignorar las interrelaciones entre sectores y los efectos del conjunto en la actividad económica del país. Por último, se espera que la representación de la actividad de cada sector también permita obtener información de otro tipo de efectos ambientales o externalidades (contaminantes locales, uso de suelo, empleo local, etc.). A través del uso de indicadores de carácter económico, ambiental y social, los distintos escenarios evaluados serán analizados desde el punto de vista de una evaluación estratégica. Esta evaluación permite disponer de evidencia que sirva de base a la toma de decisiones respecto de las acciones de mitigación que emprenda el país.

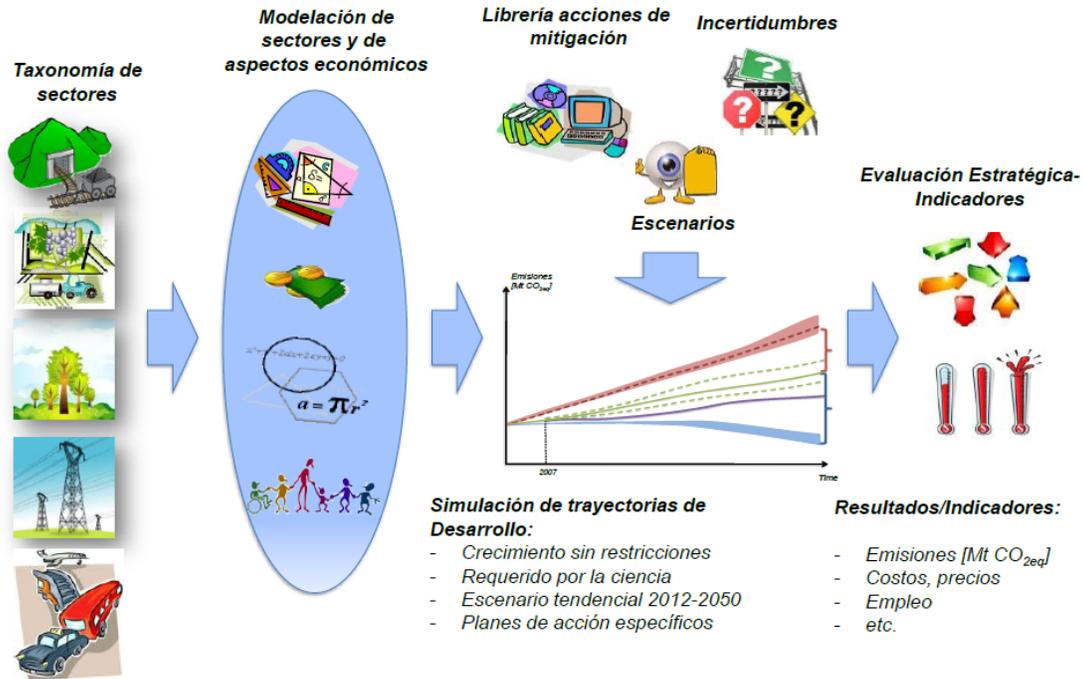


Figura 1.1 Esquema metodológico del proceso de investigación MAPS-Chile

El proyecto MAPS-Chile busca estudiar distintos escenarios de proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero, relevantes para poder generar la evidencia necesaria sobre distintos cursos de acción que pueda seguir el país. Específicamente, se proyectará una serie de trayectorias de emisiones a través de resultados de investigación, modelación y simulación. La Figura 1.2 representa el conjunto de trayectorias que serán analizadas durante el proyecto completo.

Con línea rosada se representa el escenario de emisiones según las tendencias de desarrollo que existían al año 2007, donde no se consideran acciones especiales de mitigación de GEI. A este escenario se le ha llamado Línea Base o Crecimiento sin restricciones. Este escenario es de relevancia, ya que se relaciona con los compromisos voluntarios adquiridos por el país en el marco de las negociaciones internacionales sobre cambio climático (año de inicio 2007). La franja rosada busca representar las incertidumbres asociadas a las proyecciones. Dicha franja es el objeto del presente estudio, particularmente para el sector transporte.

Por su parte, la línea celeste representa el escenario de estabilización de las emisiones a nivel país con el objeto de cumplir con los requerimientos globales planteados por la ciencia para el control del cambio climático. Esta franja busca reflejar la forma en que es factible interpretar los requerimientos globales de reducción de emisiones a una escala país. A este escenario se le ha llamado Requerido por la Ciencia.

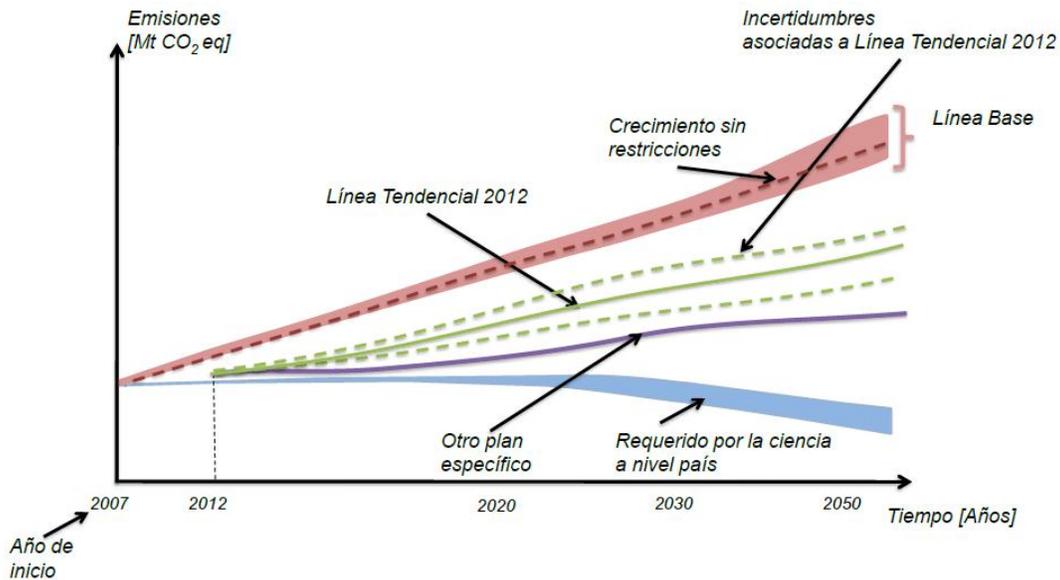


Figura 1.2 Escenario de Proyección de Emisiones

Entre los 2 escenarios anteriormente descritos, se puede buscar cualquier trayectoria posible de reducción de emisiones con respecto a la Línea Base o Crecimiento sin restricciones. Por último, la Línea Tendencial 2012, en color verde, corresponde al escenario más plausible de emisiones, tomando en cuenta las medidas de mitigación que actualmente se encuentran implementadas y en evaluación para el país.

Junto con la proyección de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes, se espera poder proyectar distintos indicadores económicos, ambientales y sociales del desarrollo del país bajo los distintos escenarios.

El proyecto MAPS-Chile será llevado a cabo en 3 fases. Durante la fase 1 se hará la proyección del escenario Línea Base o Crecimiento sin restricciones y el escenario Requerido por la Ciencia. En la fase 2 se proyectarán el escenario Línea Tendencial 2012 y las distintas medidas de mitigación para todos los sectores. Finalmente, en la fase 3 del proyecto se hará una difusión de los principales resultados del proyecto.

### 1.3 Objetivo del Estudio

El **objetivo general** del presente estudio es proyectar las emisiones de gas efecto invernadero (GEI) para el sector Transporte a nivel nacional para el escenario Línea Base o Crecimiento Sin Restricciones (CSR), en el horizonte de evaluación 2007-2050, considerando como año de inicio el año 2007 y detallando los resultados para los años 2020, 2030 y 2050.

Se consideran los siguientes **objetivos específicos** a desarrollar por el Consultor:

1. Disponer de un modelo validado en común acuerdo con la contraparte técnica para representar y simular el sector específico.
2. Asegurar la coherencia de los modelos propuestos y de los datos básicos utilizados, con aquellos utilizados en los otros sectores modelados.
3. Conocer la información disponible y respaldada, que representen las emisiones del año 2007 y los parámetros requeridos para la proyección del escenario Línea Base o Crecimiento sin Restricciones (CSR).
4. Completar los vacíos que deje la información disponible a 2007, con información adicional validada por la contraparte técnica, de manera de proyectar adecuadamente el escenario Línea Base o CSR. Se requiere especificar los supuestos considerados para las principales variables en base a la información adicional.
5. Proyectar las emisiones de GEI para el escenario Línea Base o CSR a nivel nacional, con un horizonte de evaluación 2007-2050, detallando los resultados para los años 2020, 2030 y 2050.
6. Usando la misma metodología de proyección del punto 5, y con los datos reales de las variables relevantes para la proyección, estimar las emisiones del sector para el periodo 2007-2011. Explicar las diferencias observadas en relación a proyección del escenario Línea Base o CSR.

## 1.4 Visión del Sector Transporte Nacional hacia el 2006

Consideración que la proyección de la línea base o de crecimiento sin restricción de emisiones de GEI para el periodo 2007-2050 contemplada en este estudio debe considerar la información disponible y existente hacia el año 2006, es relevante contextualizar al sector transporte nacional y conocer la existencia o no de acciones concretas para la mitigación de GEI hacia ese año.

En este sentido, la presente sección describe la visión nacional respecto al sector transporte y las distintas estrategias que se definieron hacia el año 2006 para la reducción de emisiones del sector, de manera de entender la situación local y la visión futura respecto a proyectar emisiones de GEI.

### 1.4.1 Contaminantes globales

En relación a estrategias para reducir emisiones globales o GEI del sector transporte, hacia el 2006 no existían programas ambientales que impusieran metas concretas a los distintos modos: caminero, ferroviario, aéreo y marítimo. Sin embargo, en el año 2000 Chile entregó a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) su *Primer Comunicado Nacional* el cual contiene un inventario de GEI, información de vulnerabilidad, impacto y opciones de adaptación al cambio climático, así como alternativas de mitigación de las emisiones de estos gases. Las principales conclusiones y necesidades de acción generadas a partir del *Primer Comunicado Nacional* estuvieron enfocadas al sector silvoagropecuario y la disponibilidad del recurso hídrico y no hay acciones concretas definidas para el sector transporte. Sin embargo, el inventario reportado en dicho documento señala que el transporte es el subsector de energía con más emisiones de GEI en el período 1984-2006, y dentro de éste, los vehículos livianos tienen la mayor participación.

Posteriormente, en el 2007 se publicó el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2008-2012, donde se propone una serie de lineamientos para la mitigación de gases de efecto invernadero para cada subsector, como es definido el transporte en este caso. Los lineamientos son generales y se basan en desarrollar estudios durante los años 2008-2012 para actualizar los inventarios de GEI, evaluar e identificar potenciales de mitigación y, posteriormente, evaluar escenarios, todo lo anterior por cada subsector. Nuevamente, no se establecen acciones concretas para disminuir las emisiones globales del sector sino que se define un esquema de trabajo para identificarlas y evaluarlas a nivel de estudios.

Hacia el 2006, los vehículos livianos ya eran considerados uno de los mayores responsables de combustibles fósiles y, en consecuencia, de las emisiones de GEI en el sector transporte. Hasta ese año en Chile no existía una legislación que definiera metas de consumo de combustible o rendimiento para los vehículos nuevos que ingresaran al parque. Sin embargo, si bien la adopción de estas políticas de mejoras en rendimiento impulsadas en otros países fabricantes de vehículos pudiera generar un impacto en los vehículos vendidos

en Chile, no existía garantía de que la eficiencia del promedio anual del parque de vehículos livianos ingresados fuese mejorando progresivamente. De hecho, hacia el 2006, el análisis de promedios de CO<sub>2</sub> de los modelos homologados en Chile indicaban un aumento en la oferta de vehículos SUV<sup>6</sup> (de cilindradas por sobre los 2.000 cc) y *city cars* (por bajo los 1.400 cc), en desmedro de los vehículos de la gama de cilindradas intermedia, produciendo un efecto neto nulo<sup>7</sup>. En este contexto, y dada la política tributaria existente hacia el 2006 con impuestos diferentes para el combustible diésel y gasolina, se produciría un incentivo al uso del diésel y, en consecuencia, a adquirir vehículos con dicha tecnología, como los SUV que por tener mayor cilindrada poseen mayores tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido dentro de la gama de vehículos livianos.

En resumen, en materia de reducción de emisiones globales para el transporte hacia el 2006, el país se encontraba iniciando recién la etapa de identificación de sectores/subsectores (participación en las emisiones, potenciales de mitigación) y aún no se definían acciones concretas que afectarían particularmente al transporte post 2006.

#### 1.4.2 Contaminantes locales

Hacia el 2006, la mayor preocupación de las autoridades nacionales tenía relación a los altos niveles de emisiones de contaminantes locales que estaban afectando a las principales ciudades del país y los efectos en salud. Según los antecedentes del PPDA<sup>8</sup> 2004 declarados por la CONAMA<sup>9</sup>, el 41% de las emisiones de MP<sub>10</sub> eran originadas por el sector transporte, teniendo los vehículos livianos la mayor participación (18%), seguido de los camiones (15%) y buses (8%).

En este contexto, las iniciativas para reducir emisiones post 2005 se enfocaron a contaminantes locales (MP<sub>10</sub> y NO<sub>x</sub>, principalmente) y en el modo caminero, siendo la Región Metropolitana (RM) la base de PPDA para la definición de entrada de normas de vehículos más limpios, mejoras en la calidad de combustibles, establecer programas de inspección y mantención y desarrollar medidas de gestión del transporte, las cuales posteriormente se llevarían al resto del país.

La Tabla 1.1 indica la evolución de normas de ingreso de vehículos nuevos para la RM que se disponía hacia el 2006 según el PPDA 2004.

---

<sup>6</sup> SUV: Sport Utility Vehicle

<sup>7</sup> Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2010-2020, Ministerio de Energía

<sup>8</sup> Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica

<sup>9</sup> Comisión Nacional de Medioambiente, actual Ministerio de Medioambiente

Tabla 1.1 Evolución normas de ingreso vehículos nuevos, R.M.

<b>Categoría Vehicular</b>	<b>Estándar</b>	<b>Fecha Ingreso RM</b>
Vehículos Livianos Particulares	EPA 83	Septiembre 1992
	EPA 91	Septiembre 1998
	EPA 94 Tier 1 Federal ó EURO III	Enero 2005
	EPA 94 Tier 1 California ó EURO IV (Veh. Diesel)	Septiembre 2005
Vehículos Livianos Comerciales	EPA 83	Septiembre 1994
	EPA 91	Septiembre 1998
	EPA 94 Tier 1 Federal ó EURO III	Enero 2005
Buses	EPA 91 ó EURO I	Septiembre 1993
	EPA 94 ó EURO II	Septiembre 1996
	EPA 98 ó EURO III	Septiembre 2002
Camiones	EPA 91 ó EURO I	Septiembre 1994
	EPA 94 ó EURO II	Septiembre 1998
	EPA 98 ó EURO III	Julio 2006

En general hacia el 2006, el criterio para definir cuándo se adoptarían mejores normas de emisión para vehículos nuevos consistió en mantener un desfase de dos a cinco años con respecto a la situación de U.S.A o Europa, a la espera del período de estabilización de mercados y análisis de resultados internacionales. En el caso del estándar Euro III para vehículos livianos y medianos estuvo disponible en Europa a partir del 2001 y en Chile recién se instauró en el 2005. En cuanto a los vehículos pesados, la misma norma se implantó en Europa en el año 2002 y en Chile se exigió en el 2006.

Acompañado de la definición de entrada de normas, el país ha debido producir combustibles con bajo contenido de Azufre como requerimiento de altos estándares EURO y EPA. En el 2004 ya se disponía de diésel con menos de 50 ppmS en la RM y desde el 2007 se debía contar con diésel de menos de 350 ppmS en el resto de las regiones.

## 2 Revisión de Antecedentes

El capítulo a continuación corresponde a la revisión de modelos de emisión enfocados al sector transporte que contemplen proyecciones de largo plazo. El propósito de esta revisión es recopilar antecedentes metodológicos tanto de modelos internacionales como nacionales para definir la mejor alternativa de proyección de emisiones del sector, acorde a las nuevas tendencias y a la información local disponible.

La sección 2.1 contiene una recopilación de estudios internacionales y la sección 2.2 hace referencia a los estudios nacionales desarrollados en los últimos años. En la sección 2.3 se presenta un resumen respecto a las perspectivas del transporte en el futuro y finalmente, la sección 2.4 corresponde a un análisis crítico de la información disponible a nivel nacional para adaptar las distintas alternativas revisadas en la sección 2.1.

### 2.1 Modelos Internacionales

A continuación se resumen los aspectos metodológicos relevantes de 6 documentos referidos a modelar emisiones del sector transporte.

#### 2.1.1 2050 Pathways analysis<sup>10</sup>

Este estudio pertenece al Departamento de Energía y Cambio Climático de Reino Unido.

#### **Contexto**

Este estudio contempló una herramienta para la toma de decisiones que apoyara al Reino Unido a enfrentar las medidas que los lleven a una economía segura y de bajo carbono hacia el año 2050. La herramienta “2050 Pathways Analysis” permite evaluar conjuntos de medidas tal que se logre alcanzar una reducción de 80% de emisiones de GEI al 2050 respecto a sus emisiones base del año 1990, y asegurando satisfacer las demandas energéticas proyectadas a ese período.

El objetivo de esta herramienta no es definir la estrategia final al 2050 sino que permitir un mejor manejo de la incertidumbre a largo plazo, y así evitar decisiones que sean incompatibles con la meta de emisiones al 2050.

---

<sup>10</sup> Department of Energy and Climate Change, United Kingdom. 2050 Pathways Analysis.

### **Aspectos metodológicos relevantes**

Para el uso de la herramienta se definen los distintos sectores relevantes de análisis donde se encuentra el sector transporte. Por cada sector se establecen 4 escenarios o trayectorias posibles de desarrollarse al 2050.

Para el caso del sector transporte, los factores que se establecen como responsables del uso de energía y de las emisiones de CO<sub>2</sub> son el nivel de actividad por viajes, la distribución modal, el tipo de tecnología, la eficiencia de cada tecnología, y otros aspectos culturales tales como la tasa de ocupación y el tipo conducción (agresiva o eficiente).

Dos variables son consideradas claves en los supuestos para definir las 4 trayectorias: población y PIB. La modificación de las tasas de crecimiento de estas dos variables debiera tener un potencial importante en los niveles de esfuerzos requeridos para reducir las emisiones de GEI al 2050.

La definición de las trayectorias y los cálculos para el sector transporte consideraron un análisis actual del sector en los últimos años (1997-2007). Se menciona que el sector transporte tiene gran interacción con otros sectores que no siempre son posibles de capturar. Por ejemplo, en Reino Unido un porcentaje significativo de viajes de carga son para transportar energéticos (carbón, combustibles) y materiales de construcción. Esto implica que los cambios en las trayectorias de estos sectores generan cambios en el transporte de carga que no son reflejados en los cálculos de la herramienta por su complejidad.

Para definir los distintos escenarios para este sector, se modificaron 3 factores principales:

- Cantidad de km recorridos según modo y según sea transporte de carga o de pasajeros
- Cambios en tecnología y fuentes de energía (vehículos eléctricos, híbrido, etc.)
- Cambios en eficiencia, dado por tecnología o por tasas de ocupación

En general los escenarios o trayectorias se abordan parametrizando en porcentajes (%) la penetración de cualquiera de los ítems mencionados anteriormente, es decir variaciones en cambio modal dado por los km, penetración de ciertas tecnologías, mejoras en eficiencia, etc.

La metodología de cálculo de emisiones depende de si es transporte de carga o transporte de pasajeros. Cuando es transporte de pasajeros, la variable principal son los kilómetros recorridos por persona anualmente y el resto de las otras variables se parametrizan a partir de este valor (participación por modo, participación por tecnología, etc) haciendo finalmente la expansión total multiplicando por la población. Luego es fundamental conocer la demanda de kilómetros por persona, tanto histórico como proyecciones, para replicar esta metodología de cálculo. Las emisiones se obtienen de multiplicar los factores de emisión por el nivel de actividad dependiendo del modo.

Para transporte de carga, la variable explicativa es el consumo energético, litros de combustible o electricidad consumida, y los veh-kilómetros recorridos anualmente. Las emisiones se obtienen en forma análoga que el caso de transporte de pasajeros.

Finalmente, a modo informativo se evalúa la participación de la aviación internacional y de embarcaciones internacionales pero no son contabilizados dentro de las trayectorias que participan en las medidas para cumplir la meta de reducción.

### **Comentarios generales**

Este estudio no se basa en generar una metodología de proyección sino más bien en formular una herramienta que permita evaluar y definir un conjunto de escenarios por sector que permitan cumplir una meta de reducción de GEI. Incluso, esta herramienta no define una línea base de emisiones al 2050 pues las emisiones bases son las del inventario del año 1990, por lo que no se asume una reducción respecto a una línea base tendencial al 2050, es decir, no se proyecta de manera robusta una línea base de emisiones

Para hacer los cálculos de emisiones la herramienta se basa en proyecciones locales oficiales. Además, asume la evolución fija de ciertas variables como es el caso de PIB y la población.

Las emisiones de la herramienta son solo GEI, por lo que la diferenciación tecnológica es simple y no permitiría tener una buena estimación de emisiones locales.

En el caso de transporte de pasajeros, para replicar un modelo así se deben considerar registros históricos de kilómetros recorridos por persona para luego hacer una proyección de demanda de transporte para pasajeros anual según evoluciona la población. Esto se debe complementar con registros y proyecciones de partición modal. Para el caso de transporte de carga, el método de aproximación es a partir del consumo energético y de los kilómetros recorridos según modo de transporte de carga y no por toneladas transportadas.

A nivel nacional, la información disponible para el sector transporte de pasajeros al nivel utilizado en este estudio no está plenamente desarrollado pues no es posible tener datos históricos con frecuencia anual para todo el país. SECTRA<sup>11</sup> genera las encuestas de Origen Destino donde se pueden obtener número de viajes por modo de transporte caminero y tasas de ocupación. Sin embargo, esta información está disponible para algunas ciudades y no son con frecuencia anuales.

Para el caso de transporte de carga, es posible recopilar información por modo combinando las estadísticas nacionales de consumo energético por modo con las estadísticas de movimiento de carga y kilómetros recorridos disponibles de estudios locales.

---

<sup>11</sup>Secretaría de Planificación de Transportes del Gobierno de Chile

### 2.1.2 Quantifying the energy needs of the transport sector for South Africa

El presente documento describe la metodología utilizada por el South African National Energy Development Institute (SOC) Ltd. para realizar una proyección de largo plazo de la demanda energética del país.

#### **Contexto**

El estudio menciona que para realizar una proyección de largo plazo se requiere una representación precisa de la demanda de transporte de pasajeros y carga bajo diferentes modos de transporte. Además, requiere de proyecciones de demanda futura para pasajeros y transporte, asociado con la demanda de combustibles y los requerimientos de infraestructura.

Los principales objetivos del estudio son los siguientes:

1. ¿Cuáles son las tendencias de mediano-largo plazo en demanda de pasajeros y carga bajo diferentes escenarios?
2. ¿Cuál es la demanda de combustibles líquidos bajo diferentes escenarios?
3. ¿Cuáles son las emisiones asociadas a cada escenario?

#### **Aspectos metodológicos relevantes**

El proyecto está enfocado en el desarrollo de diferentes modelos, que combinados se pueden utilizar para desarrollar escenarios. La demanda futura de energía del sector transporte fue calculada en términos de servicios realizados (energía útil) así como la energía entregada (energía final). Esto permite un análisis de sustitución entre diferentes alternativas de energías y modos., así como la posibilidad de evaluar las mejoras tecnológicas de los vehículos.

En resumen, cinco modelos fueron utilizados en el estudio:

1. Modelo de proyección de parque vehicular.
2. Modelo de tiempo-presupuesto.
3. Modelo de equilibrio general computable.
4. Modelo de demanda de carga.
5. Modelo de demanda de combustible.

El modelo de estimación de parque vehicular fue calibrado por 7 años (2003-2009), y provee una imagen exhaustiva de la línea base del parque y su actividad, desagregada por clase de vehículos y tecnología.

El modelo de parque vehicular incluye estimación de curvas de obsolescencia, ventas de vehículos, kilómetros por vehículo al año para cada categoría vehicular. Se incluye además,

el efecto de la evolución de la eficiencia de combustible durante la vida útil del vehículo. El modelo presenta la estructura de la figura siguiente.



Figura 2.1 Esquema de la estructura del modelo de emisiones

Los supuestos de tasa de ocupación y de factor de carga se consideran críticos para el cálculo de los kilómetros por pasajero y los kilómetros por tonelada recorridas. La información de diferentes modos es escasa por lo que se asumieron valores para las diferentes tasas de pasajeros y carga.

El modelo de tiempo presupuestado por viaje utiliza un valor aceptado internacionalmente de 1,1 horas por persona al día en cualquier estrato social (Schafer&Victor, 2000). Además, el modelo fue desagregado en tres grupos de ingreso representando bajo, medio y alto ingreso. Para la evolución de los grupos de ingreso se utilizó el modelo CGE.

Por otro lado, la demanda energética del sector transporte se modeló para un caso que representa la línea base, y un caso alternativo que asume un número de políticas de ahorro energético.

### **Comentarios generales**

El documento analizado comprende 3 secciones, las primeras dos corresponden a dos papers. El primer paper corresponde al desarrollo de un modelo de parque vehicular calibrado, el segundo corresponde al desarrollo de un modelo de proyección de demanda de pasajeros y de carga hasta el año 2030 presentando los resultados para la Línea Base y un caso alternativo. La tercera sección incluye los comentarios de dos reuniones con *stakeholders* que se realizaron durante el curso del estudio.

El estudio incluye diferentes puntos necesarios de resaltar.

- El modelo de parque incluye una modelación tradicional calibrada con el consumo del sector.
- Se consideran un total de 15 categorías de vehículos motorizados.
- En la modelación utiliza curvas de obsolescencia.
- Se consideran mejoras en la eficiencia de los vehículos nuevos en la proyección.
- Se realizan supuestos para la definición de la tasa de ocupación y los factores de carga.
- Las categorías que se utilizan para proyectar incluyen vehículos a gasolina, diésel, híbridos gasolina, híbridos diésel, gas natural, celdas de combustible y vehículos eléctricos.
- Se considera la variable tiempo presupuestado.
- Como variable final se consideran los kilómetros recorridos por pasajeros y por carga.

Finalmente, los autores del estudio realizan varias sugerencias para mejorar la información utilizada en ambas proyecciones (Parque y consumo).

### 2.1.3 A modelling input into the long term mitigation scenarios process

Este estudio fue desarrollado el año 2007 por el Departamento de Asuntos Ambientales y Turismo de Sudáfrica. A continuación se describe el contexto general en el que se desarrolla, los aspectos metodológicos más relevantes que se pueden rescatar y se realizan comentarios generales en cuanto a su competencia con el presente estudio.

#### **Contexto**

En este estudio se usa el modelo MARKAL (MarketAllocation) desarrollado por la IEA (International Energy Agency). El modelo determina la configuración óptima de un sistema de energía usando como restricciones los recursos disponibles, un arreglo de suministro de energía y el uso de tecnologías, así como un listado de servicios especificados por el equipo a cargo. El modelo busca la configuración óptima del sistema en términos de una función objetiva, minimizando los costos, sujeto a las restricciones ya señaladas.

En este estudio particular se modelaron cinco sectores de consumo incluyendo la Industria, el transporte, la agricultura, el comercio y residencial.

### **Aspectos metodológicos relevantes**

El modelo específico para el sector transporte se enfoca en posibilitar la representación de cambios modales, por ejemplo, desde vehículos privados a buses o trenes. Para el uso del modelo se establece la demanda de pasajero-kilómetro, para el transporte de pasajeros, y en tonelada-kilómetro para el transporte de carga. Los valores asumidos se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 2.1 Tasas de Ocupación por tipo de vehículo

<b>Vehículos de pasajeros</b>	<b>Ocupación (Personas /vehículo)</b>
Buses diésel	35
Taxis a gasolina (minibuses)	10
Taxia a diésel (minibuses)	10
Autos a gasolina	2,1
Autos diésel	2,1
Autos Híbrido (diésel)	2,1
Autos Híbrido (gasolina)	2,1
SUVs diésel	2,1
SUVs gasolina	2,1
Motocicletas	1
<b>Vehículos de carga diésel</b>	<b>Carga (toneladas /vehículo)</b>
Vehículo comercial liviano	3
Vehículo comercial mediano	10
Vehículo comercial pesado	15

Para determinar la eficiencia, en el caso de los vehículos de carga se asume que la mitad de los kilómetros se recorren con toda la carga posible, mientras que la otra mitad lo hacen vacíos. Otro supuesto importante es que el consumo de combustible de un vehículo diésel es 85% lo que consumo un vehículo de gasolina equivalente.

Para los vehículos nuevos se asume un consumo de combustible del 90% de una eficiencia dada con el fin de dar cuenta del ciclo de conducción rural versus el urbano, así como la disminución en dicha eficiencia con el incremento en la edad del vehículo.

Otro aspecto relevante es que el estudio asume, de acuerdo a la experiencia de estudios realizados en Estados Unidos, que los perfiles de compra de vehículos con motores más grande esta desacoplado de los precios del combustible, por lo que si se busca un cambio en la tendencia de consumo y emisiones el gobierno debe intervenir.

Una vez definidas las tasas de ocupación y relaciones de eficiencia entre modos, el estudio se basa en diversas variables de entrada generadas como series temporales que alimentan el modelo. Estas variables son:

- **Producto interno Bruto:** El estudio asume una evolución creciente del PIB hasta llegar a una saturación en 6% el año 2020 para después decrecer de manera progresiva hasta valores cercanos al 2,5% después del año 2050.

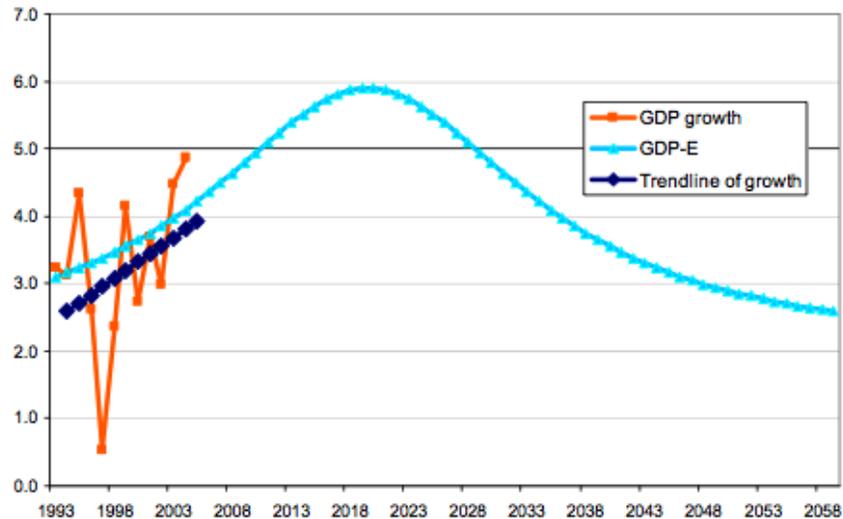


Figura 2.2. Crecimiento del PIB en Sudáfrica (GCP growth), y línea de tendencia proyectada (GDP-E).

- **Proyecciones de población:** El estudio utiliza proyecciones de población mediante un modelo publicado el año 2002 que busca definir las tendencias de esta variable para Sudáfrica.
- **Variaciones tecnológicas:** El estudio se hace cargo de la reducción de costos de nuevas tecnologías en base al aprendizaje durante el proceso de implementación y economías de escala. Las tasas de aprendizaje utilizadas por el estudio se relacionan con el costo decreciente de generación de energía con tecnologías más limpias, sin embargo, no entrega información del costo de nuevas tecnologías en el transporte.
- **Proyección de valor de cambio:** De acuerdo al estudio, al igual que en Chile, el valor de cambio con monedas duras en función de la oferta y demanda de dichas monedas. El estudio determinó proyecciones de tasa de cambio hasta el año 2050 asumiendo como base la tasa de cambio del año 2003 y suponiendo un 2% de incremento anual.
- **Precios futuros de la energía al 2030 de acuerdo a los documentos de la IEA:** De acuerdo con los valores publicados por IEA el año 2006, el estudio asume una proyección del costo del petróleo comenzando con un valor de US\$30 por barril hasta llegar a US\$97 por barril el año 2030. También entrega valores para los costos del Gas y Carbón.
- **Factores de emisión IPCC:** Para la estimación de emisiones de contaminantes locales y globales, el estudio se basa en los valores publicados por IPCC el año 1996.

## **Comentarios generales**

Si bien el estudio señala que se estima la demanda energética para el sector Transporte, sólo hace mención a la metodología de determinación de consumos para el subsector del Transporte Caminero. Sobre esta base, se puede afirmar que la metodología presentada por el estudio, en cuanto a la utilización de la demanda por transporte como elemento explicativo del uso de transporte caminero, representa un avance en el enfoque usual utilizado en estudios previos realizados en Chile. No obstante lo anterior, las tasas de ocupación presentada son constantes en el tiempo y los valores utilizados no representan necesariamente la realidad local por lo que, aplicarlas de manera directa en la metodología definida para el presente estudio significaría un supuesto demasiado grueso. Se deben buscar tasas de ocupación local para tener una mejor aproximación al caso Chileno.

En cuanto a los elementos explicativos que alimentan el modelo utilizado para determinación del uso de energético, se puede afirmar que las variables PIB, Población, Variaciones Tecnológicas y Precios Futuros de la energía ya han sido aplicadas con éxito en estudios previos a nivel local.

Es destacable el hecho que se asume un PIB variable en el tiempo y su aplicación al presente estudio implica un enfoque nuevo ya que en las proyecciones previas el PIB se asume con un crecimiento constante en el tiempo.

En cuanto al precio futuro de la energía, la IEA ya ha publicado nuevas estimaciones de precio. Al año 2035, de acuerdo a las proyecciones publicadas por este organismo el año 2010, el precio del barril de petróleo debiese alcanzar niveles de US\$135 por barril, 40% superior a la estimación que publica la misma IEA el año 2007. Esto implica que se deben usar valores de proyección más actualizados que los utilizados en el estudio sudafricano.

### 2.1.4 World Energy Model (WEM), methodology and assumptions

#### **Contexto**

Desde el año 1993 la Agencia Internacional de Energía (IEA) ha realizado proyecciones energéticas y de emisiones a largo plazo utilizando el modelo WEM, esto se refleja anualmente en la publicación World Energy Outlook el cual presenta escenarios de tendencias futuras en temas relativos a la energía. WEM fue desarrollado por la Agencia para este objetivo y ha evolucionado anualmente desde su construcción inicial.

El modelo es una construcción matemática de gran escala diseñada para replicar cómo funcionan los mercados de la energía y es la principal herramienta utilizada para generar proyecciones detalladas, sector por sector y región por región para varios escenarios incluyendo el Escenario de Referencia. Desarrollado a lo largo de muchos años, el modelo consta de seis módulos principales: la demanda de energía final (con sub-modelos que cubren los servicios residenciales, la agricultura, la industria del transporte, y el uso no energético), la generación de energía y calor; refinería/petroquímica y centros de

transformación de otros tipo; suministro de combustibles fósiles, emisiones de CO<sub>2</sub> e inversión.

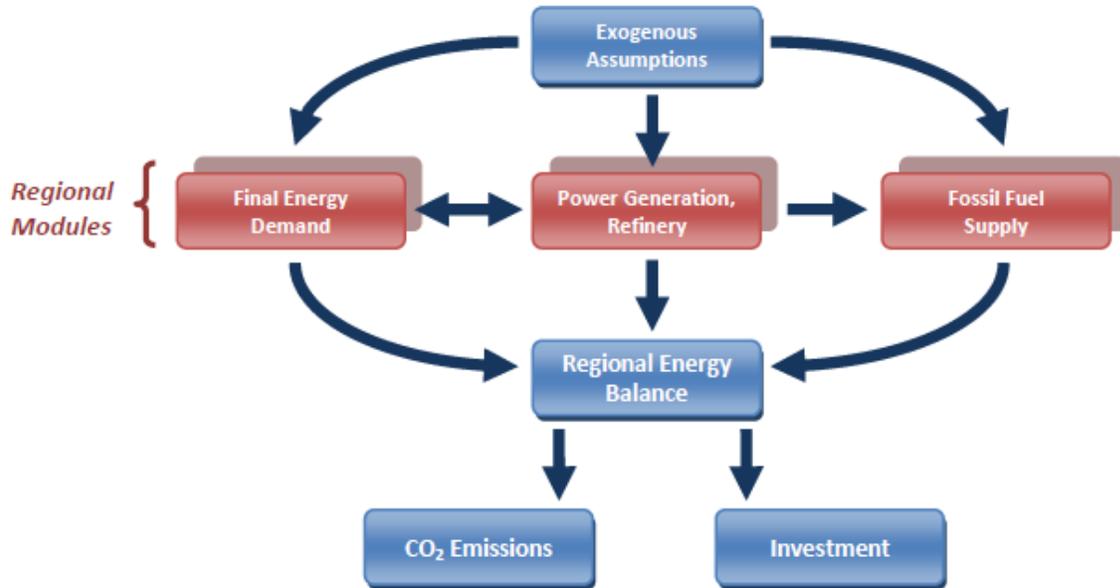


Figura 2.3 Esquema metodológico general

### Aspectos metodológicos relevantes

Es un modelo matemático compuesto de seis módulos principales: demanda final de energía, generación de energía, refinería y otras transformaciones, suministro de combustibles fósiles, emisiones de CO<sub>2</sub> e inversión.

El supuesto exógeno principal se refiere al crecimiento económico, la demografía, los precios internacionales de los combustibles fósiles y los avances tecnológicos. El consumo de electricidad y los precios de la electricidad dinámica vinculan la demanda final de energía y módulos de generación de energía. El modelo de proyectos de refinería de rendimiento y los requisitos de capacidad según la demanda mundial de petróleo. La Demanda primaria de los combustibles fósiles sirve como entrada para los módulos de alimentación. Balances completos de energía se establecen a un nivel regional y las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada región se calcula utilizando factores derivados del carbono.

Más específicamente el WEM está diseñado para analizar:

- Perspectivas energéticas mundiales: incluyendo tendencias de la demanda, disponibilidad de la oferta y restricciones, el comercio internacional y balances energéticos por sectores y combustible de mediano y largo plazo.

- Impacto ambiental del uso de la energía: las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión de combustibles se derivan de las proyecciones detalladas del consumo de energía.
- Efectos de las medidas de política y los cambios tecnológicos: escenarios alternativos, analizan los efectos de las medidas políticas y desarrollos tecnológicos en la demanda de energía, el suministro, el comercio, las inversiones y emisiones.
- La inversión en el sector energético: el modelo evalúa las necesidades de inversión en la cadena de suministro de combustibles necesario para satisfacer la demanda de energía proyectada de largo plazo. También evalúa la demanda y las necesidades de inversión en escenarios alternativos.

### ***Descripción del módulo transporte.***

La demanda final de energía del sector transporte son modeladas por uso final, específicamente en detalle por tipo de vehículo y combustible. Este módulo consiste en varios sub-modelos que cubren el transporte de carretera, aéreo, ferrocarril y marítimo. WEM incorpora un enfoque bottom-up detallado para el sector del transporte en todas las regiones del WEM.

En cada región, los niveles de actividad para cada modo de transporte se estiman econométricamente en función de la población, PIB y precio. La actividad de transporte se vincula a través de la elasticidad precio del costo del combustible por kilómetro, lo que se estima para todos los modos excepto para los autobuses, trenes de pasajeros y de navegación interior. Esta elasticidad cuenta para el efecto rebote de mayor uso del automóvil seguido de una mayor eficiencia de combustible.

La intensidad energética es proyectada por modo de transporte, teniendo en cuenta los cambios en eficiencia energética y en los combustibles.

### ***Transporte de carretera***

La documentación solo permite interiorizarse en la proyección en carretera, en ella la demanda de energía se divide entre vehículos livianos de pasajeros, comerciales ligeros, autobuses, camiones (medianos y pesados), y vehículos de dos y tres ruedas. Además el MEM contiene sub-modelos detallados del parque vehicular total y la flota de vehículos de pasajeros.

El modelo permite la sustitución de combustibles y sistemas de propulsión alternativos en todos los subsectores del transporte por carretera.

Parque liviano: está basado en una función de Gompertz en forma de S, propuesta en el paper titulado “Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030” de Dargay. Este modelo define el número de vehículos basado en el ingreso per cápita y dos variables: el nivel de saturación y la velocidad a la que se alcanza el nivel de saturación donde se utiliza una ecuación que explica el número de vehículos por cada mil personas en función de parámetros que definen la forma de la función y la saturación. El modelo

presentado en dicho paper será analizado a continuación del WEM donde se describirá más detalladamente.

### ***Vehículos livianos de pasajeros***

Para proyectar la penetración de cada tecnología vehicular en el parque de vehículos livianos se utiliza un modelo de costos que guía la elección de las tecnologías y los combustibles como resultado de su relación costo-competitividad. La herramienta actúa sobre las ventas de nuevos vehículos livianos de pasajeros y determina la participación de cada tecnología individual en los vehículos livianos de pasajeros nuevos vendidos en un año dado.

La herramienta utiliza una función logit para estimar las futuras elecciones en vehículos livianos de pasajeros. La participación por tipo de vehículo liviano de pasajeros depende del costo anual del vehículo incluyendo el uso de combustibles, velocidad a la que un vehículo liviano de pasajeros entrará en el mercado y el porcentaje de penetración del año base.

La base de datos de costos en la herramienta se basa en un análisis de los costos de la tecnología actual y futura de los diversos mecanismos de potencia y opciones de combustible, que comprende las siguientes opciones de tecnología: motor convencional de combustión interna, vehículos híbridos, híbridos Plug-in, coches eléctricos con distintos intervalos de conducción, vehículos de células de combustible de hidrogeno.

El modelo tiene en cuenta los costos y mejoras en la eficiencia de corto y largo plazo en el transporte de personal que distinguen numerosas opciones de motor y de otras alternativas como por ejemplo neumáticos, aerodinámica, reducción de personal, etc. Además, utiliza las proyecciones de los costos de las tecnologías clave, tales como las baterías y pilas de combustible. El ritmo de la reducción de los costos de la tecnología se calcula utilizando curvas de aprendizaje con diferentes niveles de aprendizaje. El análisis de costos se basa en una revisión detallada de las opciones tecnológicas para reducir el consumo de combustible.

#### **2.1.5 Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030**

##### **Contexto**

Paper desarrollado por Joyce Dargay, DermotGately y Martin Sommer el año 2007 como una segunda etapa de desarrollo del modelo de proyección de parque, en particular en esta versión se relaja el supuesto de niveles de saturación común para todos los países y la simetría de respuesta frente a variaciones del producto per cápita. En el paper se desarrolla el modelo para 45 países con datos entre los años 1960 y 2002, abarcando el 75% de la población mundial.

### Aspectos metodológicos relevantes

El paper desarrolla un modelo matemático dinámico para la proyección de la cantidad de vehículos cada mil habitantes, guiado principalmente por el PIB per cápita pero considerando adicionalmente los conceptos de saturación, asimetría respecto de la variable explicativa y desfase de respuesta a los efectos de las variaciones del producto per cápita.

Dargay estima que existe una relación entre el nivel de PIB per cápita y el crecimiento del parque vehicular, este crece relativamente lento en los niveles más bajo de producto, luego duplica su velocidad en los niveles medio de ingreso (entre US\$3.000 y US\$10.000 per cápita) para luego crecer tan rápido como el ingreso hasta alcanzar un nivel de saturación asintótico. Este comportamiento es definido como una función Gompertz. A continuación se presenta esta función junto a la serie de parque para un conjunto de países.

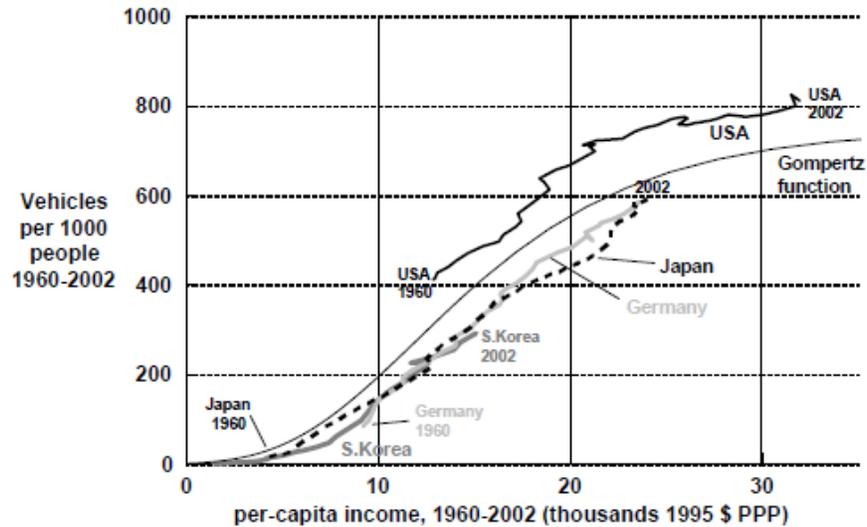


Figura 2.4 Relación entre PIB per cápita y crecimiento del parque vehicular

El modelo considera el nivel de saturación, este es una función de la densidad de población y el nivel de urbanización, o porcentaje de la población en zonas urbanas de cada país. Junto a esto establece como referencia y límite de saturación el nivel alcanzado en los Estados Unidos (aproximadamente 850 vehículos cada 1000 habitantes).

Otra efecto considerado por el modelo es el ajuste a los rezagos, el cual refleja el desfase entre los incrementos del PIB y el efecto sobre el parque vehicular, esto puede deberse a la necesidad de ahorro para la adquisición de vehículos, procesos de cambios conductuales y uso de suelo, o cambios demográficos como nuevas generaciones que deben aprender a conducir.

Otra de las variaciones que incorpora el modelo es la asimetría respecto de cambios en el producto, es decir que el comportamiento del parque no se verá igualmente afectado frente a un incremento del producto versus una caída en la misma proporción de este. Esto se ve evidenciado con los ejemplos de Sudáfrica y Argentina, países que tuvieron fuertes contracciones del producto, o prolongadas caídas, pero donde no se observó una respuesta proporcional en el parque ante estos efectos. Esto es corregido a través de dummies para los efectos de incremento o caída del PIB.

### **Comentarios generales**

El modelo se presenta como una atractiva forma de considerar la saturación en relación a las proyecciones del parque nacional, principalmente considerando las altas tasas de crecimiento del parque que ocurren en el presente. Para ellos se debe tener una serie larga de tiempo que permita definir claramente el modelo además de parámetros típicamente no considerados pero de fácil acceso como debe ser la densidad de población y la proporción de población urbana. Además entre los países evaluados en el modelo se encuentra Chile lo que permite una referencia de comparación frente a las futuras estimaciones del equipo consultor.

#### 2.1.6 2006 Guidelines for national greenhouse gas inventory

Este documento fue generado por el IPCC<sup>12</sup> y define las directrices para calcular las emisiones de GEI para los distintos sectores, de manera de generar inventarios que tengan validez internacional.

### **Aspectos metodológicos relevantes**

Para el caso del sector transporte, la recomendación para la estimación de emisiones de GEI proponen distintos métodos dependiendo de la disponibilidad de información local. Luego, se definen niveles o *Tier* los cuales implican mayor detalle en la metodología de estimación de emisiones a medida que los niveles o *Tier* aumenten. A continuación se presenta un cuadro que resume los aspectos metodológicos relevantes en el cálculo de GEI para los distintos modos del sector transporte según las directrices del IPCC.

---

<sup>12</sup>Intergovernmental Panel on Climate Change

Tabla 2.2 Resumen de directrices del IPCC para la estimación de emisiones para el transporte

Modo	Tier	Metodología general	
Caminero	1	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE dependen del tipo de combustible, se usan valores por defecto	
	2	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE se adapta según la variación del contenido de carbono en el combustible para el CO <sub>2</sub>	
		FE dependen del tipo de combustible y tipo de vehículo (tecnología) para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O	
	3	Basado en distancia recorrida (VKT)	
		FE dependen de tipo de combustible, tipo de tecnología, condición de operación (urbana, rural, etc)	
	Marítimo	1	Basado en estadísticas de ventas de combustibles
			FE dependen del tipo de combustible, se usan valores locales o por defecto
2		Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE dependen del tipo de combustible , tipo de embarcación y tipo de motor	
Aéreo	1	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE dependen del tipo de combustible, se usan valores por defecto	
	2	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE dependen del tipo de combustible y del número de LTO. Usa valores por defecto	
	3	Basado en el detalle de operación (origen, destino, LTO, entre otros)	
		FE depende de LTO y del largo del vuelo	
Ferroviario	1	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE dependen del tipo de combustible, se usan valores por defecto	
	2	Basado en estadísticas de ventas de combustibles	
		FE locales y que dependan del tipo de combustible y de tecnología	
	3	Basado en detalle de operación (cantidad de locomotoras, horas de operación, potencia, etc)	
		FE dependen del tipo de tecnología	

En relación a las emisiones producidas por actividad internacional, como ocurre en el caso marítimo o aéreo, las recomendaciones del IPCC establecen que no deben contabilizarse dentro de los inventarios nacionales. Sin embargo, es una buena práctica calcularlas e

informarlas. Lo mismo ocurre con el uso de biocombustibles, estos deben ser informados pero no incluidos en el inventario nacional del sector. Las emisiones producidas por actividades pesqueras deben ser reportadas en el sector industrial-Pesca y no en el modo marítimo.

### **Comentarios generales**

En general, las directrices para determinar emisiones en el sector transporte están enfocados desde una aproximación “*top-down*” en los métodos Tier 2 y Tier 2 que parten de un consumo energético global asociado a cada modo para estimar las emisiones, en cambio, los métodos Tier 3 son “*bottom-up*” basados en variables de actividad para determinar el consumo de combustible y las emisiones.

Para el modo caminero Tier 3, el método de estimación de emisiones no está basado en la demanda sino en la actividad producida por el parque total.

## **2.2 Modelos Nacionales**

A continuación se resumen los aspectos metodológicos relevantes de 3 documentos nacionales referidos a modelar emisiones del sector transporte.

### **2.2.1 Análisis y desarrollo de una metodología de estimación de consumos energéticos y emisiones para el transporte, 2010. SECTRA**

#### **Contexto**

Este estudio fue considerado para elaborar una herramienta de análisis enfocado a aspectos energéticos y ambientales del sector transporte en Chile, incluyendo los siguientes 4 modos: caminero, ferroviario, aéreo y marítimo.

#### **Aspectos metodológicos relevantes**

El principal de este estudio fue el desarrollo de una metodología de asignación de consumo energético y de estimación de emisiones globales y locales desagregada por modo de transporte y por región del país.

La metodología contempló un enfoque “*top-down*” basado en el consumo de combustible de cada modo para la estimación de emisiones locales y globales. Sin embargo, para el modo caminero se realizó una metodología detallada o “*bottom-up*”, a partir de niveles de actividad y parque vehicular.

En general, en este estudio se definieron una serie de procedimientos que permitieron determinar el consumo regional hacia el año 2025, desagregado por modo y por tipo de combustible. A continuación se mencionan los más relevantes a considerar en el desarrollo del presente estudio:

- Se estableció una metodología de asignación de consumo de combustible fósiles para los distintos modos a partir de los datos históricos generados en el Balance Nacional de Energía del Ministerio de Energía (desagregación a nivel país) y del Informe Estadístico de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (desagregación por regiones).
- Para cada región, se desarrollaron modelos de proyección de consumo por modo y modelos para proyectar variables de actividad en el modo caminero y aéreo. Los modelos determinados fueron basados en la población, a excepción del modo marítimo que tuvo como variable explicativa el PIB per cápita nacional.
- El cálculo de emisiones descontó aquellas producidas por operaciones internacionales o búnker para los modos marítimo y aéreo. Además, se descontaron las emisiones producidas por actividades pesqueras, todo lo anterior según la metodología que se expone en el siguiente estudio en revisión (subsección 2.2.2)
- Se definió una metodología para estimar la reducción en consumo y emisiones por efecto de cambio modal en el transporte de carga desde camiones a ferrocarriles. Para ello se establecieron equivalencias de capacidad de carga entre camiones (medianos y pesados) respecto a la capacidad de un convoy (que se consideró con 42 carros), complementando el cálculo con niveles de actividad y factores de consumo por kilómetro dependiendo de la tecnología.

### **Comentarios generales**

A partir de la metodología mencionada anteriormente, se dispone de un conjunto de datos históricos útiles para la aplicación de presente estudio. Las series históricas disponibles desde 1998-2008 se indican a continuación:

- Serie de consumo de combustible nacional por modo
- Actividad vehicular (km/año) según tipo particulares, taxis, buses y camiones
- Parque vehicular según tipo particulares, taxis, buses y camiones

Respecto a los resultados de emisiones, para el modo marítimo y aéreo se descuentan las bunker pero no se informan, por lo que no se puede identificar la proporción respecto a las emisiones nacionales.

La metodología no consideró el consumo eléctrico producido por la operación del Metro y por el parque de motos

Dado el nivel de desagregación del estudio por región, las series de consumo y parque proyectadas fueron en su mayoría por población regional, ya que no se disponía de información oficial de PIB regional proyectado (variable explicativa).

## 2.2.2 Desarrollo y aplicación de una metodología local de cálculo de emisiones búnker para gases de efecto invernadero, 2010. Ministerio de Medioambiente

### **Contexto**

Este estudio tuvo como propósito robustecer la elaboración de inventarios de GEI para los modos marítimos y aéreos en Chile, mediante el desarrollo de una metodología para descontar las emisiones internacionales o búnker para dichos modos, según las directrices del IPCC.

### **Aspectos metodológicos relevantes**

Para la estimación de emisiones de GEI se empleó un enfoque “top-down” basado en las estadísticas de consumo de combustibles para cada modo, las cuales se basaron en dos fuentes de información relevantes identificadas en este estudio:

- Balance Nacional de Energía, generada por el Ministerio de Medioambiente. Los valores reportados en estas series representan el consumo global para los modos marítimo y aéreo
- Bases de datos de ventas de combustible internacional, generada por el Servicio Nacional de Aduanas. Estos valores corresponden al consumo internacional para los modos marítimo y aéreo, el cual debe ser descontado a los valores reportados en el Balance Nacional de Energía
- Se realizaron modelos de regresión hasta el año 1984 a partir de la serie histórica disponible 1991-2007. Los modelos fueron del tipo econométrico de regresión lineal múltiple y modelos de series de tiempo, dependiendo del tipo de variable.
- El cálculo de emisiones se basó en las directrices del IPCC, con un nivel de detalle Tier 1 para el modo marítimo y Tier 2 para el modo aéreo (basado en los LTO). Ambos métodos Tier están en función del consumo de combustible y de factores de emisión por defecto del IPCC.
- Para el cálculo de emisiones se descontó el consumo generado por Pesca, según las directrices del IPCC.

### **Comentarios generales**

A partir de la metodología mencionada anteriormente, se dispone de las series históricas desde 1984-2007 de consumo nacional y bunker, tanto para el modo aéreo como marítimo.

- Serie de consumo de combustible nacional para los modos aéreo y marítimo
- Serie de consumo de combustible internacional para los modos aéreo y marítimo
- Serie de LTO para vuelos nacionales e internacionales

### 2.2.3 Implementación del modelo LEAP, 2011. Ministerio de Energía

#### **Contexto**

Modelo de prospección energética donde se evaluaron y proyectaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para cada sector a nivel nacional. En el modelo se desarrollan los sectores de la economía presentando las proyecciones de consumo energético detallado por uso, y las emisiones correspondientes incluyendo el sector de generación eléctrica. El modelo incluye escenarios alternativos de eficiencia o energía renovables que permite comparar los efectos de algunas políticas o cambios tecnológicos sobre las emisiones GEI nacionales.

#### **Aspectos metodológicos**

El sector transporte es dividido en las categorías caminero, ferroviario, aéreo, marítimo y emisiones bunker (emisiones por viajes internacionales) y proyectado econométricamente.

En los sectores aéreo, marítimos y ferroviario, se proyecta el consumo energético en su totalidad mientras que el sector caminero es proyectado el stock de vehículos para cada modo (livianos de pasajeros, comerciales, buses, camiones metro, otros). Adicionalmente dentro del sector de vehículos livianos se divide el parque según combustible y normativa de emisiones (Euro II, III, IV, etc)

El modelo es cargado con niveles de actividad, intensidades energéticas anuales, y considera factores de emisión del IPCC Tier 1 para los combustibles.

En particular, para proyectar el parque vehicular se aplicó un modelo econométrico al stock de automóviles de pasajeros y comerciales a nivel nacional. Se usa stock y no flujo ya que no se contó con una serie larga de información sobre ventas de automóviles. Estas últimas solo existen a partir de 1989.

El PIB es convertido a un índice para dejarlo en la misma escala que el parque. Como es de esperar para un bien durable, las tendencias de largo plazo son muy parecidas. Ello permite usar un simple modelo de consumo durable para proyectar las tendencias de largo plazo del stock de vehículos.

La modelación estadística asume que el stock deseado de automóviles ( $s^*$ ) se ajusta suavemente a través del tiempo a través de un mecanismo de expectativas adaptativas que viene dado por:

$$S_t - S_{t-1} = \delta(S_t^* - S_{t-1}), \delta \in [0,1] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Esto muestra que el stock deseado ( $S^*$ ) en una fracción de la diferencia entre el stock actual y el del período anterior. De esta manera, se puede especificar un modelo lineal como:

$$S_t = \beta_0 + \beta_1 P_t + \beta_2 y_t + (1 - \delta) S_{t-1} + e_t \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La variable  $P_t$  es el costo de uso,  $y_t$  es el ingreso y se usó como proxy para la riqueza. Este modelo se estimó con datos del parque de automóviles de pasajeros y comerciales. Los datos son obtenidos del INE y Banco Central y se expresan en términos reales.

Una vez proyectado el parque este se divide de acuerdo a cada sistema eléctrico nacional, para ello se calcula la proporción del PIB nacional que corresponde a las regiones que componen cada sistema eléctrico dividiendo así el parque entre SIC, SING y Otros. En los otros sectores se supone que la proporción entre sistemas permanece constante en el tiempo por lo tanto se mantiene la proporción de los datos históricos regionales de consumo ferroviario, aéreo y marítimo.

### **Comentarios generales**

Si bien el modelo presenta una buena calidad estadística y la información requerida es de fácil acceso, en el largo plazo es incapaz de reflejar efectos de saturación lo que limita su eficacia al corto y mediano plazo. Además por construcción el modelo no permite simular efectos que generen cambios modales.

## **2.3 Perspectivas para el Transporte**

A continuación se presenta un resumen respecto a las tendencias para el transporte esperadas hacia el año 2030 en base al documento World Energy Outlook (WEO) 2006 publicado por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés). En este documento se señalan, desde una perspectiva del 2006, las tendencias mundiales que se esperaban al 2030 para el sector transporte, entre otros sectores, referidos a una situación base y, además, se incluye un análisis para un escenario con intervención política para reducir emisiones de GEI.

En particular para este estudio, la información tecnológica que define el escenario base a nivel mundial, permite tener una visión en el 2006 respecto a la factibilidad de integrar ciertos tipos tecnológicos a la línea base nacional de crecimiento sin restricción para el sector transporte.

El análisis del escenario mundial presentado en el WEO 2006, permite a su vez, sensibilizar en términos de cambios tecnológicos la situación base bajo el supuesto de que los efectos de incorporar nuevas tecnologías en otros países desarrollados debiesen llegar a Chile con un desfase de 5 a 10 años, dependiendo de los costos de la tecnología y tasas de reemplazo

tecnológicos propios de cada modo de transporte y actividad que opera. Por ejemplo, el modo aéreo tiene una tasa de reemplazo de 10-15 años (aprox.) en la flota comercial, en barcos es sobre los 25 años, los buses para el transporte público son al menos 10 años para el sistema más regulado como el Transantiago, la flota ferroviaria en Chile no tiene ninguna regulación para su renovación y posee hacia el 2006 un parque de locomotoras con más de 20 años de antigüedad.

Los antecedentes reportados en el WEO 2006 señalan que, en general, el uso de la energía en el Transporte se irá haciendo más eficiente y de manera estable hacia el 2030 y el paso en que esto ocurra variará según el sector y del tipo de combustible que éste emplee, además del grado de desarrollo de nuevas tecnologías y su comercialización a los usuarios.

En el caso del sector transporte que utiliza principalmente combustibles fósiles, se espera que variaciones en el precio de éste tendrán bajos efectos en la demanda en el corto plazo porque es más caro cambiarse a un nuevo tipo de combustible que pueda usar un determinado vehículo, ya que no existe una oferta masiva de biocombustibles por ejemplo, o cambiar el vehículo a otra tecnología que cumpla con las mismas funciones y que no use combustibles fósiles (vehículos eléctricos, híbridos, etc.). Sin embargo, en el largo plazo (post 2030), se espera que los precios sean lo suficientemente elevados para que exista el incentivo para adquirir nuevas tecnologías que reemplacen los vehículos convencionales, principalmente en vehículos livianos.

En este contexto, se espera que los combustibles fósiles sigan siendo la fuente de energía dominante hacia el año 2030 para el sector transporte y se espera sea el responsable del 63% de aumento global en consumo de combustibles fósiles en el período 2004-2030.

Lo anterior refleja que en una situación nacional de crecimiento sin restricción para el sector transporte la tendencia al alza en el consumo de combustibles fósiles como se ha ido observando en los último 10 años, debiese mantenerse hacia el 2030 e incluso más allá, pues los cambios tecnológicos que se pudiesen dar post 2030 a nivel mundial debiesen llegar a Chile entre 5 a 10 años después, dependiendo del modo de transporte.

A continuación se indican las principales tendencias esperadas hacia el 2030 para el sector transporte según el documento WEO 2006 de la IEA:

- En relación al uso en gran escala de biocombustibles de primera y segunda generación, se espera que a nivel mundial sea económicamente atractivo después del año 2030 y debiera tener una participación en el sector transporte de 4% hacia el 2030.
- El análisis indicado en el documento WEO 2006 señala a los modos caminero y aéreo como los principales consumidores de combustibles fósiles hacia el 2030. La Figura 2.5 se indica cómo evolucionaría a nivel mundial el consumo de combustibles fósiles para estos dos modos.

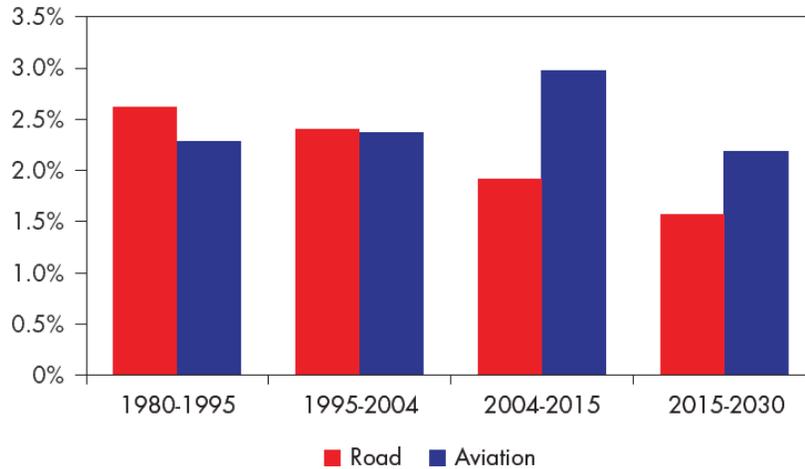


Figura 2.5 Aumento en consumo de combustibles fósiles para modos Caminero y Aéreo

- En referencia al modo caminero, la eficiencia energética será el mayor responsable de las reducciones de consumo y emisiones de GEI hacia el 2030. La entrada de tecnologías híbridas y eléctricas también produciría ahorros pero aun a una escala menor hacia el 2030.
- La Tabla 2.3 representa la evolución en eficiencia en consumo de combustible para vehículos livianos hacia el 2030. Se espera que la eficiencia (litros cada 100 km) en vehículos livianos mejore un 0,4% anual a nivel global para el período 2004-2030. Las mayores tasas anuales de mejora en eficiencia energética serían en Europa, Pacífico y China con un 0,8% anual. Norte América se espera tenga la tasa más lenta de mejora con un 0,1% anual.

Tabla 2.3 Eficiencia (litros cada 100 km) para vehículos livianos nuevos hacia el 2030. Fuente: WEO 2006

Región	2004	2030
<b>OECD</b>	<b>9,3</b>	<b>8,3</b>
Norte América	11,6	11,3
Europa	7,7	6,1
Pacífico	8,6	6,9
<b>Economías de Transición</b>	<b>10,0</b>	<b>9,0</b>
<b>Países en Desarrollo</b>	<b>10,3</b>	<b>9,1</b>
China	11,3	9,0
India	10,1	8,9
Brasil	9,1	8,5

- La Figura 2.6 ilustra la composición tecnológica mundial de vehículos livianos nuevos en el escenario base analizado en el documento WEO 2006. Se observa que los vehículos de combustión interna diésel y gasolina serán del orden del 95% de la flota nueva de vehículos livianos hacia el 2030 y que la tecnología híbrida representará sólo un 5% del parque total de vehículos livianos nuevos, aproximadamente.

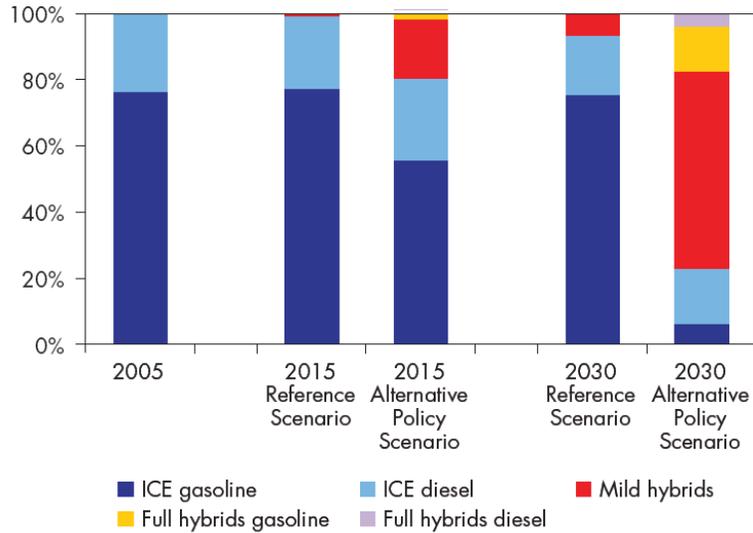


Figura 2.6 Composición tecnológica mundial esperada para vehículos livianos nuevos hacia el 2030. Fuente: WEO 2006

- En relación al modo aéreo, se asume una mejora en la eficiencia de 1,8% anual. Dado que el consumo de combustible aéreo es uno de los principales costos de operación, se espera que post 2030 existan nuevos desarrollos que mejoren la eficiencia en este modo. Se estima que el potencial de mejora en eficiencia por desarrollo en diseño de turbinas, reducción de peso y mejoras en aerodinámicas podrían ser de 1,0% a 2,2% hacia el 2025.

## 2.4 Análisis Crítico y Levantamiento de la Información

Luego de la revisión de modelos de proyección de emisiones descrita en las secciones anteriores, a continuación se presenta un análisis respecto a las opciones de modelar las emisiones de GEI del sector transporte según la información disponible a nivel local. Además, se indican recomendaciones referidas a la generación de información necesaria para poder incorporar futuras mejoras en el cálculo de emisiones.

### 2.4.1 Definición de variables de entrada

MAPS-Chile define variables a utilizar en las proyecciones de los distintos sectores. Luego, para evaluar los modelos de proyección y posterior cálculo de emisiones, se dispone de la siguiente información:

- Tasa de crecimiento del PIB
- Tasa de crecimiento de la población
- Tasa de descuento
- Proyecciones de tipo de cambio
- Proyecciones de precios de combustibles
- Tipos de tecnologías disponibles a considerar en el análisis.

Para complementar el análisis referido al sector transporte, se identifican los siguientes reportes anuales para la recopilación de series de datos históricos relevantes para la estimación de emisiones de GEI:

- Balance Nacional de Energía, Ministerio de Energía
- Informe Estadístico, Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)
- Estadísticas de Parque Vehicular, Instituto Nacional de Estadísticas (INE)
- Operación de Aeronaves, Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)
- Estadísticas de pasajeros y carga transportada en Aeronaves, Junta Aeronáutica Civil (JAC)
- Boletín Estadístico Marítimo, Dirección General del Territorio Marítimo y de marina mercante (DIRECTEMAR)
- Encuestas Origen Destino, Subsecretaría de Transportes (SECTRA)
- Censos de Flujo de Tráfico, Subsecretaría de Transportes (SECTRA)

Existen estudios que han analizado parte de esta información en la aplicación de modelos de emisiones para el sector transporte (ver sección 2.2). A continuación se indican las series históricas existentes y que son utilizadas dentro de la metodología de proyección:

- Consumo de combustible para el modo caminero y modo ferroviario, se utilizan como base las series obtenidas en el proyecto “*Análisis y Desarrollo de una Metodología de estimación de Consumo Energéticos y Emisiones para el transporte*” de SECTRA-Ministerio de Transporte.
- Consumo de combustible para el modo marítimo y aéreo nacional e internacional, se utilizan los valores obtenidos en el proyecto “*Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero*” del Ministerio de Medioambiente.
- Parque vehicular se utilizan como base las series obtenidas en el proyecto “*Análisis y Desarrollo de una Metodología de estimación de Consumo Energéticos y Emisiones para el transporte*” de SECTRA-Ministerio de Transporte.

Respecto a la información de demanda de transporte de pasajeros y de transporte de carga, no existe de manera oficial una serie continua e histórica que describa el comportamiento de estas variables previo al 2006. Lo anterior se analiza en más detalle a continuación.

#### 2.4.2 Análisis para los modos aéreo y marítimo

En general los modos aéreo y marítimo son abordados de manera “top-down” debido a que su participación en los inventarios nacionales de GEI son menores respecto al modo caminero. Sin embargo, también existen modelos que se basan en variables de actividad como carga transportada o kilómetros recorridos por modos de transporte de carga.

En el caso local, los modelos para estimar las emisiones de GEI para estos dos modos se han basado en las estadísticas nacionales de ventas de combustible. Para realizar un enfoque por demanda se requieren variables por modo como:

- factores de consumo, ya sea por kilómetro o por tonelada kilómetro
- toneladas transportadas
- kilómetros recorridos

Respecto al movimiento de carga nacional, para el modo aéreo existen estadísticas de carga transportada generadas por la Junta Aeronáutica Civil (JAC) y estadísticas de operaciones de despegues y aterrizajes (LTO por sus siglas en inglés) generadas por la Dirección de Aeronáutica Civil (DGAC). Para el modo marítimo existen estadísticas de movimiento de carga por cabotaje generadas por la Dirección General del Territorio Marítimo y de marina mercante (DIRECTEMAR).

En relación a los factores de consumo, existen maneras indirectas de obtener valores locales a partir de las series de consumo históricas disponibles y series de movimiento de carga. También el IPCC reporta valores de consumo por defecto que se pueden tomar como referencia.

Dado que la participación de estos modos es menor dentro del inventario nacional de GEI, se opta por la metodología para estimar emisiones basadas en el consumo de combustible para los modos aéreo y marítimo. Sin embargo, se seguirán las directrices del IPCC en cuanto a separar aquellas emisiones producidas por operaciones internacionales (búnker) de aquellas producidas por operaciones nacionales, pues son éstas últimas las que cuentan en el inventario nacional de GEI y las que deben ser potencialmente reducidas en un escenario de mitigación.

### 2.4.3 Análisis respecto al transporte de carga

En el caso de las emisiones producidas por el transporte de carga Terrestre (Caminero Camiones y Ferroviario), según las referencias revisadas anteriormente, se proyecta la demanda para transportar carga. Esta proyección está ligada normalmente con el PIB del país pero en el detalle debe estar relacionado con el PIB de cada sector productivo.

La variable a proyectar son las toneladas por kilómetro transportadas considerando una tasa de carga por camiones y trenes. Nuevamente esta variable está asociada al crecimiento del PIB sectorial del país.

Las proyecciones realizadas en la actualidad del transporte terrestre consideran proyecciones de consumo y de parque de vehículos de carga, lo que no necesariamente correlaciona directamente con la necesidad de transporte del país. Por lo tanto, se considera necesario trabajar con la propuesta de demanda por transporte, la cual debe representar de mejor manera el crecimiento del sector.

Existen en el país algunos estudios que pueden aportar datos relevantes, uno de ellos corresponde “Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana” desarrollado por Steer Davis en el 2011, o el estudio “Análisis económicos del transporte de carga nacional” desarrollado por Cipres Ingeniería Ltda. De este último estudio se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 2.4 Cuadro de (millón) Toneladas Kilómetro TKM por tipo de producto (2007)

Descripción	Volumen (millón)TKM	Proporción de Mercado
Hortalizas	4.129	10,2%
Maquinarias y vehículos	3.992	9,9%
Otros Materiales de Construcción	3.208	7,9%
Productos Manufacturados	2.793	5,9%
Trozas	2.667	6,6%
Fertilizantes	2.416	6,0%
Acero	2.415	6,0%
Frutas	2.365	5,8%
Áridos	2.251	5,6%
Productos Forestales	1.786	4,4%
Alimentos	1.727	4,3%
Combustibles - Gasolinas	1.675	4,1%
Productos Químicos	1.456	3,6%
Resto Minería	1.323	3,3%
Cemento	1.290	3,2%
Productos del Mar	994	2,5%
Combustibles - Otros	900	2,2%
Papeles y Cartones	880	2,2%
Concentrado de cobre	819	2,0%
Ganado y Camas	491	1,2%
Hormigón	434	1,1%
Cobre refinado	275	0,7%
Combustibles - Hulla	108	0,3%
Celulosa	81	0,2%
<b>Total</b>	<b>40.475</b>	<b>100,0%</b>

Luego, el método más representativo para modelar el transporte de carga basado en la demanda requiere el aporte de los otros sectores en cuanto al crecimiento de carga sectorial hacia el 2050 (ton-km) y los modos empleados (ferroviario, camión).

En relación a la partición modal de transporte de carga terrestre, el INE reporta anualmente estadísticas de toneladas-kilómetros asociadas al modo ferroviario. Sin embargo, para el transporte de carga asociado a camiones, no existen estadísticas históricas oficiales de las toneladas kilómetros transportadas.

Nuevamente, lo antecedentes señalados anteriormente implican que la elaboración de un modelo basado en la demanda de carga deberá hacer supuestos en el tratamiento histórico de la información (ver Anexo B).

#### 2.4.4 Análisis respecto al transporte de pasajeros

Los modelos nacionales realizan los cálculos a través de variables como el parque vehicular y los kilómetros recorridos anuales del parque (nivel de actividad), calibrados por el consumo global asociado al modo caminero (representado por las ventas de combustibles). Sin embargo, las tendencias internacionales abordan las emisiones producidas por el transporte de pasajeros a partir de variables de demanda, donde los principales datos de entrada son los kilómetros recorridos por persona (demanda de transporte), la partición modal y las tasas de ocupación por modo como nuevos parámetros de cálculo.

Este nuevo enfoque metodológico refleja mejor los efectos en las emisiones que se pudiesen producir por cambios en el futuro respecto a la elección modal, como por ejemplo, aumentar la cantidad de viajes en modos más eficientes como el transporte público o bicicleta en remplazo del uso de vehículos particulares.

Para adaptar este nuevo enfoque a la situación local, es necesario contar con información histórica respecto al Transporte Urbano, y así poder hacer proyecciones de demanda al año 2050. A nivel local, SECTRA es la entidad del gobierno que ha generado datos de demanda de transporte. Sin embargo, no ha habido continuidad en generar la información año a año lo cual dificulta disponer de series históricas para proyectar. A continuación se hace un resumen de la información disponible generada por SECTRA:

- **Partición modal en transporte de pasajeros.** Por medio de encuestas de Origen-Destino se ha logrado determinar la cantidad de viajes diarios hechos en distintos modos de transporte de pasajeros. Sin embargo, esta información está para algunas ciudades y para distintos años en cada una, no existiendo una encuesta o una metodología que permita conocer la partición modal nacional como una serie continua en el tiempo debido a los costos que esto implica. Luego, se debería evaluar un nuevo tipo de encuesta que sea representativa, de menor costo y válida para recopilar este tipo de variables anualmente. La tabla a continuación indica las ciudades y años disponibles<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup>Fuente <http://sintia.sectra.gob.cl/>, Subsecretaría de Transportes SECTRA

Tabla 2.5 Información de Encuestas Origen-Destino generadas por SECTRA

Ciudad	Años
Arica	1998
Iquique	1998
Antofagasta	1998
Copiapó	1998
La Serena-Coquimbo	1999
Valparaíso	1986, 1998
San Antonio	2005
Santiago	1991, 2001, 2006
Rancagua	2000, 2007
Curicó	1996, 2003
Talca	1996, 2003
Linares	2002
Los Ángeles	1998, 2004
Concepción	1989, 1999
Chillán	2003
Angol	2004
Temuco	2002
Valdivia	2002
Osorno	2002
Puerto Montt	1998, 2004
Punta Arenas	1998, 2005

- **Tasas de ocupación vehicular<sup>14</sup>**. SECTRA realiza censos de flujo de tráfico y de tasa de ocupación vehicular para distintas ciudades donde se deriva este valor. Dicha información está disponible a través de la plataforma SINTIA (Sistema de Información de Transporte Accesible por Internet) para 18 ciudades desde los años 1998-2006. Sin embargo, no existen resúmenes por cada ciudad, pues la información se despliega por estación de monitoreo, que van entre 10 a 20 puntos y no todos contabilizan las mismas categorías vehiculares, lo cual hace difícil su procesamiento.
- **Información de Transporte Urbano**. SECTRA ha determinado para 28 ciudades del país una serie de parámetros referidos al transporte de pasajeros (entre otros) para el año 2010<sup>15</sup>. Sin embargo, esta información no se encuentra para años anteriores. Algunas variables relevantes disponibles son:
  - Total de viajes diarios en transporte público

<sup>14</sup>Tasa de ocupación corresponde al porcentaje utilizado del vehículo respecto de su capacidad de carga y de pasajeros.

<sup>15</sup>Fuente <http://www.mtt.gob.cl/transporteurbano/> Subsecretaría de Transportes SECTRA

- Total de viajes diarios en transporte privado
- Total de viajes diarios en modos no motorizados
- Viajes por persona diario en transporte público
- Viajes por persona diario en transporte privado
- Distancia promedio por viaje (solo disponible para algunas ciudades)

En conclusión, las variables de entrada de mayor relevancia para poder generar un modelo de emisiones en base a la demanda de transporte de pasajeros, se generan actualmente de manera no sistemática y sólo se dispone de datos aislados para algunos años y algunas ciudades del país. Lo anterior implica que la elaboración de un modelo con estas características deberá hacer supuestos en el tratamiento histórico de la información (ver Anexo C).

#### 2.4.5 Calidad de información disponible

Luego de revisar y analizar los distintos métodos de estimación de emisiones, se presenta a continuación un diagnóstico respecto a la información disponible y la calidad de ésta para abordar un enfoque basado en la demanda (transporte de pasajeros y transporte de carga) y para la estimación de emisiones bunker y nacionales en los modos marítimo y aéreo.

Tabla 2.6 Diagnóstico de información disponible relevante para el estudio

Información	Subsector	Fuente de información disponible	Uso que se le da en modelo	Calidad (juicio del consultor)	Alternativas para abordar falta de información
Demanda de transporte de personas	Caminero	Serie (pax-km) no disponible	Determinar emisiones transporte pax	Mala, no existe	Se calculan de manera indirecta según metodología definida en Anexo C
Partición modal, transporte pasajeros (TP)	Caminero y Metro	EOD <sup>16</sup> (SINTIA)	Para distribuir demanda por modo (TP)	Puntos aislados, serie discontinua. Se puede desagregar por región	Se genera tendencia a partir de información
Tasas de Ocupación	Caminero	MAED <sup>17</sup>	Cálculo de PKM para transporte pasajeros (histórico). Cálculo de consumo	Puntos aislados, serie discontinua, tendencia. Se puede	Se toman estos valores como referencia pues no existe una serie histórica ni

<sup>16</sup>Encuesta Origen Destino

<sup>17</sup>“Análisis de aspectos críticos de la demanda energética global”, Comisión Nacional de Energía (2010)

Información	Subsector	Fuente de información disponible	Uso que se le da en modelo	Calidad (juicio del consultor)	Alternativas para abordar falta de información
			energético a partir de PKM proyectado	desagregar por región	proyección
Parque de vehículos	Caminero	INE '90-'07 Taxis y Motos '80-'07 Camiones y Livianos '86-'07 Buses	Parque de vehículos, indicador del estudio	Buena, serie continua, se puede desagregar por región	No se requiere definir alternativa
Demanda de transporte de carga	Caminero-Camión	Serie (ton-km) no disponible	Determinar emisiones transporte carga	Mala, no existe	Se calcula de manera indirecta según metodología definida en Anexo B
Demanda de transporte de carga	Ferrovionario	INE (ton-km) '97-'07	Determinar emisiones transporte carga	Buena, serie continua	No se requiere definir alternativa
Tasa de Carga	Caminero-Camión Ferrovionario	Estudios sudafricanos y locales <sup>18</sup>	Determinar consumo energético	Coherente entre las fuentes	Se debe definir con la contraparte
Consumo energético Marítimo Bunker y Nacional	Marítimo	Serie 1991-2007 Estudio CONAMA Bunker <sup>19</sup>	Determinar emisiones modo marítimo	Aceptable, serie anual en base a estadísticas nacionales de Balances Energéticos y Aduanas	Se debe replica metodología de estudio en referencia para años posteriores al 2007
Consumo energético Aéreo Bunker y Nacional	Aéreo	Serie 1991-2007 Estudio CONAMA Bunker	Determinar emisiones modo marítimo	Aceptable, serie anual en base a estadísticas nacionales de Balances Energéticos y Aduanas	Se debe replica metodología de estudio en referencia para años posteriores al 2007

<sup>18</sup> Quantifying the energy needs of the transport sector for South Africa (2012). South African National Energy Development Institute (SOC) Ltd.

Estudio "Evaluación Costo - Beneficio de la restricción al transporte de carga en el Anillo Américo Vespucio". Cámara Chilena de la Construcción 2003

<sup>19</sup> Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero. CONAMA

#### 2.4.6 Recomendaciones generales

En relación a mejorar la estimación de emisiones para el caso del transporte de pasajeros, es necesario tener variables que describan tanto la distribución de los viajes como el desarrollo urbano. En particular, se requieren mejoras en los siguientes tipos de información:

- Información de Transporte Urbano generada en forma anual, número de viajes por modo, tasa de ocupación vehicular, etc. Esta información la genera SECTRA y actualmente se encuentra solo para el año 2010.
- Para la proyección de variables de demanda de pasajeros, son válidas las series de población y PIB pero es útil la incorporación de datos de manera sistemática que reflejen el desarrollo urbano de las ciudades del país, es decir tener datos relacionados con crecimiento urbano anuales de manera de tener disponible series de tiempo.
- Se hace necesario la determinación de variables de desarrollo urbano para identificar como se expanden las ciudades y explicar mejor la evolución en la demanda de viajes por personas. Estas podrían ser área urbanizada en las ciudades y densidad poblacional, que permitan inferir largo promedio de viajes, índices de crecimiento urbano, entre otros.
- Dado que la actual encuesta Origen Destino es muy costosa para realizarla en todo el país de forma anual, se hace necesario desarrollar una nueva encuesta más breve y que genere datos representativos para monitorear variables del transporte urbano como partición modal y tasa de ocupación vehicular.
- Para el caso de las estadísticas de tasas de ocupación de vehículos de pasajeros, la recomendación es generar un valor global a partir de estos datos registrados por estación que esté disponible, ya que es muy tedioso el uso de la información a ese nivel de desagregación, donde dependiendo del punto de medición existen tasas de ocupación no para todas las categorías vehiculares
- Para desagregar los modelos de proyección a regiones del país, es relevante contar con proyecciones oficiales de PIB regional. Si bien hoy existen datos históricos de PIB regional, no hay proyecciones de éste sino que solo de la variable PIB nacional.

En relación a la estimación en base a la demanda de carga a transportar, las recomendaciones se listan a continuación:

- Se debe sistematizar un registro anual de toneladas transportadas anualmente según sectores productivos y modo escogido para el traslado
- Se requiere del aporte de los otros sectores productivos en cuanto al crecimiento de carga sectorial hacia el 2050 (ton-km) y los modos empleados (ferroviario, camión).

### **3 Metodología de Proyección de Emisiones y Consumo Energético para el Sector Transporte**

A continuación se describe la metodología del modelo que permite proyectar las emisiones del sector transporte, acorde a la revisión de antecedentes y al análisis de información disponible a nivel local.

En la sección 3.1 se describe la metodología de estimación de emisiones, primero en un enfoque general y luego en detalle según sea el modelo (demanda de pasajeros, demanda de carga, modo marítimo y modo aéreo), identificando todas las variables a proyectar y parámetros relevantes en el cálculo de emisiones del sector.

Posteriormente, en la sección 3.2 se describe la metodología de proyección de aquellas variables identificadas como datos de entrada a los modelos descritos en la sección 3.1, según la información histórica disponible en el estudio.

La estructuración de este capítulo busca diferenciar entre la metodología de estimación de emisiones (sección 3.1) y las metodologías de proyección de variables de entrada para cada modo (sección 3.2), de manera que ambas metodologías sean independientes. Esto resulta útil en casos en que se dispongan de series proyectadas distintas a las generadas en este estudio y obtener las emisiones asociadas con el modelo propuesto a continuación (sección 3.1).

#### **3.1 Modelos y Cálculo de Emisiones**

El modelo de emisiones considera diferentes metodologías según sea el caso del transporte terrestre (Caminero y Ferroviario) y el resto de los modos (Aéreo, Marítimo). En el caso del transporte terrestre se ha definido una metodología en base a la demanda, ya sea de pasajeros o de carga, donde la variable principal empleada para el cálculo de emisiones es pasajero-kilómetro (PKM) o las toneladas-kilómetro (TKM), respectivamente.

Los modelos al cálculo de emisiones para los modos aéreo y marítimo están basados en el consumo nacional de energía. Adicionalmente, para estos modos se define el cálculo de emisiones búnker también basado en el consumo energético internacional.

Luego, según cada modelo la proyección de emisiones al año 2050 estará dada a su vez por la proyección de las variables PKM, TKM, consumo energético aéreo y consumo energético marítimo (ver sección 3.2). La proyección de las variables mencionadas anteriormente requiere de series históricas para la aplicación de modelos econométricos de proyección. Como se mencionó en el capítulo 2, tanto para las variables PKM y TKM no existen series históricas oficiales y continuas que expliquen su comportamiento histórico, por lo que el consultor definió una metodología adicional que permitió construir series de PKM y TKM para los años 1998 -2006 en base a la información disponible (ver Anexo B y C). En relación a las series de consumo energético aéreo y marítimo, se utilizaron las series históricas para los años 1991-2006 del estudio “Desarrollo y Aplicación de una

Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero” de la Comisión Nacional de Medioambiente (CONAMA), actual Ministerio de Medioambiente.

Una vez que se dispone de las series proyectadas de PKM, TKM, consumo energético aéreo y consumo marítimo se procede a calcular las emisiones globales y locales según lo describen en detalle las subsecciones 3.1.1 (modo aéreo y marítimo), 3.1.2 (transporte de carga) y 3.1.3 (transporte de pasajeros).

La Figura 3.1 representa el diagrama general de la metodología empleada para el cálculo de emisiones al año 2050.

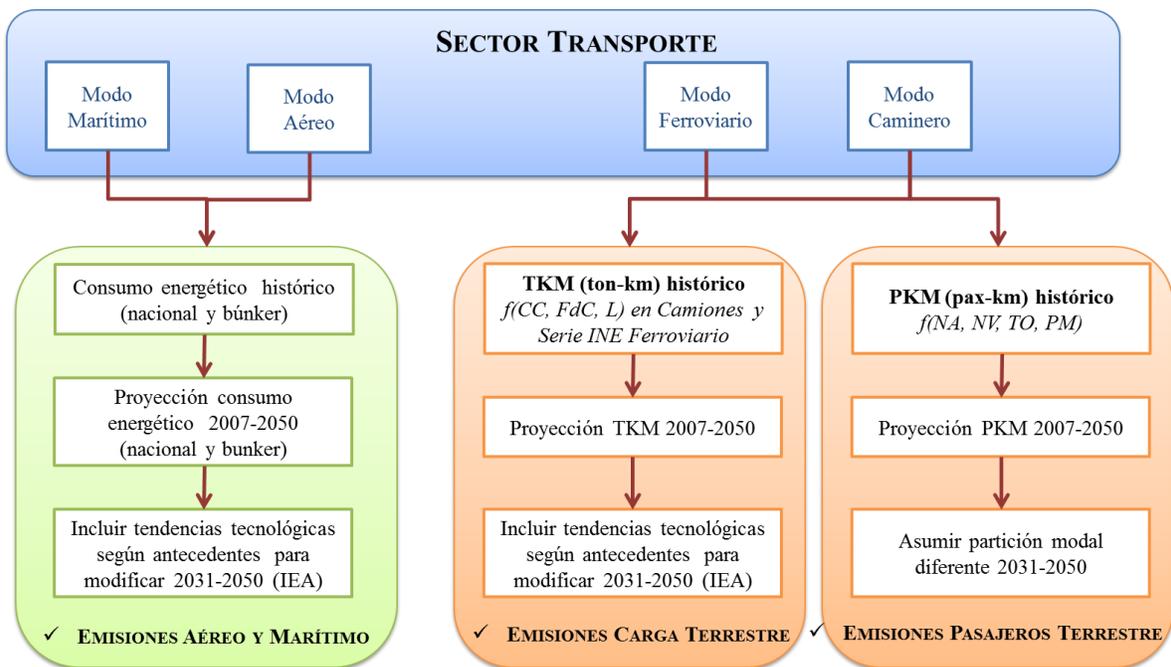


Figura 3.1 Esquema general para proyectar emisiones en el sector transporte

### 3.1.1 Estimación de emisiones modo aéreo y marítimo

La estimación de emisiones para los modos aéreo y marítimo se realiza en base al consumo energético, es decir, el resultado de emisiones es el producto entre el consumo energético del sector por un factor de emisión en base a dicho consumo energético.

El cálculo de emisiones tiene la siguiente expresión:

$$Em_{ki} \left[ \frac{kg}{año} \right] = CC \left[ \frac{TJ}{año} \right] * FE_k \left[ \frac{kg}{TJ} \right] * C_i [%] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

- $Em_{ki}$  : Emisiones del contaminante k producido por el combustible i para el modo aéreo o marítimo  
 $CC$  : Consumo energético total para modo aéreo o marítimo  
 $FE_k$  : Factor de emisión del contaminante k para modo aéreo o marítimo  
 $C_i$  : Fracción del combustible i respecto al consumo energético total para el modo aéreo o marítimo

El cálculo de emisiones para estos dos modos incluye la desagregación por operación nacional y por operación búnker empleando la misma Ecuación 3.1, haciendo la diferencia solamente en el tipo de operación asociada al consumo energético. Lo anterior se realiza acorde a las directrices del IPCC la cual establece informar aquellas emisiones producidas por operaciones internacionales y no incluirlas en el inventario nacional.

La descripción de los datos de entrada para el modelo de emisiones de los modos aéreo y marítimo se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Variables y parámetros que describen el modelo de emisiones aéreo y marítimo

Modo	Nombre Variable o Parámetro	Nomenclatura y Unidad	Fuente	Desagregación
Aéreo	Consumo Energético nacional	CC [TJ/año]	Resultados de proyección en base a serie histórica	Total país, nacional o internacional
Aéreo	Fracción de consumo energético según combustible i	$C_i$ [%]	Según distribución observada en año 2006 de serie histórica (Anexo A)	i: kerosene de aviación, gasolina de aviación. Nacional o internacional
Marítimo	Consumo Energético nacional	CC [TJ/año]	Resultados de proyección en base a serie histórica	Total país, nacional o internacional
Marítimo	Fracción de consumo energético según combustible i	$C_i$ [%]	Según distribución observada en año 2006 de serie histórica (Anexo A)	i: petróleo combustible (IFO 180), diésel. Nacional o internacional
Aéreo y Marítimo	Factores de Emisión para contaminantes globales	FE-GEI [kg/TJ]	valores por defecto IPPC 2006	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Aéreo y Marítimo	Factores de Emisión para contaminantes globales	FE-Loc [kg/TJ]	valores por defecto EMEP/CORINAIR 2007 <sup>20</sup> ; según recomendaciones del IPCC	CO, HC, NO <sub>x</sub> , MP

<sup>20</sup> Para el modo aéreo no existen factores de emisión por defecto para MP y CO ya que son consideradas despreciables

### 3.1.2 Estimación de emisiones transporte de carga terrestre

El modelo para estimar las emisiones producidas por el transporte de carga incluye al modo *Ferroviario* y al tipo *Camión* perteneciente al modo *Caminero*. Las emisiones para este caso están directamente relacionadas con la necesidad de transporte de carga a lo largo del país, por lo tanto, se define como la principal variable para calcular las emisiones a las toneladas-kilómetro o TKM.

Luego, a partir de la proyección de las TKM al 2050 se obtendrán los resultados de consumo energético y posteriormente las emisiones, a partir de dos parámetros que se definen a continuación:

- Factor de Carga (ton/veh): este parámetro corresponde a la tasa promedio de carga nacional según sea ferrocarril o camión.
- Factor de Consumo (km/l): este parámetro corresponde a la tasa promedio nacional de consumo de combustible según sea ferrocarril o camión.

La variable TKM representa la demanda de carga a transporta total en el país, por lo que se realizó una partición modal para definir en qué proporción se reparte la carga entre el modo ferroviario y el tipo caminero-camión.

Considerando lo anterior, las emisiones para el transporte de carga quedan descritas según las siguientes ecuaciones:

$$CC_i \left[ \frac{TJ}{año} \right] = M_i [\%] * \frac{TKM \left[ \frac{ton-km}{año} \right]}{L_i \left[ \frac{ton}{veh} \right] * FdC_i \left[ \frac{km-veh}{TJ} \right]} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$E_{ik} \left[ \frac{kg}{año} \right] = CC_i \left[ \frac{TJ}{año} \right] * FE_{ik} \left[ \frac{kg}{TJ} \right] \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

$CC_{ij}$	: consumo energético para tipo de transporte de carga i
$M_i$	: Partición Modal de tipo de transporte de carga i
$TKM$	: Toneladas-kilómetro totales
$L_i$	: Factor de carga de tipo de transporte de carga i
$FdC_i$	: Factor de consumo de tipo de transporte de carga i
$E_i$	: Emisiones para tipo de transporte de carga i
$FE_{ik}$	: Factor de emisión para el tipo de transporte i para el contaminante k [kg/TJ]

Las ecuaciones (3.2) y (3.3) describen de manera general el cálculo de emisiones empleado en el modelo de carga. Sin embargo, para el *tipo* de transporte de carga camión existen más

niveles de desagregación asociadas al tipo de operación (urbano e interurbano) y al estándar de emisión que cumple.

La descripción de los datos de entrada para el modelo de carga se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Variables y parámetros que describen el modelo de emisiones transporte de carga

Modo	Nombre Variable o Parámetro	Nomenclatura y Unidad	Fuente	Desagregación
Ferrovionario y Camión	Demanda de transporte de carga	TKM [ton-km/año]	Resultado de proyección en base a serie histórica	Tota país
Ferrovionario	Partición modal TKM	M [%]	Promedio de participación histórica 1998-2006 (Anexo B)	Total país
Ferrovionario	Tasa de carga	L [ton/veh]	Estudio “Evaluación Costo - Beneficio de la restricción al transporte de carga en el Anillo Américo Vespucio” (Cámara Chilena de Comercio, 2003)	Total país
Ferrovionario	Factor de consumo	FdC [km-veh/TJ]	Estudio “Análisis implementación programa de asesorías de transporte terrestre, VI etapa: OT 9. Plan de Transporte Interurbano, PTI. Análisis de eficiencia energética en el transporte de carga.”	Total país
Ferrovionario	Factores de emisión para contaminantes globales	FE-GEI [kg/TJ]	valores por defecto IPPC 2006	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Ferrovionario	Factores de emisión para contaminantes locales	FE-GEI [kg/TJ]	valores por defecto EMEP/CORINAIR 2007, según recomendaciones del IPCC	CO, HC, NO <sub>x</sub> , MP,
Caminero-Camión	Partición modal TKM	M <sub>k</sub> [%]	Diferencia entre TKM ferrovionario histórico del INE y el total (Anexo B)	Total país. Categoría de camión k: liviano, mediano, pesado
Caminero-Camión	Tasa de carga	L <sub>k</sub> [ton/veh]	Estudio “Evaluación Costo - Beneficio de la restricción al transporte de carga en el Anillo Américo Vespucio” (Cámara Chilena de Comercio, 2003)	Total país- Categoría de camión k: liviano, mediano, pesado
Caminero-Camión	Factor de consumo	[km-veh/TJ]	Estudio “Análisis implementación programa de asesorías de transporte terrestre, VI etapa: OT 9. Plan de Transporte Interurbano, PTI. Análisis de eficiencia energética en el transporte de carga.”	Total país, Categoría de camión k: liviano, mediano, pesado. Tecnología s: E1-E5, biocombustible, híbrido, eléctrico

Modo	Nombre Variable o Parámetro	Nomenclatura y Unidad	Fuente	Desagregación
Caminero-Camión	Partición según tipo de operación	PO <sub>k,o</sub> [%]	Estudio “Análisis de aspectos críticos de la demanda energética global” (Comisión Nacional de Energía, 2010)	Total país, k: liviano, mediano pesado. o:urbana o interurbana
Caminero-Camión	Factores de emisión para contaminantes globales	FE-GEI [kg/TJ]	valores por defecto IPPC 2006	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Caminero-Camión	Factores de Emisión para contaminantes locales	FE-Loc [kg/TJ]	COPERT 4	CO,HC, NO <sub>x</sub> , MP

### 3.1.3 Estimación de emisiones transporte de pasajeros terrestre

Las emisiones para este caso están directamente relacionadas con la necesidad de transporte de pasajeros según cada región del país, por lo tanto, se define como la principal variable para calcular las emisiones a la demanda per cápita de transporte regional (km/año) o PKM per cápita regional.

Luego, el modelo para estimar las emisiones producidas por el transporte de pasajeros incluye a los tipos motorizados *vehículo particular*, *taxis* y *buses*, todos pertenecientes al modo *Caminero*. Las emisiones de la categoría buses agrega tanto la operación urbana como interurbana. En relación al transporte de pasajeros por modo ferroviario por región, el modelo incluye la operación urbana y no la interurbana. Esta simplificación no debiese afectar de manera relevante las emisiones finales del sector transporte, dado que la participación del modo ferroviario es menor al 1%<sup>21</sup>. Los esfuerzos en el levantamiento de información regional asociado al modelo para el transporte de pasajeros se enfocó en aquellas categorías tienen una alta participación en las emisiones (en este caso modo caminero).

Luego, a partir de la proyección del PKM regional al 2050 se obtendrán los resultados de consumo energético y posteriormente las emisiones, a partir de tres parámetros que se definen a continuación según cada región del país:

- Partición modal (%): Este parámetro indica la proporción en la cual se realizan los viajes motorizados en los diferentes tipos de transporte de pasajeros.
- Tasa de ocupación (pax/veh): Este parámetro corresponde a la tasa promedio de ocupación según tipo de transporte de pasajeros.
- Factor de consumo (km/lit): Este parámetro corresponde a la tasa promedio de consumo de combustible según el tipo de transporte de pasajeros.

<sup>21</sup> Según el BNE 2011 las Teracalorías del Sector Ferroviario (Diésel y Electricidad) son un 0,6 % de las Teracalorías totales del Sector Transporte.

Considerando lo anterior, las emisiones para el transporte de pasajeros quedan descritas para cada región según las siguientes ecuaciones:

$$CC_i \left[ \frac{TJ}{\text{año}} \right] = M_i [\%] * \frac{PKM [km/año] * Pob [per]}{TO_i \left[ \frac{per}{veh} \right] * FdC_i \left[ \frac{km-veh}{TJ} \right]} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$E_{ik} \left[ \frac{kg}{\text{año}} \right] = CC_i \left[ \frac{TJ}{\text{año}} \right] * FE_{ik} \left[ \frac{kg}{TJ} \right] \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

- $CC_i$  : Consumo energético para tipo de transporte de pasajeros i
- $M_i$  : Partición modal para tipo de transporte de pasajeros i
- $PKM$  : Demanda per cápita regional de transporte de pasajeros
- $Pob$  : Población regional
- $TO_i$  : Tasa de ocupación de tipo de transporte de pasajeros i
- $FdC_i$  : Factor de consumo de tipo de transporte de pasajero i
- $E_{ij}$  : Emisiones para tipo de transporte de pasajeros i del contaminante k
- $FE_{ik}$  : Factor de emisión para el tipo de transporte i del contaminante k

Las ecuaciones (3.4) y (3.5) describen de manera general el cálculo de emisiones empleado en el modelo de pasajeros. Sin embargo, para cada *tipo* de transporte de pasajeros (vehículo particular, taxi, bus y tren subterráneo, cuando aplique) existen más niveles de desagregación asociadas al tipo de energía que utilicen y al estándar de emisión que cumple, en particular, los tipos pertenecientes al modo caminero.

La descripción de los datos de entrada para el modelo de pasajeros se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Variables y parámetros que describen el modelo de emisiones transporte de pasajeros

Tipo transporte de pasajeros	Nombre Variable o Parámetro	Nomenclatura y Unidad	Fuente	Desagregación
Veh. Particular, Taxi, Bus y Metro	Demanda per cápita de transporte de pasajeros	PKM <sub>r</sub> [km/año]	Resultados de proyección en base a serie histórica	Regional r
Veh. Particular, Taxi, Bus y Metro	Partición Modal PKM	M <sub>ri</sub> [%]	Según EOD al 2006	Regional, por tipo i: veh. particular, taxi, bus y metro

Tipo transporte de pasajeros	Nombre Variable o Parámetro	Nomenclatura y Unidad	Fuente	Desagregación
Veh. Particular, Taxi, Bus y Metro	Tasa de Ocupación	TO <sub>ri</sub> [ton/veh]	“Análisis de aspectos críticos de demanda energética global”, Comisión Nacional de Energía, 2010	Regional, por tipo i: veh. particular, taxi, bus y metro
Veh. Particular, Taxi y Bus	Factor de consumo	FdC <sub>ris</sub> [km-veh/TJ]	<i>Análisis y Desarrollo de una Metodología de Estimación de Consumos Energéticos y Emisiones para el Transporte</i> . Junio 2010	Regional r, por tipo i: veh. particular, taxi, bus y metro. Tecnología s: E1-E5, biocombustible, híbrido, eléctrico
Metro	Factor de consumo	FdC <sub>r</sub> [km-veh/TJ]	“Análisis de aspectos críticos de demanda energética global”, Comisión Nacional de Energía, 2010	Regional r
Veh. Particular, Taxi, Bus	Factores de emisión para contaminantes globales	FE-GEI [kg/TJ]	valores por defecto IPPC 2006	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Metro	Factores de emisión para contaminantes globales	FE-GEI [kg/TJ]	valor del SIC, Ministerio de Energía	CO <sub>2</sub>
Veh. Particular, Taxi, Bus	Factores de emisión para contaminantes locales	FE-Loc [kg/TJ]	COPERT 4	CO, HC, NO <sub>x</sub> , MP
Veh. Particular, Taxi, Bus	Partición tecnológica	PT <sub>k,s</sub> [%]	INE, Plantas de Revisión Técnica	Regional r, tipo i: veh. particular, taxi y bus. Tecnología t: E1-E5, biocombustible, híbrido, eléctrico,
Veh. Particular, Taxi,	Partición tecnológica	PT <sub>k,s</sub> [%]	Según su participación observada al 2010. (0,006% del total de parque) Para el período 2031-2050 esta participación se duplicó	Regional r, tipo i: híbrido, eléctrico Tasa de ingreso para estas categorías respecto a los vehículos nuevos ingresados al parque: 0,002% anual hasta 2030 y 0,004% anual para 2031 y 2050,

El modelo de emisiones para el caso de transporte de pasajeros, considera la demanda de transporte motorizados pues estos incurren en un consumo energético y en la generación de emisiones. La demanda de transporte no motorizado no se incluyó como variable en el modelo pues no aportaría emisiones a la línea de crecimiento sin restricción. Por lo tanto, los PKM proyectados no incluyen la demanda de transporte no motorizado.

### 3.2 Proyección de Variables de Entrada

A continuación se describe la metodología de proyección de las variables de entrada del modelo, para las cuales existe información histórica para realizar la proyección. Las variables de entrada fueron identificadas en la sección anterior y son la base del cálculo de emisiones de los tres tipos de modelos desarrollados. Las series históricas para realizar las proyecciones se pueden consultar en Anexo A, Anexo B y Anexo C para los modelos aéreo-marítimo, transporte de carga y transporte de pasajeros, respectivamente.

Las variables de entrada a proyectar se indican en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4 Conjunto de variables a proyectar

Modelo	Tipo	Variable	Unidad genérica
Aéreo	Proyección	Consumo energético, nacional e internacional	Energía/año
Marítimo	Proyección	Consumo energético, nacional e internacional	Energía/año
Transporte de Carga	Proyección	TKM nacional	Tonelada-kilometro/año
Transporte de pasajeros	Proyección	PKM regional	km/año per cápita

#### 3.2.1 Modelo econométrico general

Existe un amplio espectro de modelos que se pueden seguir para la proyección del consumo energético en su línea base. Simulaciones con respecto a la serie histórica de comportamientos de la variable como por ejemplo Movimiento Browniano Geométrico (GBM) o Movimiento con Reversión a la media (MR) y regresiones o funciones que incluyen variables dependientes e independientes. Existen también modelos heurísticos como Redes Neuronales y Modelos Híbridos.

Empíricamente el sector transporte ha demostrado perfiles de consumo dependientes de variables macroeconómicas y demográficas. Dicho esto, es necesario explorar en modelos que utilicen series históricas de variables predictivas con el fin de proyectar las variables requeridas. Para el desarrollo econométrico se utilizan variables en logaritmo para conseguir que los residuos se comporten según una distribución normal de probabilidades.

Una representación del modelo más general sobre el cual se desarrolla la econometría sugiere una fórmula como la siguiente (Dahl and Sterner, 1991).

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(P_t) + \beta_3 \ln(P_{t-1}) + \beta_4 \ln(Y_t) + \beta_5 \ln(Y_{t-1}) + \beta_6 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

- $E_t$  : consumo energético en el periodo  $t$   
 $P_t$  : precio del energético  
 $Y_t$  . variable dependiente que típicamente puede ser un nivel de ingreso

Adicionalmente pueden existir otros factores que puedan considerarse según la variable a modelar como por ejemplo la población o el nivel de producto interno bruto mundial.

Basado en esta formulación general (Ecuación 3.6) se pueden derivar diferentes tipos de modelos específicos como modelos simples estáticos ( $\beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$ ), de rezagos distribuidos ( $\beta_6 = 0$ ), o autorregresivos ( $\beta_4 = \beta_5 = 0$ ).

El método econométrico a utilizado fue el de Mínimos Cuadrados. En general, se comenzó evaluando el modelo completo para luego ir eliminando las variables asociadas a coeficientes no significativos para luego escoger el modelo que presente un mejor ajuste, considerando la significancia de los coeficientes, el valor de R-Cuadrado, la autocorrelación a través del Q-test, y finalmente, la evaluación comparativa entre los modelos para una misma variable a través del test AIC.

Si la secuencia propuesta no entrega resultados satisfactorios, se procede a buscar otras alternativas de modelación, esto se refiere a:

- Incluir rezagos de las variables independientes de orden mayor a 1.
- Incluir rezagos de la variable dependiente de orden mayor a 1.
- Considerar variaciones de la variable independiente ( $\beta(\ln(Y_t) - \ln(Y_{t-1}))$ ).

### **Consideración sobre el precio**

Según la literatura de consumo de combustible es posible identificar varios estudios que señalan que el efecto del ingreso es más significativo que el de los precios. Eltony y Al-Mutairi (1995) muestran que la demanda es inelástica en el precio en comparación a cambios en el ingreso. El mismo tipo de conclusiones se infieren de Banaszak et al. (1999), Eltony and Al-Mutairi (1995) y Ramanathan (1999). En general, estos estudios muestran que el efecto del ingreso es particularmente significativo en países en vías de desarrollo. Por ejemplo, en India el crecimiento del consumo de petróleo es mayor al del crecimiento económico.

Lo anterior junto con el hecho de que el tratamiento adecuado de precios en el muy largo plazo es extremadamente complejo, han llevado a que en esta primera fase del estudio sean las variables de ingreso las determinantes del consumo. La omisión de variables de precio

se justifica por la alta inelasticidad de la demanda de cada combustible que muestra la literatura y dado que los precios relativos entre los combustibles no muestran cambios significativos.

### **Elasticidad de largo plazo**

Se debe considerar la evaluación de la elasticidad de largo plazo, la que difiere de la elasticidad de corto plazo tanto en modelos con rezagos de la variable independiente y en modelos autoregresivos.

Considerando un modelo con rezagos según la ecuación 3.7, la elasticidad de largo plazo, por ejemplo al precio, está dada por la sumatoria de los coeficientes asociados al precio o rezagos de este (Sterner 2006). En este caso la elasticidad de largo plazo es  $\beta_2 + \beta_3$ .

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(P_t) + \beta_3 \ln(P_{t-1}) + \beta_4 \ln(Y_t) + \beta_5 \ln(Y_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Ahora si consideramos un modelo autorregresivo según la ecuación 3.8, la elasticidad de largo plazo, por ejemplo al precio, está dada por el cuociente entre el coeficiente del precio y 1 menos el coeficiente del rezago de la variable dependiente (Lin 2010). En este caso la elasticidad de largo plazo es  $\frac{\beta_2}{1-\beta_4}$ .

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(P_t) + \beta_3 \ln(Y_t) + \beta_4 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Con estos antecedentes la forma de la elasticidad de largo plazo para el modelo general está dada por  $\frac{\beta_2 + \beta_3}{1-\beta_6}$ .

### 3.2.2 Proyección de consumo energético marítimo y aéreo

La proyección de los sectores marítimo y aéreo se realizó a través de la proyección del consumo energético, esto permite independizar el modelo de fluctuaciones en la participación de los distintos combustibles utilizados en estos sectores.

Estas proyecciones se realizaron diferenciando el consumo nacional del internacional ya que el protocolo de conteo de emisiones de la UNFCCC exige esta distinción tal que permita contabilizar como emisiones nacionales sólo aquellas producidas por la operación nacional (origen y destino dentro del país).

#### **Proyección de consumo nacional**

El modelo econométrico general utilizado para la proyección del consumo nacional en los sectores aéreo y marítimo está dado por la siguiente ecuación:

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_4 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

- $E_t$  : consumo energético en el periodo  $t$   
 $Y_t$  : PIB nacional o excluyentemente el PIB per cápita

El razonamiento económico para la consideración de estas variables es que el aumento del producto interno bruto (PIB) está ligado, para el caso marítimo principalmente para el transporte de carga, y para el caso aéreo para el transporte de pasajeros y en menor medida al transporte de carga. El aumento de la actividad económica aumenta la demanda por bienes y servicios generando un aumento del transporte de carga, además de posibilitar un mayor número de viajes aéreos de pasajeros dado el mayor nivel de ingreso de la población. En general, las variables explicativas de transporte, y en particular el consumo energético de transporte, han reconocido estas variables en numerosos papers, como por ejemplo, Pindyck y Rubinfeld (1991) o Dahl y Sterner (1991), entre otros<sup>22</sup>.

La serie para el desarrollo del modelo abarca entre los años 1991 y 2006, que si bien es acotada, permite modelar esta variable. Por esta razón se exige un nivel de significancia de los coeficientes de 90%.

---

<sup>22</sup> Otras publicaciones más actuales como Chumacero y Quiroz (2007) y PROGEA (2008)

**Proyección de consumo internacional**

El modelo econométrico general para la proyección del consumo internacional difiere entre los 2 sectores. En el sector marítimo este consumo responde exclusivamente a carga, sin embargo, en el sector aéreo este consumo responde tanto a carga como a demanda por turismo o servicios internacionales.

En términos económicos, esto se refiere a que la demanda de energía por transporte marítimo internacional dependería principalmente de la demanda internacional por bienes, lo que puede reflejarse en el nivel mundial del producto interno bruto (PIB mundial). Debido a esto la variable independiente a evaluar en el modelo marítimo internacional es el PIB mundial ajustado por poder de paridad de compra (PIB PPP). Se utiliza este ajuste dado que es necesario reflejar la capacidad real de la demanda internacional ajustado al poder adquisitivo. El modelo general a evaluar para el consumo marítimo internacional es el siguiente:

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_3 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

$E_t$  : consumo energético en el periodo  $t$   
 $Y_t$  : nivel del PIB PPP mundial

Por otra parte el consumo aéreo producido por operaciones internacionales dependería del PIB PPP mundial, pero además del PIB nacional,

Esto se debe a que la variable refleja, por un lado, un crecimiento de la demanda local por viajes internacionales, es decir, un mayor acceso a realizar viajes internacionales tanto turísticos como de negocios, lo que sería catalizado por el aumento del ingreso doméstico. Adicionalmente, la variable está compuesta por una fracción impulsada por la demanda extranjera por vuelos desde y hacia el país, esta componente se vería afectada en forma general por las condiciones económicas internacionales, reflejadas en el producto internacional.

Por esta razón el modelo general seleccionado para proyectar la demanda energética del sector aéreo está dado por la siguiente ecuación:

$$\ln(E_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_4 \ln(X_t) + \beta_5 \ln(X_{t-1}) + \beta_3 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

$E_t$  : consumo energético en el periodo  $t$   
 $Y_t$  : nivel del PIB PPP mundial  
 $X_t$  : PIB nacional o excluyentemente el PIB per cápita nacional

La serie histórica para el desarrollo del modelo abarca los años 1991 y 2006, que si bien es acotada, permite modelar esta variable. Nuevamente, se exige un nivel de significancia de los coeficientes de 90%.

### 3.2.3 Proyección de TKM, modelo de transporte de carga

La proyección del sector de transporte de carga se realiza a través de la variable tonelada-kilometro (TKM). Esta se calcula agregadamente para los sectores camionero y ferroviario con el objeto de no excluir potenciales cambios modales de la carga en la proyección.

Las variables que pueden impulsar cambios en el TKM son diversas (HAO Jia, 2004), Johnson et al. (2008) consideran indicadores de producción para las industrias más relevantes, además de indicadores de producción agregados y el PIB. Ramanathan (1999) utiliza un índice de producción industrial total y el precio de los combustibles.

Como se menciona en la sección 3.2.1, en este estudio no se consideró la variable precio, y para el análisis de este modelo se excluyen las variables de producción industrial. Si bien no incluirlas omite información relevante para la modelación, existe una correlación entre la producción industrial y el PIB, lo que merma la información omitida. Por otra parte la proyección de las variables de producción industrial requiere de un análisis mucho más extenso del abarcado en esta etapa del proyecto.

Con estas consideraciones el modelo econométrico general para la proyección de la demanda de transporte de carga TKM está dado por la siguiente ecuación:

$$\ln(TKM_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_4 \ln(E_{t-1}) \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

$TKM_t$  : demanda de transporte de carga en el período  $t$   
 $Y_t$  : nivel del PIB nacional

La información de la variable TKM para esta proyección se encuentra disponible entre los años 1998 y 2006, serie considerada corta, por esta razón se relajan las exigencias de significancia de los coeficientes a un nivel de 90%.

### 3.2.4 Proyección de PKM, modelo de transporte de pasajeros

La proyección para el transporte de pasajeros se realizó a través de la variable demanda per cápita de transporte (km/año) regional y se denomina en este estudio como PKM regional. A nivel local no existen precedentes del registro de esta variable de manera periódica, por esta razón se construyó de forma indirecta las series regionales históricas de PKM (para mayor detalle ver Anexo C).

La literatura sugiere diversos factores que explicarían el comportamiento de los PKM. Cosgrove, D. (2007) desarrolla un modelo de PKM que considera la variable PIB per cápita como impulsor de los cambios de dicha variable. Posteriormente, en Cosgrove, D. (2011) se sugiere un modelo dependiente del PIB per cápita de las zonas urbanas, sin embargo, explica que la variable puede verse afectada además por factores como reformas al transporte en el cambio modal, variaciones de precio de los combustibles, cambios de infraestructura o patrocinio al transporte público.

Ramanathan (1999) construye un modelo de PKM utilizando como variables independientes el PIB, el precio del combustible y la proporción de población urbana.

Schäfer, A. (2006) destaca la relación entre el PKM y el PIB per cápita, pero también alude a la tasa de motorización como determinante en los niveles del PKM. Sugiere que el presupuesto de tiempo destinado a transportarse varía respecto de los niveles de ingreso, debido principalmente a la utilización de modos de transporte más veloces, lo que a su vez posibilita viajes más largos (Figura 3.2).

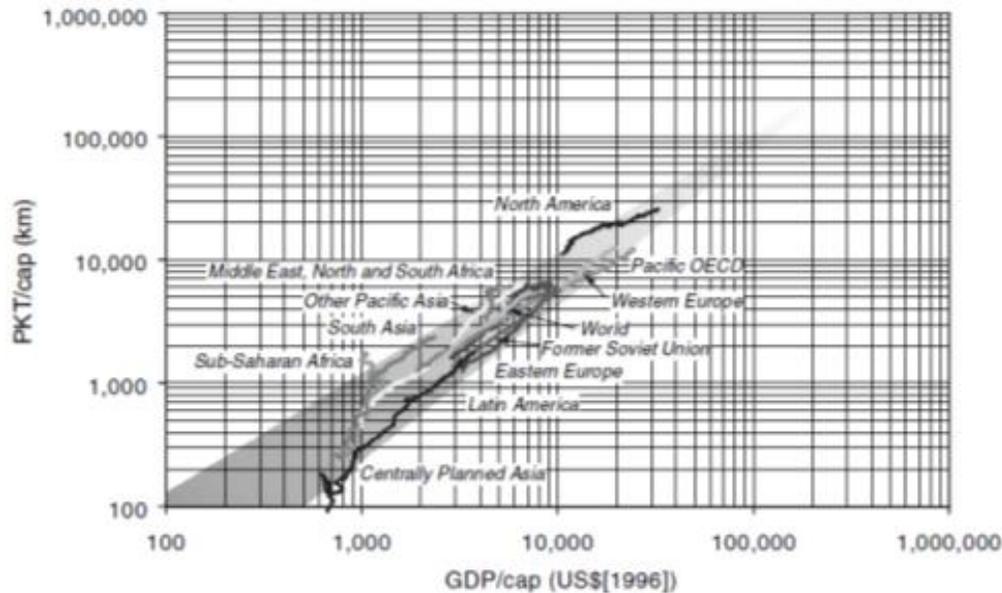


Figura 3.2 Relación logarítmica entre PKM y el PIB per cápita para 11 regiones mundiales entre los años 1950 y 2000. Fuente: Schäfer, A. (2006)

Respecto de las variaciones de esta variable, Ramanathan (1999) observa para India entre los años 1956 y 1989 un crecimiento promedio de la variable de un 8%, este valor es influenciado por la motorización y además por variación y el nivel del PIB en dicho periodo. Considerando lo anterior, se observa que economías desarrolladas y consecuentemente más saturadas, las proyecciones de la variación del PKM no superarían el 0,3% anual, como propone el estudio *2050 Pathways Analysis* de Julio del año 2010, desarrollado por el Departamento de Energía y Cambio Climático del Reino Unido y donde se proyecta el comportamiento del PKM del Reino Unido hasta el año 2050. Esta evidencia resalta la influencia del nivel de ingreso y las condiciones estructurales en el comportamiento del PKM.

Sobre la base de la información bibliográfica y considerando las limitaciones de información que posibilitan la construcción de las series y su proyección, se desarrolla un modelo de la variable PKM para cada región considerando como única variable independiente el PIB per cápita regional, definido de forma general por la siguiente ecuación:

$$\ln(PKM_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_3 \ln(PKM_{t-1}) + \beta_3 Dummie \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde:

- $PKM_t$  : demanda per cápita de transporte de pasajeros en el período t  
 $Y_t$  : representa el PIB per cápita  
 $Dummie$  : considera valores 1 o 0

La variable *Dummie* representa un cambio estructural que afecta el nivel de la variable dependiente. A continuación se explica el porqué de esta variable.

La Figura 3.3 presenta el PKM histórico para cada región del país<sup>23</sup>, en ella se aprecia en promedio una tendencia creciente. Sin embargo, existen casos como la primera región donde la curva pareciera ser constante o incluso decreciente. Además, algunas regiones presentan una inflexión alrededor del año 2001. Una perspectiva agregada del PKM, es decir, la observación del PKM promedio nacional permite observar de mejor forma este fenómeno.

<sup>23</sup> Se utilizó el antiguo sistema de regionalización pues los cambios se producen después del 2006

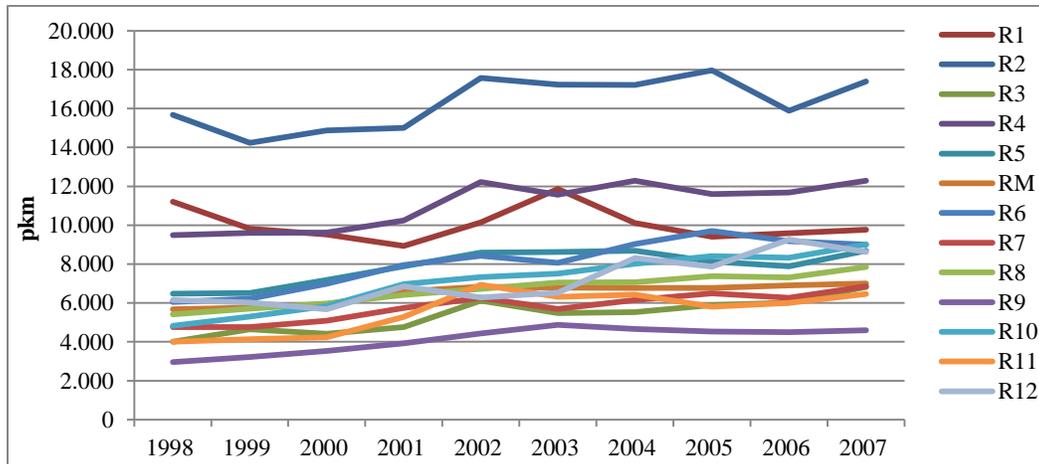


Figura 3.3 PKM históricos por región

La Figura 3.3 muestra el PKM histórico nacional. En ella se observa una variación importante en el valor de la variable antes y después del año 2001.

Esta información sugiere un cambio importante en el comportamiento de la variable alrededor del año 2001 producido potencialmente por la omisión de información importante, ya sea un cambio estructural que afecta a la variable, u otra variable relevante para el modelo. Lo anterior puede apreciarse de acuerdo a la información disponible como un periodo de crecimiento intensivo de la variable entre los años 1998 (o antes)-2002 para posteriormente entrar en un periodo de mayor estabilidad con un crecimiento más moderado.

Esto puede estar gatillado por múltiples efectos individuales o en conjunto, en particular, en este caso se observa que dicho comportamiento se deriva principalmente de la cantidad de combustible consumido para el transporte de pasajeros. Lo que puede verse afectado por el crecimiento de la actividad comercial regional, mejores opciones generales de financiamiento para la adquisición de vehículos, cambios importantes en infraestructura, cambios de conducta de los pasajeros o efectos generados por el precio de los combustibles, entre otros. Particularmente, el precio de los combustibles presentó un alza sostenida a contar del año 2002 lo que podría ser en parte responsable de la disminución del crecimiento de la variable PKM.

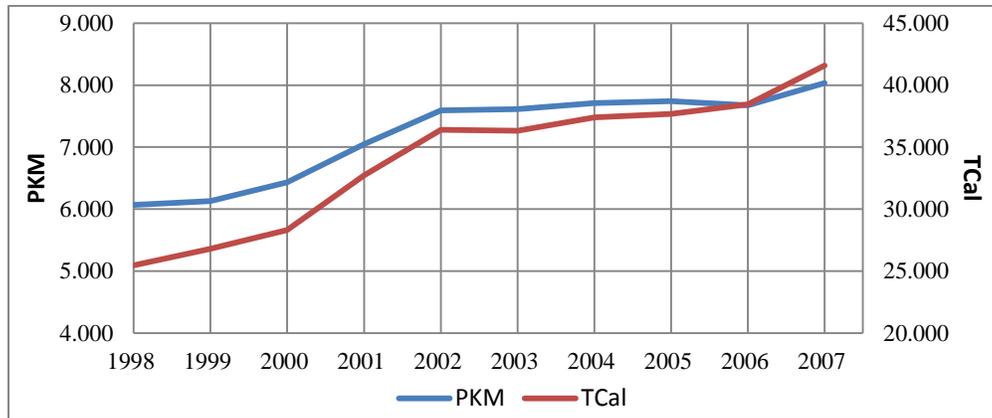


Figura 3.4 PKM y consumo de energía en transporte de pasajeros históricos nacionales.

Con estos antecedentes se incluye una variable *Dummie* en el modelo con el objeto de capturar un cambio estructural en la constante u otra información omitida, esta adopta el valor 1 en el periodo 1998-2000, y 0 posteriormente.

Sin embargo, cada serie regional no tiene precisamente el mismo comportamiento en dicho periodo. Si bien se observan alteraciones similares en la mayoría de las regiones, en algunos casos son de un largo mayor o menor. La Tabla 3.5 muestra el valor de las variables *Dummies* utilizadas para cada región.

Tabla 3.5 *Dummies* para la modelación del PKM regional.

Año	R1	R2	R3	R4	R5	RM	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
1998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1999	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2000	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2001	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como se aprecia en las figuras precedentes, la serie disponible para la evaluación del modelo es corta, lo que sumado a la forma de construcción indirecta de la variable se considera que la información contiene un grado de sesgo. Por esta razón se relajan los valores de significancia exigidos, utilizando como criterio el mejor modelo disponible considerando principalmente la significancia de los coeficientes, el test AIC, y el Q-test para evitar problemas de autocorrelación.

## 4 Proyección del Parque Vehicular

Si bien la metodología propuesta requiere la proyección de algunas variables ya definidas en el capítulo anterior, adicionalmente se proyecta el parque vehicular lo cual permite comparar los resultados obtenidos con la metodología propuesta (capítulo 3), y satisfacer de esta forma requerimientos de información del estudio como es la cuantificación del parque vehicular.

### 4.1 Modelos Generales de Proyección

Tal como el consumo energético, el stock o parque vehicular también puede ser modelado de esta forma general como una función log-lineal dependiente del ingreso, el precio del combustible, o la población.

Al igual que en la sección 3.2, y conservando las consideraciones sobre la inclusión de la variable precio, se plantea un modelo general de la siguiente forma:

$$\ln(S_t) = \beta_1 + \beta_2 \ln(Y_t) + \beta_3 \ln(Y_{t-1}) + \beta_4 \ln(S_{t-1}) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

$S_t$  : stock o parque vehicular en el periodo t  
 $Y_t$  : variable dependiente. Típicamente nivel de ingreso además de indicadores de población

La consideración de estas variables para la proyección de stock vehicular posee amplios precedentes, como Dahl and Sterner (1991) o a nivel nacional se observa estudios como Chumacero y Quiroz (2007) y PROGEA (2008).

En base a la ecuación 4.1, para la categoría *camiones* el modelo de proyección considera como variable dependiente el PIB. De igual forma el parque vehicular de *buses* considera esta variables, pero además se incorpora al modelo la población como potencial driver del stock, esta es una forma alternativa de considerar el PIB per cápita como driver de esta variable, pero sin restringir a un único coeficiente el cociente del PIB y la población.

La serie para el parque de buses se encuentra disponible entre los años 1986 y 2006, mientras que la serie para el parque camionero se presenta entre los años 1980 y 2006. Con estas series se exige un nivel de significancia de un 95% para los coeficientes.

## 4.2 Proyección del Parque de Vehículos Livianos y Medianos

Para la proyección de esta categoría se utiliza la variable vehículos cada 1000 habitantes, como sugiere Dargay (2007). El parque de vehículos livianos y medianos se ve impulsado por el nivel de ingreso per cápita de la población. Esta proyección considera un modelo log-lineal como el propuesto para la proyección general de parque (ecuación 4.1), pero además considera el efecto de saturación de esta categoría. Para ello se utilizan los resultados obtenidos por Dargay (2007) ajustados a los datos obtenidos por el modelo log-lineal.

Los datos históricos para la evaluación de este modelo abarcan el periodo 1980-2006 por lo que se exige un nivel de significancia de los coeficientes de 95%. (ver Anexo D).

### Moldeo alternativo de saturación (Dargay 2007)

Como se mencionó anteriormente, se desarrolló una proyección alternativa del parque que considere el fenómeno de saturación en el periodo 2030-2050. En esta proyección el crecimiento del parque se ve restringido por condiciones demográficas propias de cada país alcanzando un “nivel de saturación” en el cual el parque tiende asintóticamente hasta dicho nivel. Para el desarrollo de esta proyección se utilizan los resultados del modelo desarrollado en el paper “*Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030*”.

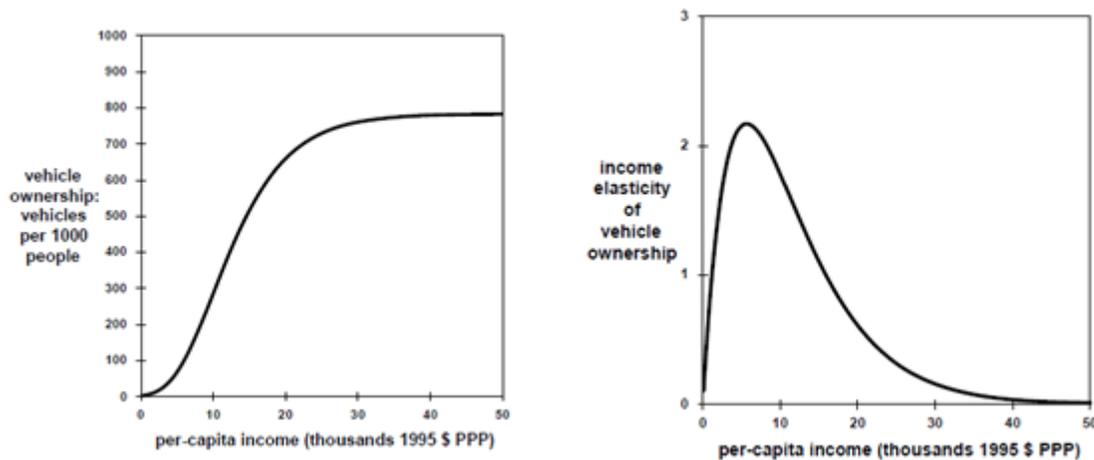


Figura 4.1 Función Gompertz y su respectiva elasticidad del parque al ingreso (fuente: Dargay et al 2007)

El modelo representa el parque como una función Gompertz cuya curva y su elasticidad al ingreso per cápita están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$V_t^* = \gamma e^{\alpha e^{\beta GDP_t}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$\eta_t^{LR} = \alpha \beta GDP_t e^{\beta GDP_t} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

- $V_t^*$  : Equilibrio de largo plazo de vehículos por cada mil habitantes en el año  $t$ .  
 $\gamma$  : Nivel de saturación (vehículos cada mil habitantes)  
 $GDP_t$  : Ingreso per cápita  
 $\eta_t^{LR}$  : Elasticidad de largo plazo de vehículos por habitante respecto del ingreso per cápita  
 $\alpha, \beta$  : Parámetros negativos que definen la curva

La modelación estadística asume que el stock deseado de automóviles ( $V_t^*$ ) se ajusta suavemente en el tiempo a través de un mecanismo de expectativas adaptativas que viene dado por:

$$V_t = V_{t-1} + \theta(V_t^* - V_{t-1}) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde  $\theta$  es la velocidad de ajuste ( $0 < \theta < 1$ ), luego la ecuación de parque cada mil habitantes está dada por:

$$V_t = \gamma \theta e^{\alpha e \beta GDP_t} + (1 - \theta)V_{t-1} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Para el cálculo de la saturación el modelo supone que el nivel máximo de saturación alcanzable es el nivel de USA. Luego el nivel de saturación está dado por:

$$\gamma_{it} = \gamma_{MAX} + \lambda \overline{D_{it}} + \varphi \overline{U_{it}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$\begin{aligned} \overline{D_{it}} &= D_{it} - D_{USA,t} & \text{si} & \quad D_{it} > D_{USA,t} \quad , \quad \overline{D_{it}} = 0 \\ \overline{U_{it}} &= U_{it} - U_{USA,t} & \text{si} & \quad U_{it} > U_{USA,t} \quad , \quad \overline{U_{it}} = 0 \end{aligned}$$

Donde:

- $\gamma_{MAX}$  : Nivel de saturación máximo (USA)  
 $D_{it}$  : Densidad de población del país  $i$  en el año  $t$   
 $U_{it}$  : Urbanización del país  $i$  en el año  $t$   
 $\lambda, \varphi$  : Parámetros negativos

El nivel de urbanización es la proporción de la población que vive en las zonas urbanas del país. De esta forma es posible completar el modelo incluyendo el efecto de la saturación del parque vehicular de vehículos livianos y medianos.

## 5 Resultados de Proyecciones

Este capítulo presenta los resultados de las proyecciones requeridas para la estimación de emisiones en los distintos modos de transporte considerados en el estudio y desagregado por los 5 escenarios de PIB considerados en el estudio: referencia, pesimista, medio bajo, medio alto y optimista.

En la sección 5.1 se presentan los resultados de proyección de consumo energético asociado a los modos marítimo y aéreo (nacional e internacional). En las secciones 5.2 y 5.3 se presentan las series proyectadas de demanda de transporte de carga nacional (TKM) y de la demanda per cápita regional de transporte de pasajeros (PKM), respectivamente.

El detalle de los modelos econométricos, con su análisis y evaluación bajo el punto de vista estadístico se puede encontrar en el Anexo E.

### 5.1 Consumo Energético Aéreo y Marítimo

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el consumo energético para el período 2007-2050 de los modos aéreo y marítimo.

#### 5.1.1 Modo aéreo, consumo nacional

La Figura 5.1 muestra el resultado econométrico para el consumo aéreo nacional (Gcal), y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Parámetros modelo de consumo energético aéreo nacional (Gcal).

Variable	Coficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.683784	3.685348	-0.185541	0.8562
LOG(PPC)	3.519570	1.363950	2.580423	0.0256
LOG(PPC(-2))	-2.866121	1.316004	-2.177897	0.0521
LOG(CONSUMO_AEREO_NAC(-1))	0.679907	0.262334	2.591767	0.0251

En la Figura 5.1 se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

## Informe Final

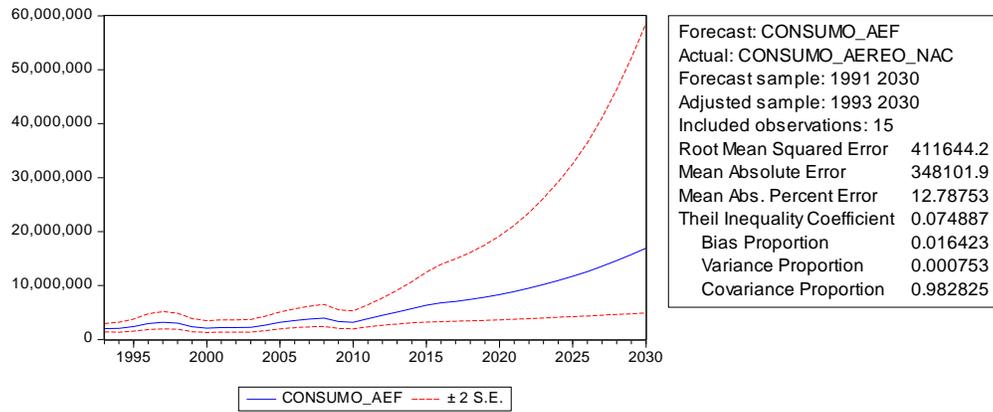


Figura 5.1: Modelo de proyección consumo energético aéreo nacional (Gcal).

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

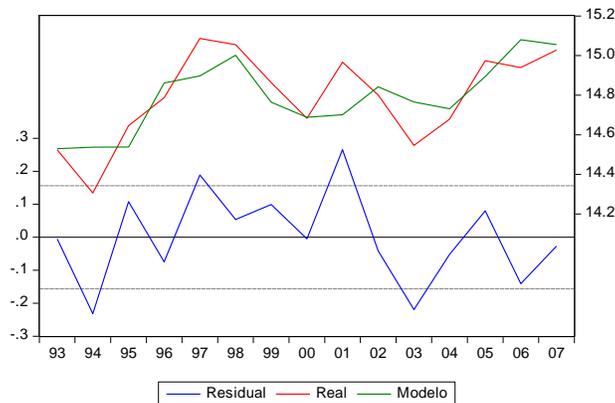


Figura 5.2: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales del consumo energético aéreo nacional.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo 3,51. La elasticidad de largo plazo es 2,04 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita incrementó el consumo energético en 2,04%.

### 5.1.1.1 Tratamiento alternativo periodo 2030-2050

Al evaluar los resultados en los distintos escenarios se observa un comportamiento errático de las proyecciones a partir del año 2030, principalmente por los quiebres en el crecimiento del PIB en los escenarios más optimistas como se aprecia en la Figura 5.3. En ella se aprecia una caída de los consumos en los escenarios optimistas, siendo al año 2050 incluso superados por los escenarios intermedios.

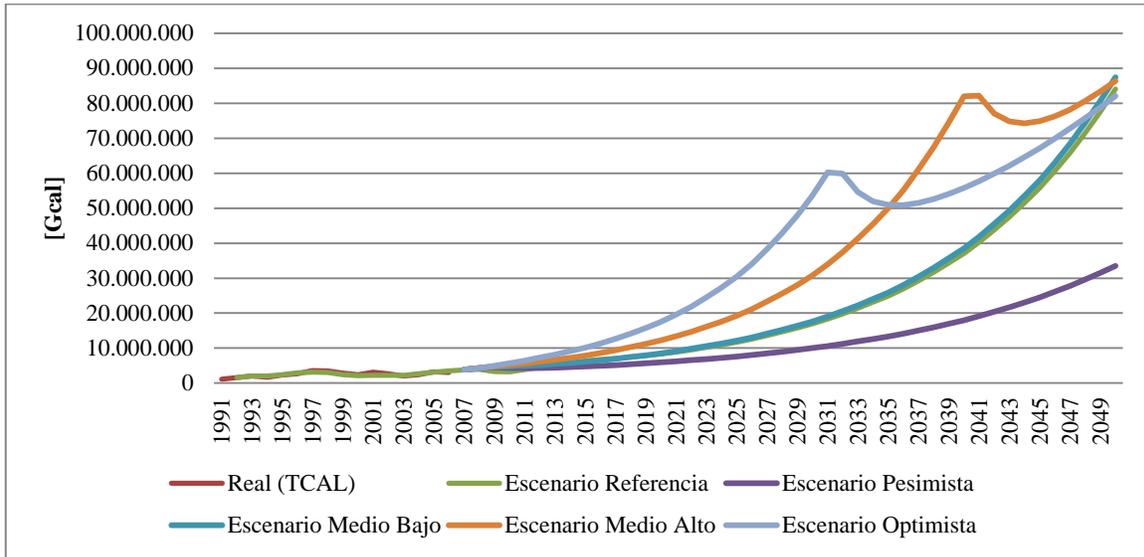


Figura 5.3: Proyección del consumo energético aéreo nacional al año 2050, todos los escenarios.

Para corregir esta situación se analiza el comportamiento de mantener la tasa de crecimiento del año 2030 para todos los escenarios, sin embargo esto genera un crecimiento excesivamente acelerado durante los últimos 20 años. Por ejemplo, si se conserva la tasa de crecimiento del año 2030 para el escenario optimista, esto se traduce en un consumo de 500 mil Tera calorías para el año 2050, aproximadamente 150 veces el consumo del año 2006. Esto no es factible por la eventual saturación del tráfico aéreo, la infraestructura aeroportuaria y además porque representa una demanda irreal considerando la cercanía de muchos destinos aéreos nacionales, principalmente en la zona central.

Por otra parte IEA (2006) proyecta un incremento del consumo de energía en el transporte aéreo, nacional e internacional, en los países de la OECD, en el periodo 2004-2030, de un 61,5%, con una tasa anual menor en la segunda mitad del periodo, esto sugiere un efecto de saturación en el sector, es decir que desde cierto nivel de desarrollo, las tasas de crecimiento disminuyen en el tiempo.

Considerando el factor anterior, y suponiendo que al año 2030 Chile alcanzaría al menos el nivel promedio de desarrollo de los países de la OECD al año 2004, es entonces posible acotar el nivel del crecimiento del consumo energético aéreo, por el nivel de crecimiento del consumo de los países OECD en el periodo 2004-2030.

Luego, durante el periodo 2030-2050 la demanda energética aérea nacional se modela forzando que el crecimiento durante todo el periodo sea de un 61,5%. La variación anual corresponde a la tasa de crecimiento del año 2030, pero se pondera geométricamente por un factor de decaimiento, esto quiere decir que año a año la tasa de crecimiento decae al ser ponderada por un factor, este factor se escoge de acuerdo a que se cumpla la condición de crecimiento total del periodo 2030-2050 de un 61,5%.

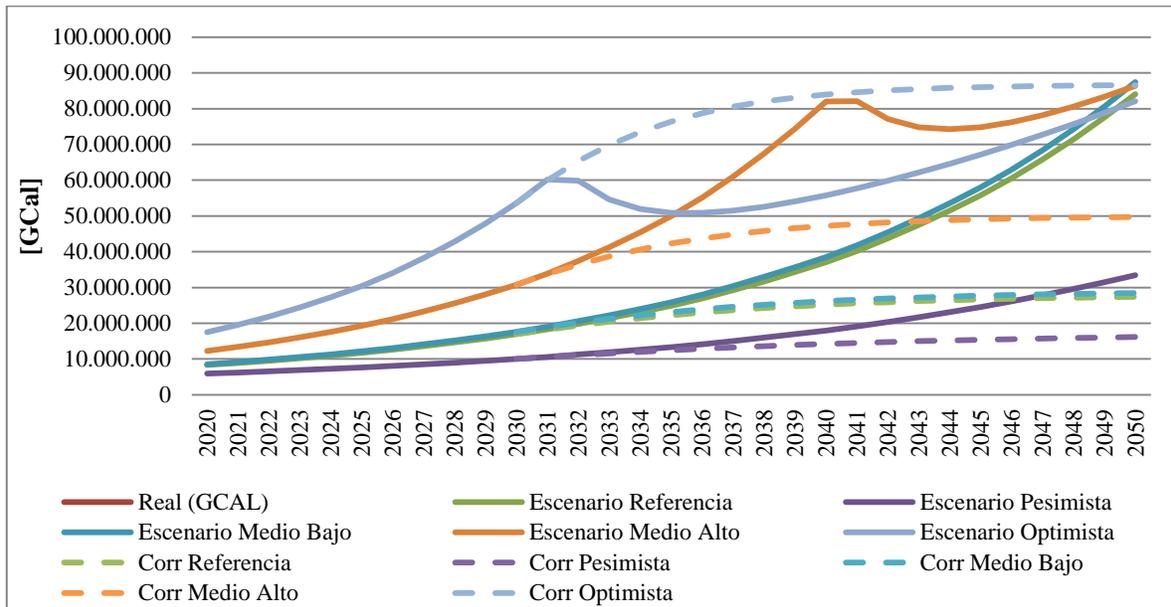


Figura 5.4 Corrección del consumo aéreo nacional 2020-2050, todos los escenarios

Los resultados presentados en la Figura 5.4 corresponden a las series empleadas para el cálculo de emisiones nacionales del modo aéreo. El detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

### 5.1.2 Modo aéreo, consumo internacional

El consumo energético aéreo internacional (Gcal) queda definido econométricamente con los siguientes parámetros (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Parámetros modelo de consumo energético aéreo internacional (Gcal)

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-1.458404	2.236981	-0.651952	0.5267
LOG(PIB)	-2.030391	0.991985	-2.046796	0.0632
LOG(PIB(-1))	2.683371	0.999058	2.685901	0.0198
LOG(AEREOINTER(-1))	0.339619	0.177974	1.908258	0.0806

En la Figura 5.5 se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

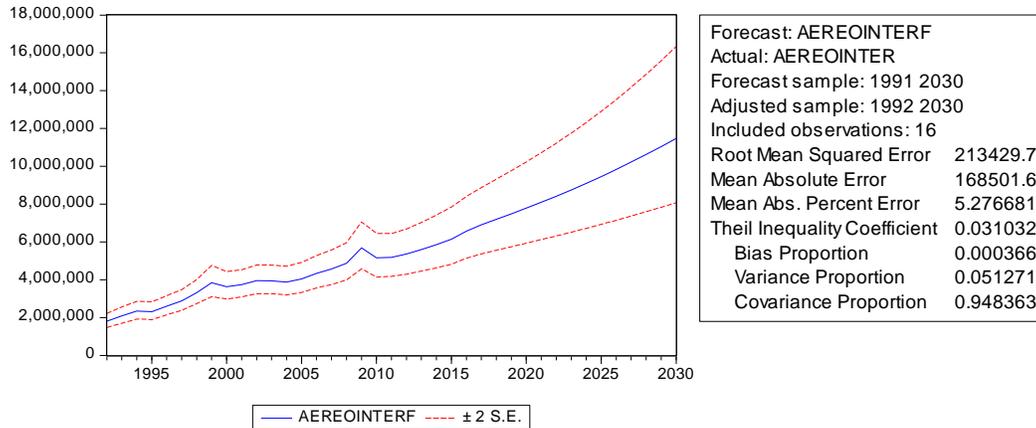


Figura 5.5: Modelo de proyección consumo energético aéreo internacional (Gcal).

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

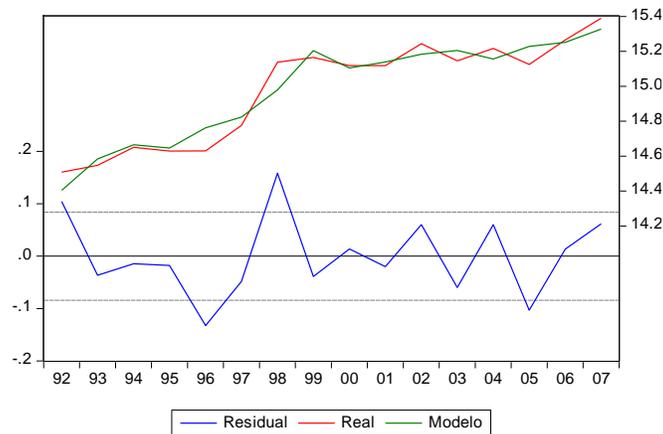


Figura 5.6: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales del consumo energético aéreo internacional.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo de -2,03 lo cual se ajusta a un valor positivo con la elasticidad del rezago. La elasticidad de largo plazo es 0,98 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB incrementó el consumo energético en 0,98%.

### 5.1.2.1 Tratamiento alternativo periodo 2030-2050

La evaluación del modelo en los escenarios optimistas genera una irregularidad menor en la proyección. El quiebre en el crecimiento del PIB produce un incremento temporal en la proyección del consumo energético, esto es corregido conectando el punto previo antes de la irregularidad con el resultado al año 2050. La Figura 5.7 muestra tanto el modelo con la irregularidad, y la corrección propuesta.

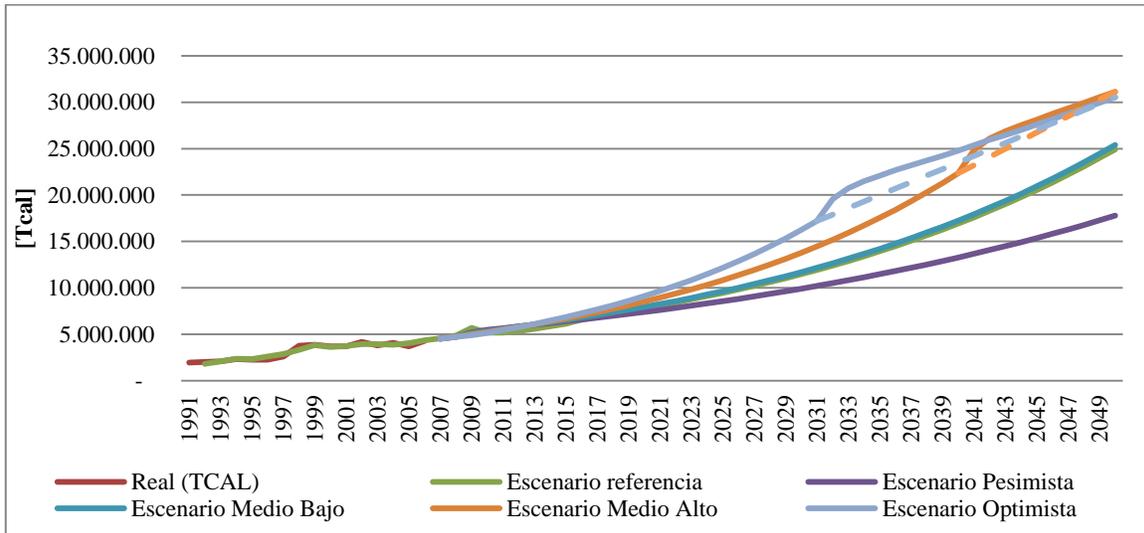


Figura 5.7: Corrección del consumo aéreo internacional, 2030 - 2050, todos los escenarios.

Los resultados presentados en la Figura 5.7 corresponden a las series empleadas para el cálculo de emisiones internacionales del modo aéreo. El detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

### 5.1.3 Modo marítimo, consumo nacional

La Figura 5.8 muestra el resultado econométrico para el consumo marítimo nacional (Gcal), y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Parámetros modelo de consumo energético marítimo nacional (Gcal)

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.735035	3.971755	0.436843	0.6694
LOG(PPC)	0.463869	0.325061	1.427019	0.1771
LOG(NACIONAL(-1))	0.644195	0.242597	2.655415	0.0198

En la Figura 5.8 se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

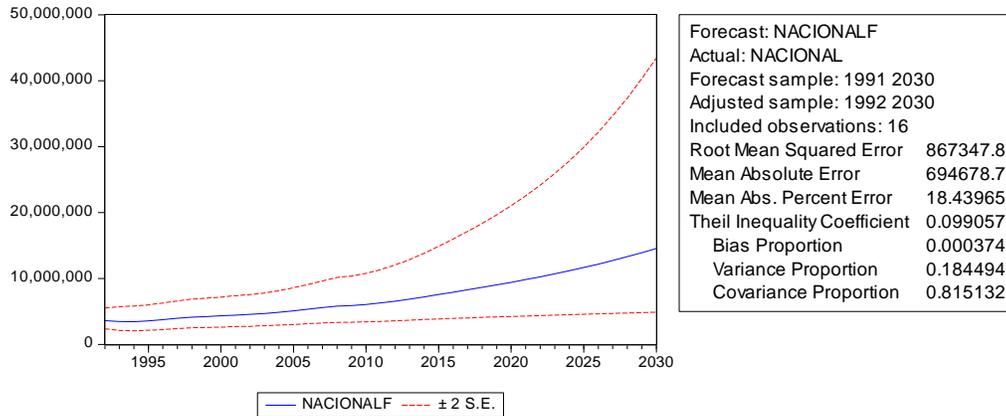


Figura 5.8: Modelo de proyección consumo energético marítimo nacional (Gcal).

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

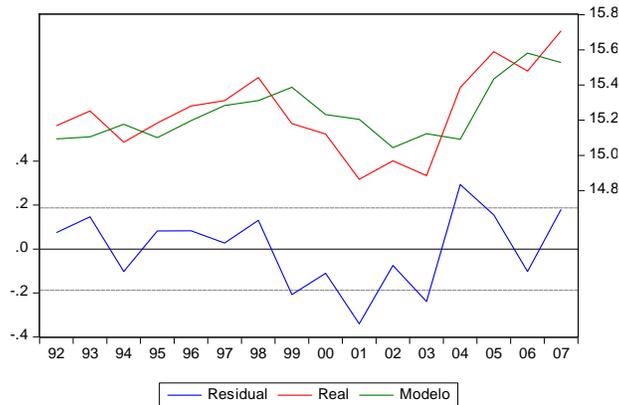


Figura 5.9: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales del consumo energético marítimo nacional.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo 0,46 y la elasticidad de largo plazo de 1,3 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita incrementó el consumo energético en 1,3%.

Finalmente, el detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

### 5.1.4 Modo marítimo, consumo internacional

El consumo energético marítimo internacional (Gcal) queda definido econométricamente con los siguientes parámetros.

Tabla 5.4 Parámetros modelo de consumo energético marítimo internacional (Gcal)

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-22.73900	2.092632	-10.86622	0.0000
LOG(PIBM)	3.566776	0.194716	18.31788	0.0000

Esta variable queda definida por el PIB mundial evaluado en poder de paridad de compra, debido a esto se considera un escenario único de proyección del consumo energético marítimo internacional, dado que no se ve influenciado por variables internas.

En la Figura 5.10 se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

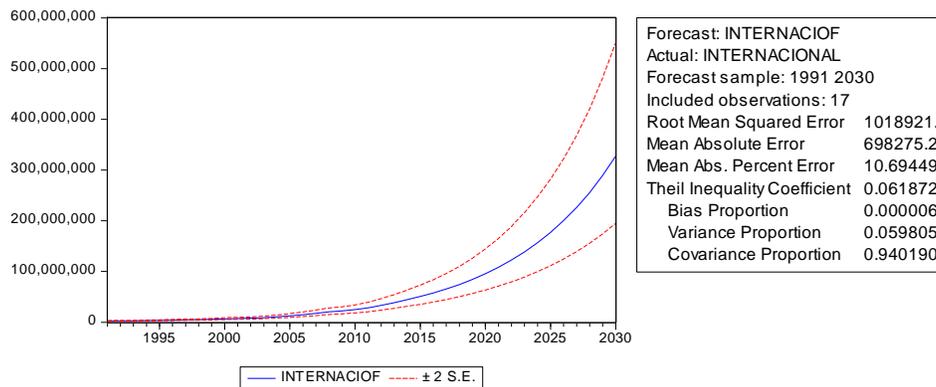


Figura 5.10: Modelo de proyección consumo energético marítimo internacional (Gcal).

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

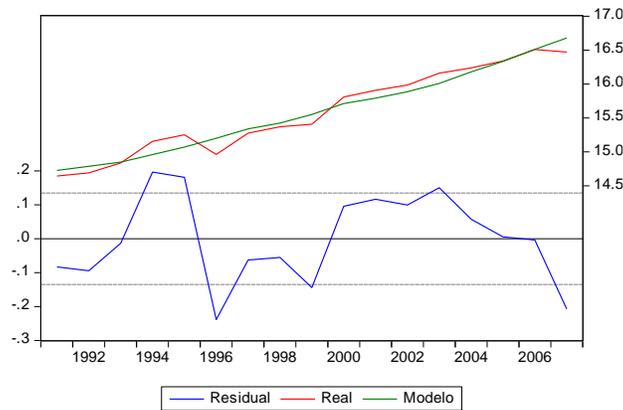


Figura 5.11: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales del consumo energético marítimo internacional.

Los resultados indican una elasticidad de corto y largo plazo 3,56 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB mundial incrementó el consumo energético en 3,56%.

#### 5.1.4.1 Tratamiento alternativo periodo 2030-2050

Como se observa en la Figura 5.10, la proyección tiene un crecimiento muy intenso. Este resultado es esperable considerando que la variable histórica creció casi 7 veces entre el año 1991 y 2006. Sin embargo, este crecimiento explosivo no parece factible en el largo plazo considerando que dada la proyección, al año 2050 la variable superaría los 4,2 millones de teracalorías, es decir, un crecimiento de la demanda energética de 300 veces el valor del año 2006 y con un incremento el año 2050 de 500 mil teracalorías.

Por otra parte, el consumo bunker marítimo de Estados Unidos durante el año 2009 fue de 240.750 TCal (Balances de la Agencia Internacional de Energía<sup>24</sup>), valor que es alcanzado por el modelo el año 2028 para Chile. En el modelo sin contracción el consumo crece 20 veces desde dicho año hasta el 2050. Y el último año crece 500 mil TCal, es decir, 2 veces el consumo anual de USA al año 2009. Estas razones llevan a considerar infactible dicho crecimiento. El modelo con congelamiento del crecimiento desde el año 2030, incrementa el consumo energético aproximadamente 4 veces entre el año 2030 y 2050.

Por la razón anterior, a partir del año 2030 se congela el incremento anual de la variable llegando a un consumo el año 2050 de 1,09 millones de teracalorías con un incremento de 38 mil teracalorías en dicho año.

Finalmente, el detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

<sup>24</sup> Base de datos estadísticos de IEA [http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY\\_CODE=US](http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY_CODE=US)

## 5.2 TKM

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el modelo econométrico de demanda de transporte de carga nacional TKM (tonelada-kilómetro). La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.5).

Tabla 5.5 Parámetros modelo TKM

Variable	Coficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.311378	1.348767	5.420785	0.0006
LOG(PIB)	0.574849	0.075952	7.568559	0.0001

En la Figura 5.12 se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

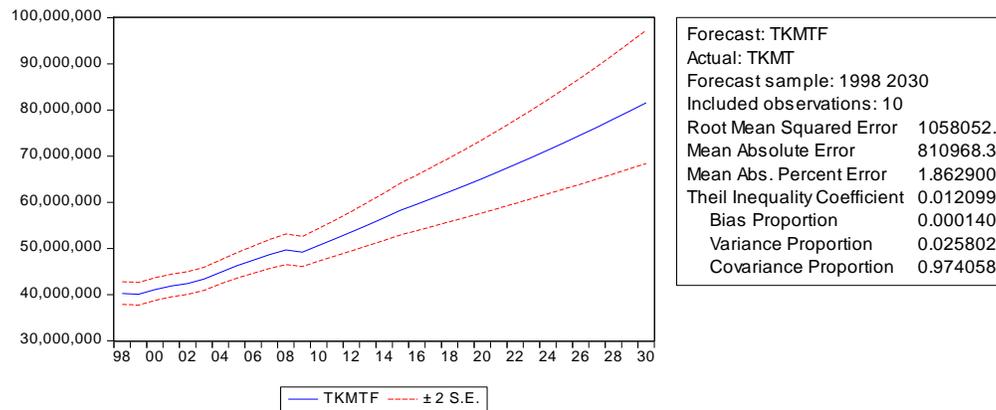


Figura 5.12: Modelo de proyección toneladas-kilómetro (TKM)

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

## Informe Final

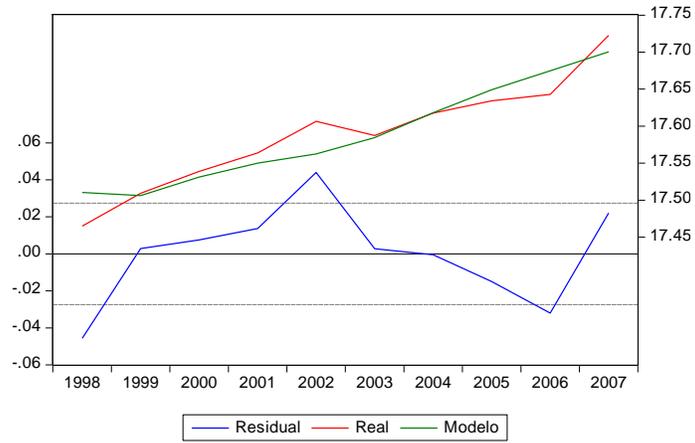


Figura 5.13: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de TKM

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0, 57 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB incrementó los TKM en 0,57%.

Finalmente, el detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

### 5.3 PKM

Los resultados que se presentan a continuación requirieron el desarrollo adicional de proyectar las variables PIB y población a nivel regional. Para el caso de la población se utilizan las proyecciones a nivel regional del INE hasta el año 2020. Posteriormente se conservan los porcentajes regionales del último año, aplicados a las proyecciones nacionales de población hasta el año 2050 del equipo de MAPS.

En el caso del PIB, se proyecta la participación regional utilizando criterio de medias móviles. Este corresponde a un promedio aritmético que suaviza la curva de participación de cada región considerando sólo una cantidad constante de los últimos periodos a incluir en la media. En este caso se consideró un ventana móvil de largo 5 años (Ecuación 5.1). El PIB regional fue extraído de la base de datos del Banco Central de Chile (Precios constantes, base 2003).

$$S_{r,t} = (S_{r,t-1} + S_{r,t-2} + \dots + S_{r,t-5})/5 \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

$S_{r,t}$  : participación PIB de la región r respecto PIB nacional en el año t

A continuación se presentan los resultados de demanda per cápita de transporte de pasajeros PKM obtenidos para las 13 regiones del país (división administrativa anterior al 2007). El detalle de los resultados por año se encuentra en el Anexo F.

#### 5.3.1 Región I de Tarapacá<sup>25</sup>

La Figura 5.14 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.6).

Tabla 5.6 Parámetros modelo PKM Región I

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.890731	1.670254	4.724272	0.0021
LOG(PIB1)	0.158287	0.202185	0.782883	0.4594
DUM1	0.153061	0.091693	1.669278	0.1390

<sup>25</sup> La Región I incluye la actual Región XV de Arica y Parinacota

## Informe Final

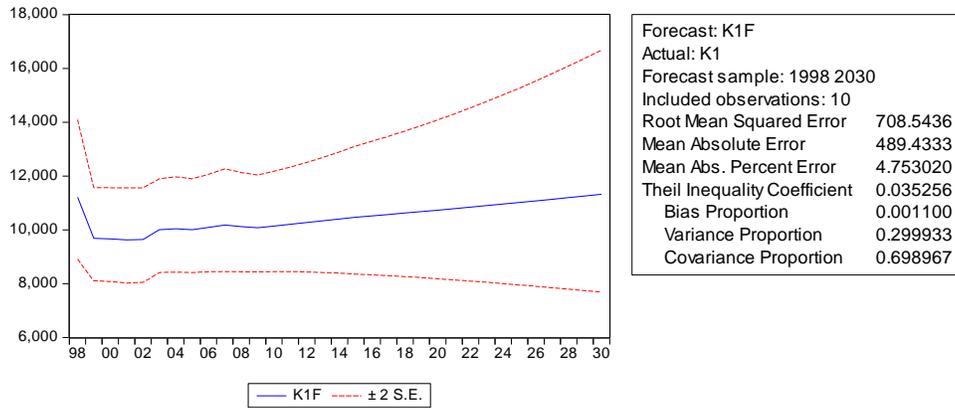


Figura 5.14: Modelo de proyección PKM Región I, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

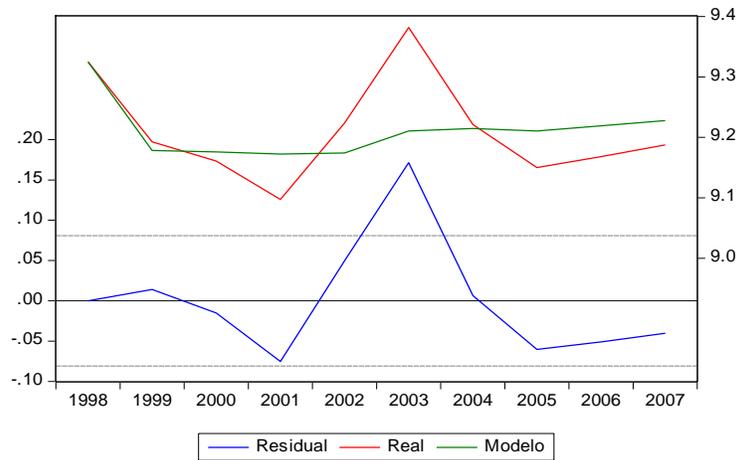


Figura 5.15: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región I.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,158 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,158%.

5.3.2 Región II de Antofagasta

La Figura 5.16 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.7).

Tabla 5.7 Parámetros modelo PKM Región II

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.083078	3.182255	0.340349	0.7452
LOG(PIB2(-1))	0.979349	0.360940	2.713328	0.0350
DUM2	-0.128400	0.057708	-2.225016	0.0677

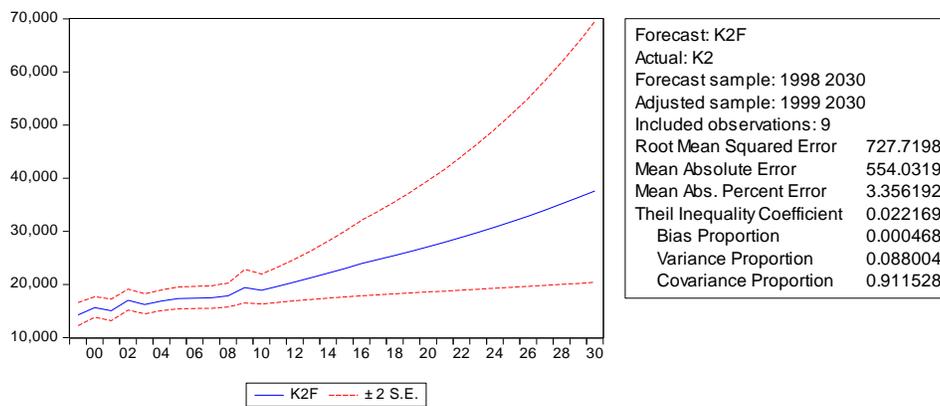


Figura 5.16: Modelo de proyección PKM de la 2ª región, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

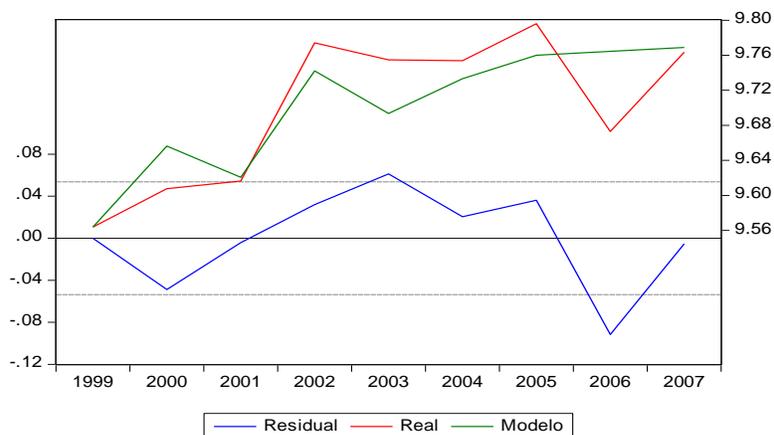


Figura 5.17: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región II.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,979 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,979%.

### 5.3.3 Región III de Atacama

La Figura 5.18 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Parámetros modelo PKM Región III

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	5.794059	2.055348	2.819015	0.0372
LOG(PIB3)	0.958895	0.300868	3.187097	0.0243
LOG(K3(-1))	-0.573610	0.264539	-2.168335	0.0823
DUM3	-0.320396	0.064464	-4.970135	0.0042

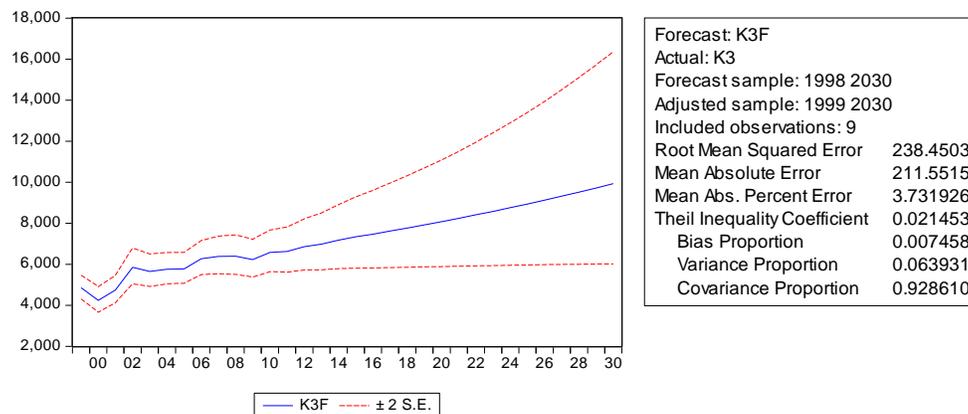


Figura 5.18: Modelo de proyección PKM de la Región III, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

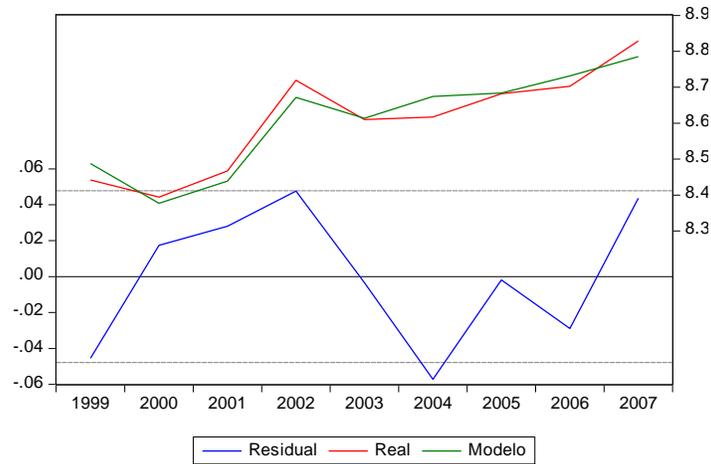


Figura 5.19: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región III.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo de 0,63 y una elasticidad de largo plazo de 0,609 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en. 0,609%.

### 5.3.4 Región IV de Coquimbo

La Figura 5.20 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.9).

Tabla 5.9 Parámetros modelo PKM Región IV

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.430515	1.850941	4.014453	0.0051
LOG(PIB4)	0.257512	0.246291	1.045560	0.3305
DUM4	-0.160809	0.053183	-3.023683	0.0193

En la figura se aprecia el modelo y su proyección hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección.

## Informe Final

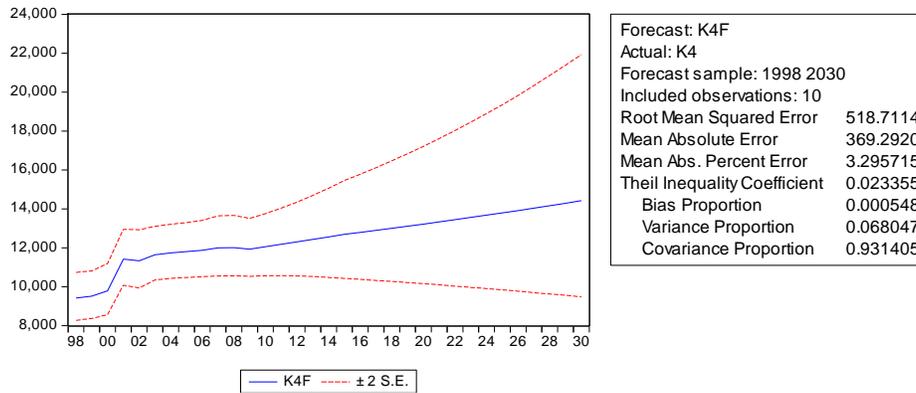


Figura 5.20: Modelo de proyección PKM de la Región IV, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

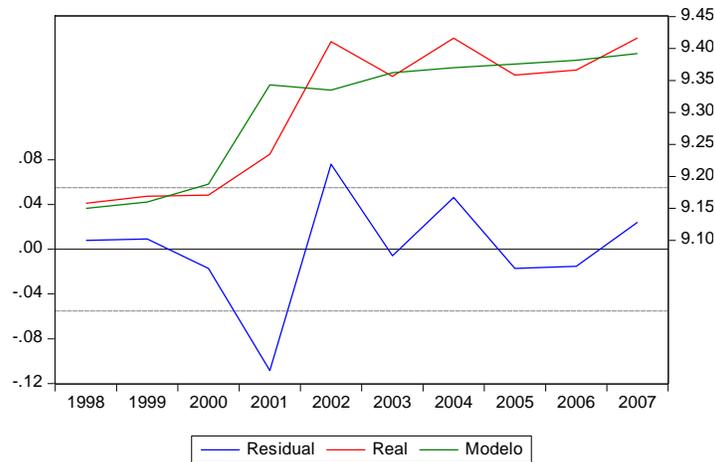


Figura 5.21: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región IV

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,257 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,257%.

### 5.3.5 Región V de Valparaíso

La Figura 5.22 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.10).

Tabla 5.10 Parámetros modelo PKM Región V

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.392872	2.880499	2.219363	0.0619
LOG(PIB5)	0.332239	0.365518	0.908952	0.3936
DUM5	-0.201891	0.061421	-3.287021	0.0134

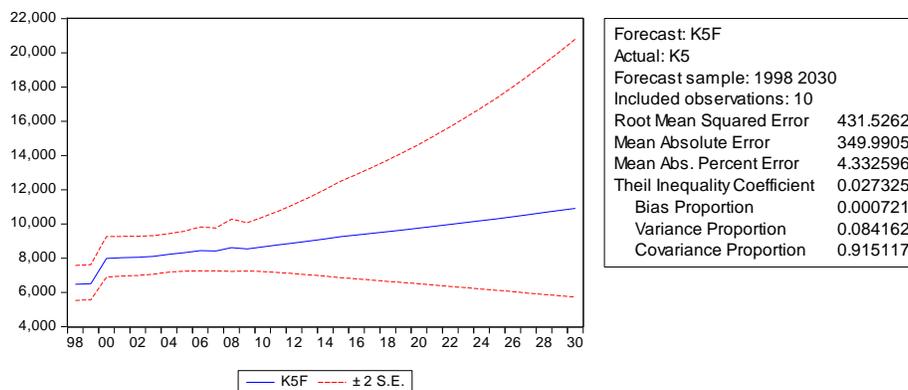


Figura 5.22: Modelo de proyección PKM de la Región V, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

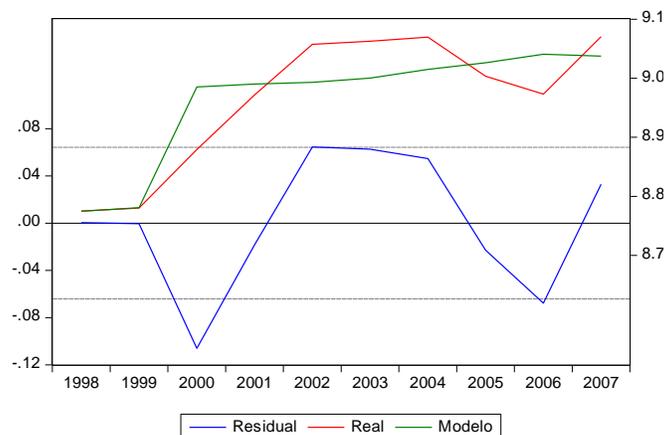


Figura 5.23: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región V.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,33 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,33%.

### 5.3.6 Región VI del Libertador General Bernardo O’Higgins

La Figura 5.24 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 Parámetros modelo PKM Región VI

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.808706	1.991043	-0.406172	0.6967
LOG(PIB6)	1.263550	0.254492	4.964979	0.0016
DUM6	-0.154244	0.040836	-3.777206	0.0069

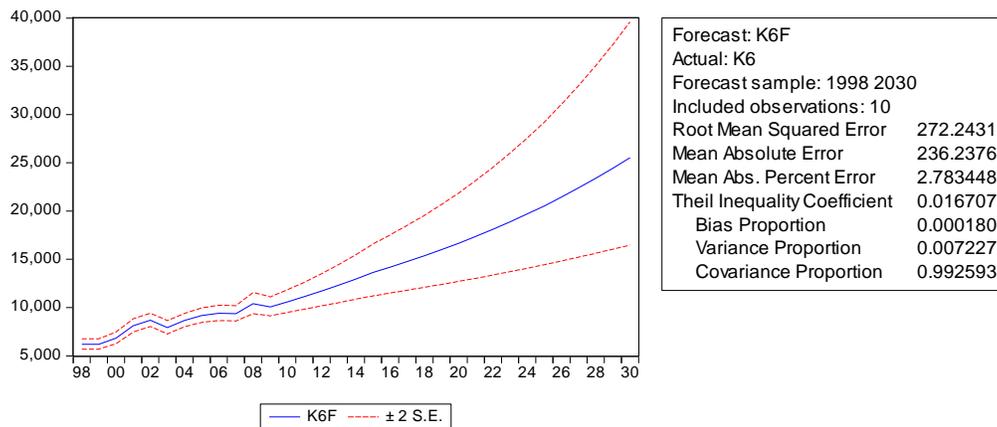


Figura 5.24: Modelo de proyección PKM de la Región VI, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

## Informe Final

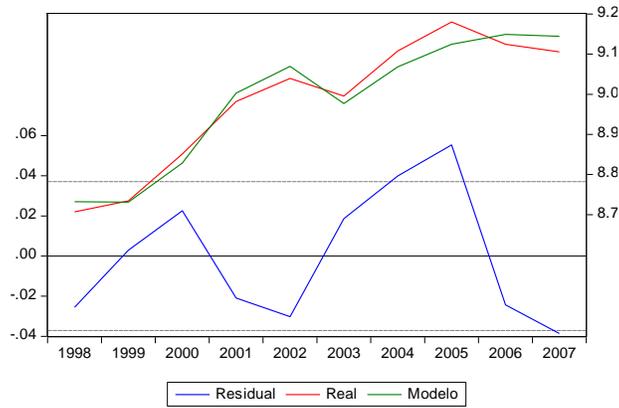


Figura 5.25: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región VI

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 1,26 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 1,26%.

### 5.3.7 Región VII del Maule

La Figura 5.26 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.12).

Tabla 5.12 Parámetros modelo PKM Región VII

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3.845279	2.069237	1.858307	0.1055
LOG(PIB7)	0.643471	0.271746	2.367913	0.0498
DUM7	-0.092100	0.063452	-1.451492	0.1899

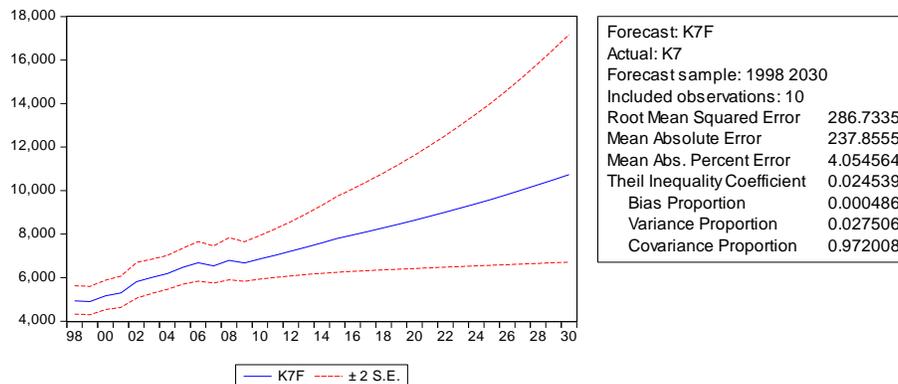


Figura 5.26: Modelo de proyección PKM de la Región VII, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

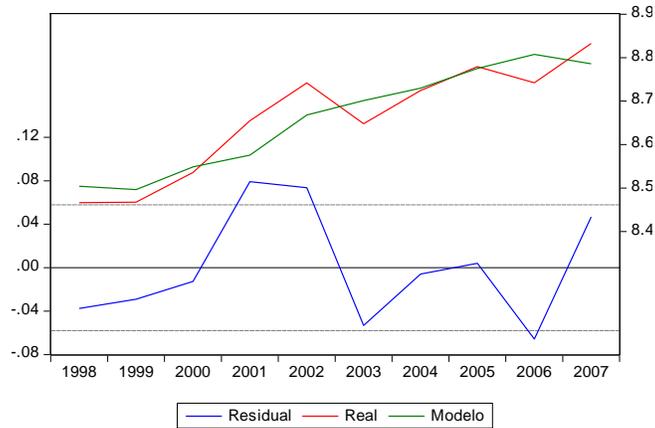


Figura 5.27: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región VII

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,64 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,64%.

### 5.3.8 Región VIII del Bío-Bío

La Figura 5.28 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.13).

Tabla 5.13 Parámetros modelo PKM Región VIII

Variable	Coficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	4.859058	0.818644	5.935496	0.0006
LOG(PIB8)	0.511112	0.104369	4.897155	0.0018
DUM8	-0.109952	0.031160	-3.528572	0.0096

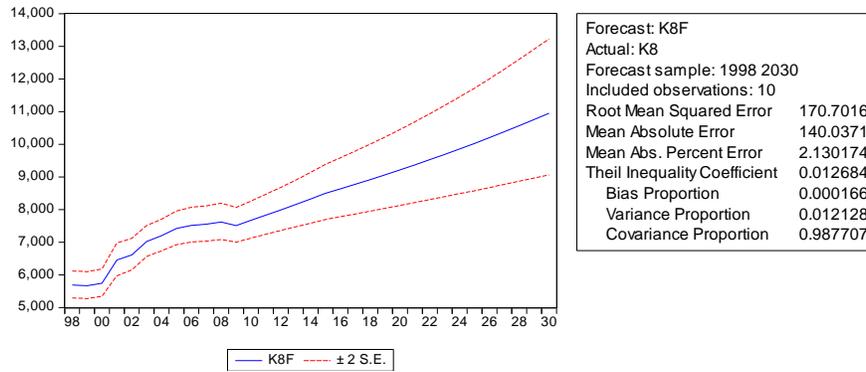


Figura 5.28: Modelo de proyección PKM de la Región VIII, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

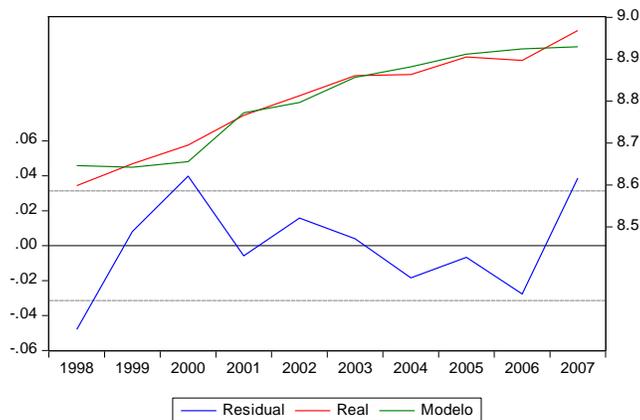


Figura 5.29: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región VIII

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,51 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,51%.

5.3.9 Región IX de la Araucanía

La Figura 5.30 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.14).

Tabla 5.14 Parámetros modelo PKM Región IX

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	5.904464	2.606815	2.265011	0.0579
LOG(PIB9)	0.345308	0.359262	0.961158	0.3685
DUM9	-0.297797	0.062092	-4.796082	0.0020

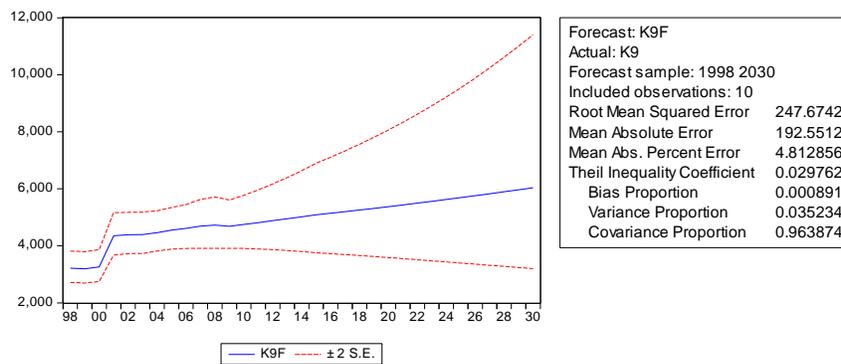


Figura 5.30: Modelo de proyección PKM de la Región IX, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

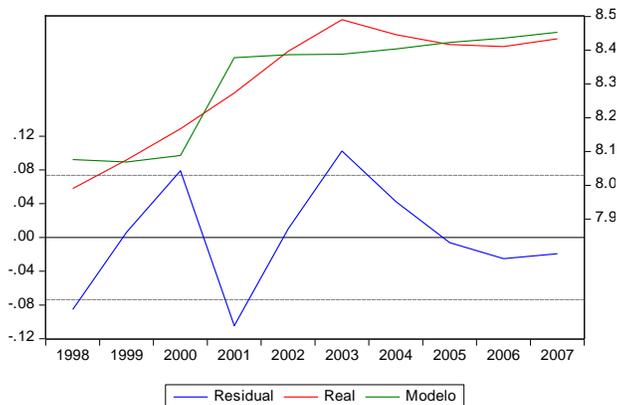


Figura 5.31: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región IX

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,345 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,345%.

### 5.3.10 Región X de Los Lagos<sup>26</sup>

La Figura 5.32 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.15).

Tabla 5.15 Parámetros modelo PKM Región X

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.716953	1.597029	-0.448929	0.6671
LOG(PIB10)	1.263518	0.208167	6.069721	0.0005
DUM10	-0.178582	0.045203	-3.950642	0.0055

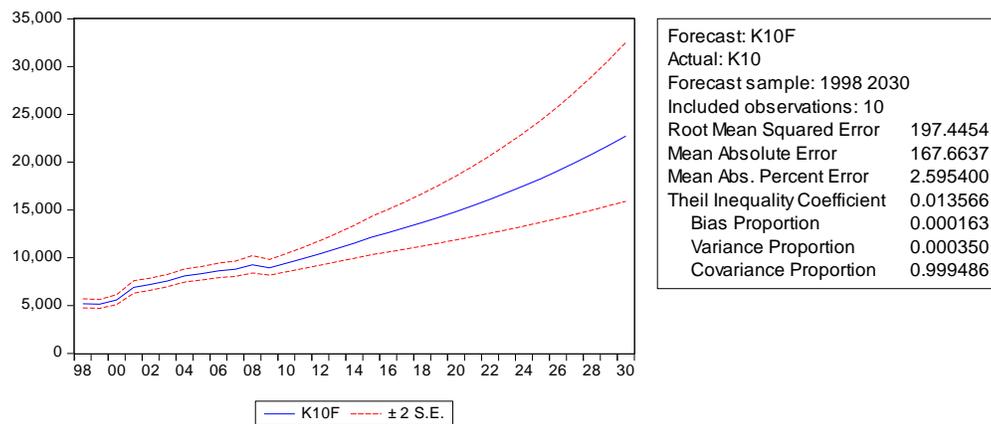


Figura 5.32: Modelo de proyección PKM de la Región X, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

<sup>26</sup> La Región X incluye la actual Región XIV de Los Ríos

## Informe Final

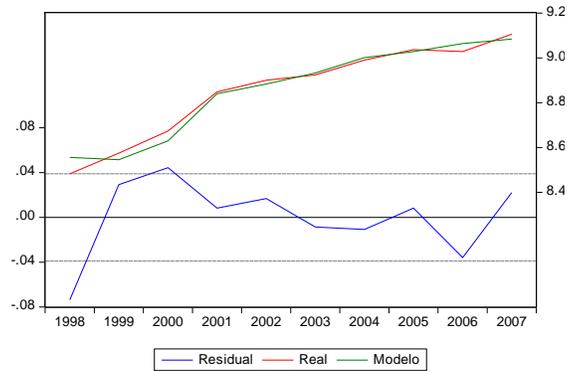


Figura 5.33: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región X

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 1,26 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 1,26%.

### 5.3.11 Región XI Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

La Figura 5.34 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.16).

Tabla 5.16 Parámetros modelo PKM Región XI

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.363739	1.984165	3.711254	0.0075
LOG(PIB11)	0.168037	0.244926	0.686075	0.5147
DUM11	-0.345221	0.096921	-3.561883	0.0092

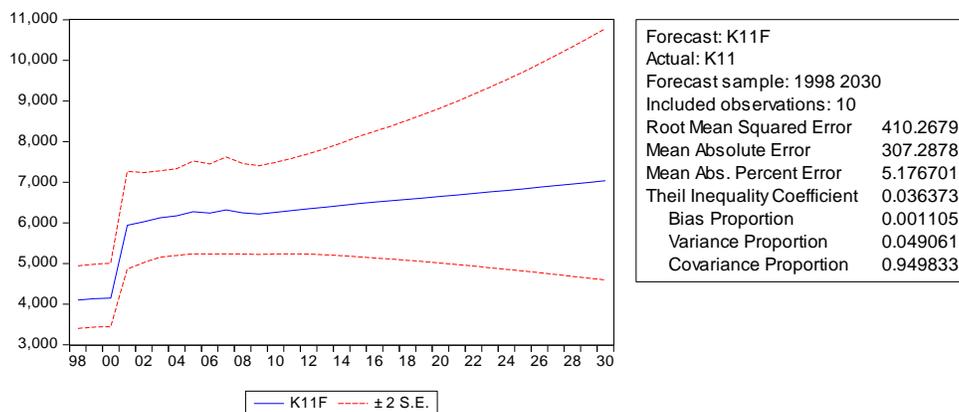


Figura 5.34: Modelo de proyección PKM de la Región XI, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

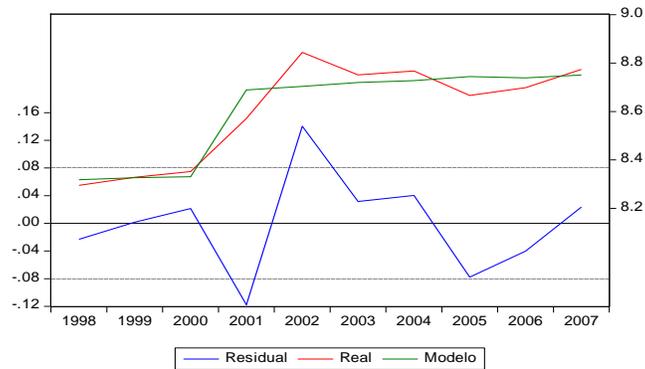


Figura 5.35: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región XI

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,16 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,16%.

### 5.3.12 Región XII de Magallanes y la Antártica Chilena

La Figura 5.36 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.17).

Tabla 5.17 Parámetros modelo PKM Región XII

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	3.285764	0.962381	3.414202	0.0142
LOG(PIB12(-1))	0.666254	0.113448	5.872790	0.0011
DUM12	-0.122254	0.052342	-2.335681	0.0582

## Informe Final

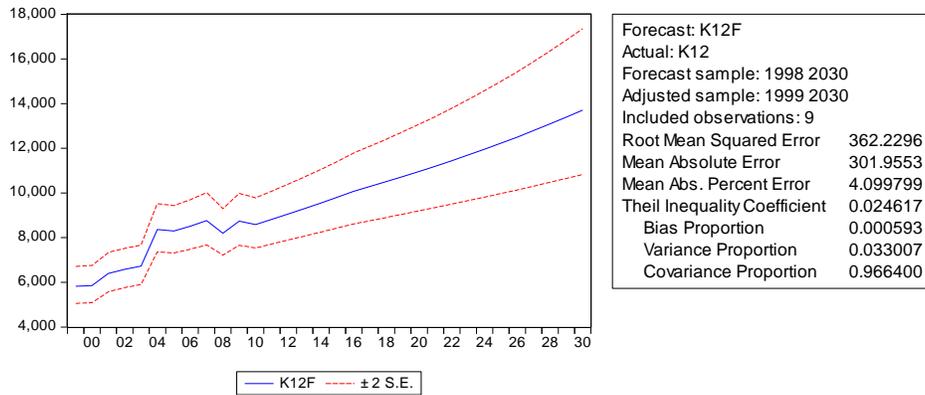


Figura 5.36: Modelo de proyección PKM de la Región XII, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

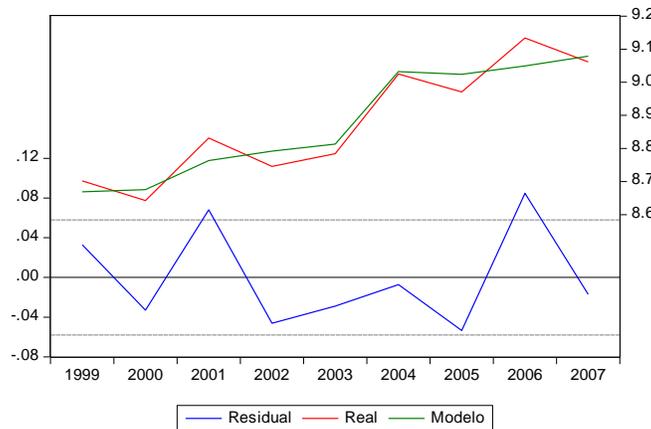


Figura 5.37: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la Región XII

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,66 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB incrementó los PIB per cápita regional en 0,66%.

### 5.3.13 Región XIII Metropolitana

La Figura 5.38 muestra el resultado econométrico y su proyección según el escenario de referencia hasta el año 2030, además se observa el intervalo de confianza de 95% para la proyección. La función resultante está definida por los siguientes parámetros (Tabla 5.18).

Tabla 5.18 Parámetros modelo PKM Región XII

Variable	Coefficiente	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7.330488	0.715693	10.24251	0.0000
LOG(PIBRM)	0.182586	0.087383	2.089501	0.0750
DUMRM	-0.142393	0.014664	-9.710526	0.0000

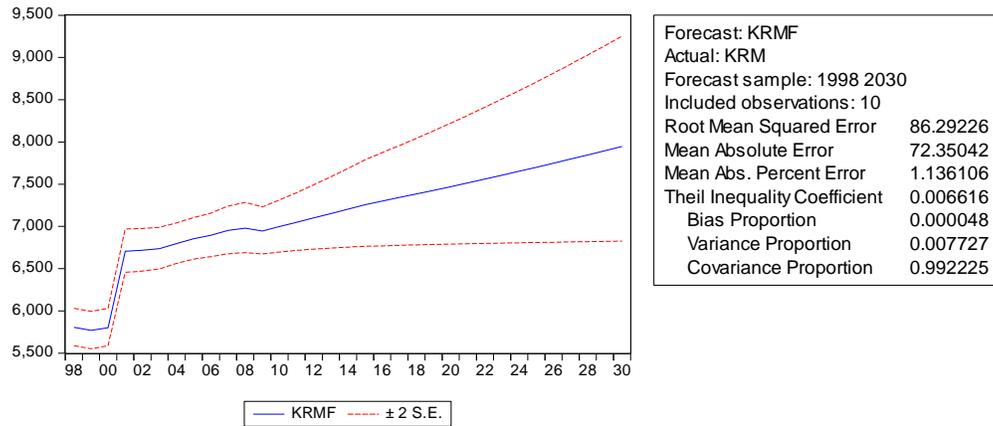


Figura 5.38: Modelo de proyección PKM de la región metropolitana, escenario de referencia.

A continuación se presenta la curva real y modelada de los datos históricos con el fin de presentar el ajuste del modelo.

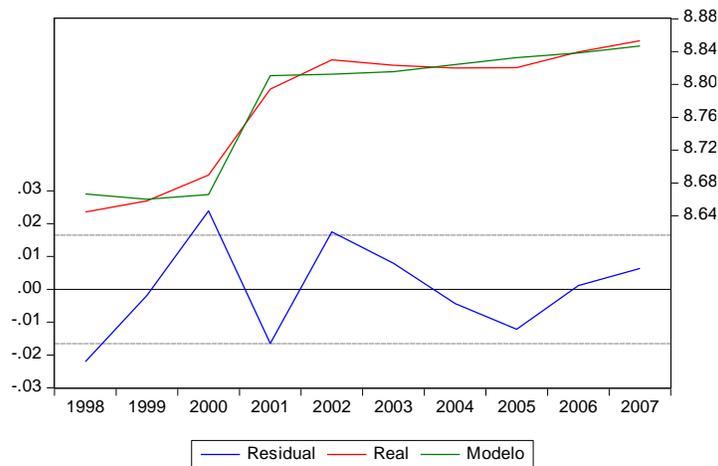


Figura 5.39: Ajuste de los datos del modelo a los valores reales de la región metropolitana.

Los resultados indican una elasticidad de corto plazo y largo plazo de 0,18 lo que significa que en promedio un 1% de aumento del PIB per cápita regional incrementó los PKM en 0,18%.

## 6 Resultados de Emisiones Sector Transporte

A continuación se presentan los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> que corresponden a la línea base o crecimiento sin restricción (CSR) para el sector transporte. El análisis general de este capítulo se focaliza en el escenario *PIB Medio Alto*, sin embargo, se presentan resultados agregados para cada modelo comparando los cinco escenarios de PIB considerados en el estudio.

La Figura 6.1 y Tabla 6.1 representan las emisiones de CO<sub>2e</sub> agregadas de todo el sector transporte y para todo el país, según los cinco escenarios de PIB.

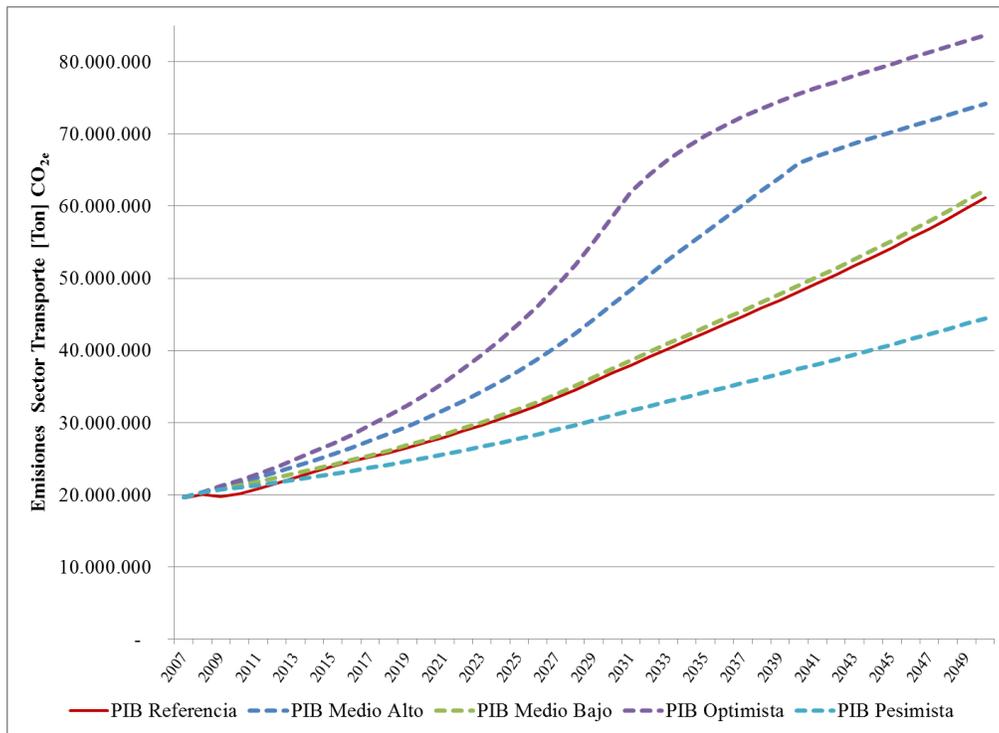


Figura 6.1 Emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB

A nivel nacional, se observa que para el sector transporte hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> se incrementará en 1,36 veces respecto al 2007 para el escenario *PIB Medio Alto* alcanzando el valor de 46,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 2,02 veces (59,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 58% (31 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte serán 2,78 veces (74,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 3,3 veces (84,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,3 veces (44,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

Tabla 6.1 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.529.758	27.269.431	36.853.807	61.170.614
PIB Medio Alto	19.620.083	30.591.062	46.400.147	74.205.053
PIB Medio Bajo	19.620.083	27.619.831	37.460.169	62.295.654
PIB Optimista	19.620.083	34.210.456	59.268.260	84.369.468
PIB Pesimista	19.620.083	25.142.225	31.042.442	44.479.784

A continuación, la Figura 6.2 señala las emisiones a nivel país de CO<sub>2e</sub> según el escenario *PIB de Medio Alto* para el período 2007-2050 y desagregadas según los modos principales de transporte.

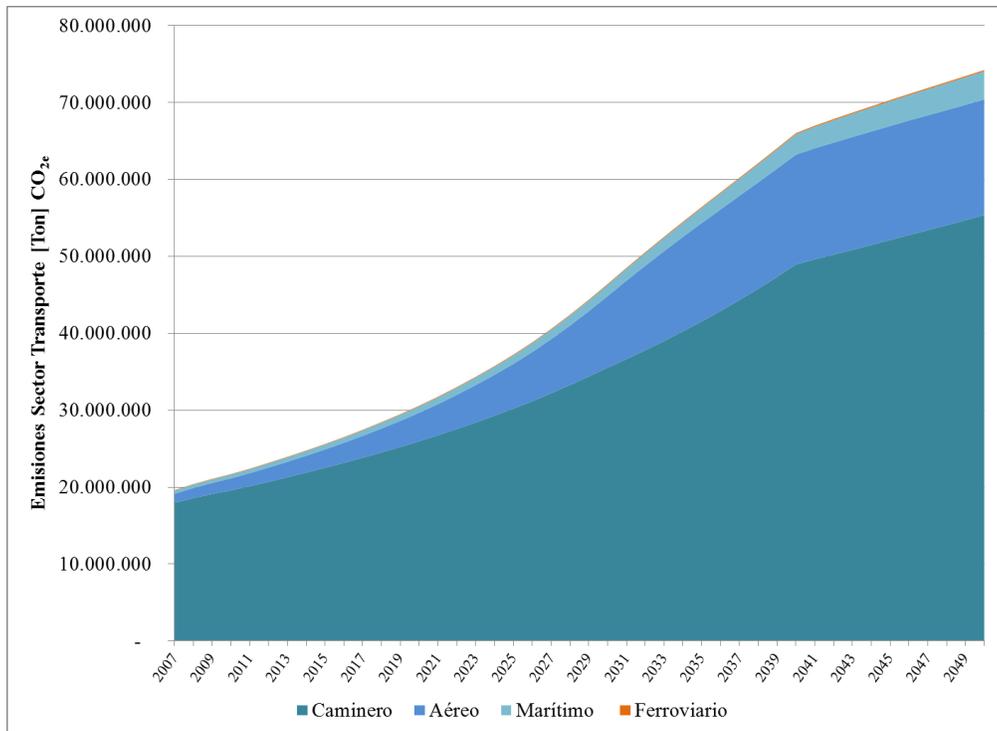


Figura 6.2 Emisiones de CO<sub>2e</sub> sector transporte desagregada por modo, *PIB Medio Alto*

La Tabla 6.2 resume los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los 5 escenarios de PIB considerados en el presente estudio y para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050.

Tabla 6.2 Resultados desagregados por modo para emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenarios de PIB

Escenario	Modo	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Aéreo	1.144.558	2.516.315	5.111.571	8.256.681
	Marítimo	427.423	723.017	1.118.005	2.952.923
	Ferrovionario	52.459	70.240	87.919	137.747
	Caminero	17.905.319	23.959.858	30.536.312	49.823.262
	<b>Total</b>	<b>19.529.758</b>	<b>27.269.431</b>	<b>36.853.807</b>	<b>61.170.614</b>
PIB Medio Alto	Aéreo	1.171.745	3.696.817	9.296.300	15.014.023
	Marítimo	428.747	843.336	1.474.412	3.684.105
	Ferrovionario	52.659	75.833	100.265	148.854
	Caminero	17.966.932	25.975.075	35.529.171	55.358.070
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>30.591.062</b>	<b>46.400.147</b>	<b>74.205.053</b>
PIB Medio Bajo	Aéreo	1.171.745	2.572.384	5.312.153	8.580.810
	Marítimo	428.747	742.578	1.146.114	3.027.094
	Ferrovionario	52.659	71.009	88.882	139.256
	Caminero	17.966.932	24.233.860	30.913.020	50.548.494
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>27.619.831</b>	<b>37.460.169</b>	<b>62.295.654</b>
PIB Optimista	Aéreo	1.171.745	5.294.528	16.182.511	26.136.757
	Marítimo	428.747	956.611	1.892.226	3.591.262
	Ferrovionario	52.659	80.935	112.977	147.146
	Caminero	17.966.932	27.878.381	41.080.546	54.494.303
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>34.210.456</b>	<b>59.268.260</b>	<b>84.369.468</b>
PIB Pesimista	Aéreo	1.171.745	1.783.701	3.019.137	4.875.650
	Marítimo	428.747	653.055	888.750	1.824.600
	Ferrovionario	52.659	66.449	78.699	110.391
	Caminero	17.966.932	22.639.020	27.055.855	37.669.143
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>25.142.225</b>	<b>31.042.442</b>	<b>44.479.784</b>

En general, hacia el año 2030 se observa que la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> tiene como mayor responsable al modo caminero, siendo un 77% para el escenario *PIB Medio Alto* (35,5 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>), un 69% para el escenario *PIB Optimista* (41,1 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y un 87% para el *PIB Pesimista* (27,1 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>). Hacia el 2050 el modo caminero reduce su participación debido al incremento en las emisiones del modo aéreo nacional. Luego, la participación del modo caminero hacia el 2050 en las emisiones de CO<sub>2e</sub> representan el 75% para el escenario *PIB Medio Alto* (55,4 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 65% para el *PIB Optimista* (54,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y un 85% para el *PIB Pesimista* (37,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>).

La Figura 6.3 indica la participación por modo de transporte en las emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2030 y 2050 para el escenario *PIB de Medio Alto*.

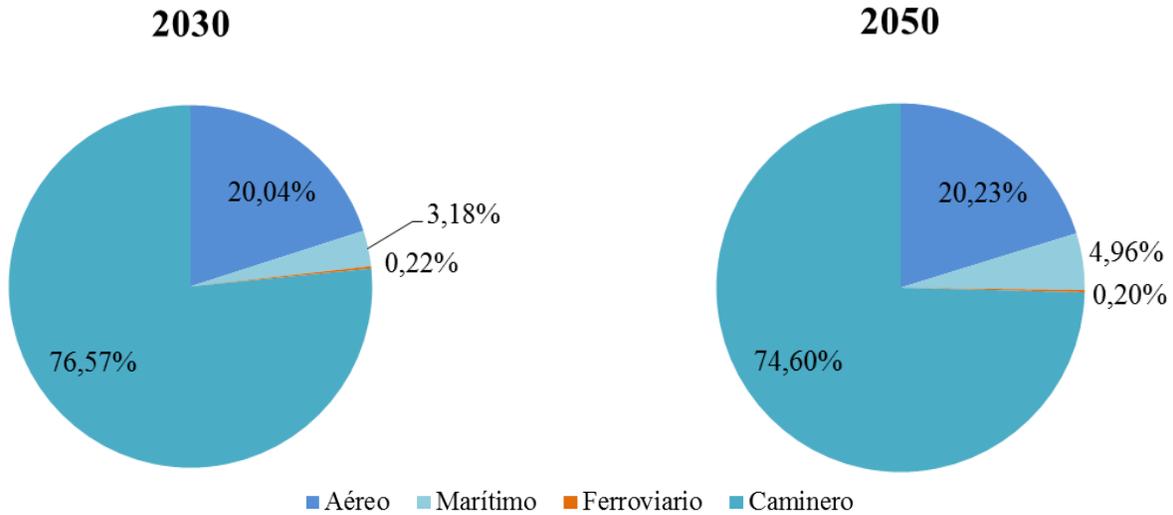


Figura 6.3 Participación por modo de transporte en las emisiones de CO<sub>2e</sub>, *PIB de Medio Alto* para los años 2030 y 2050

En las siguientes secciones del presente capítulo se analizan los resultados de CO<sub>2e</sub> según los distintos modelos desarrollados para el cálculo de emisiones. En la sección 6.1 se indican los resultados del modelo para los modos aéreo y marítimo. El modelo de transporte de carga y el modelo de transporte de pasajeros se indican en las secciones 6.2 y 6.3, respectivamente. Además, en la sección 6.4 se describen distintos análisis de sensibilidad hechos sobre los parámetros principales de los 3 modelos de emisiones desarrollados y en la sección 6.5 se realizan comparaciones tanto con inventarios anteriores como con resultados empleando información disponible para los años 2007-2012. Finalmente, en la sección 6.6 se analizan los resultados de la proyección del parque vehicular y su coherencia con el resultado de emisiones obtenidos.

El detalle de los resultados de emisiones de cada modelo desagregado por contaminante global se encuentra en el Anexo H.

## 6.1 Resultados Modo Aéreo y Marítimo

La Figura 6.4 y Figura 6.5 indican las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el escenario Línea Base 2007 o CSR según los distintos escenarios de PIB para los modos aéreo y marítimo nacional, respectivamente. En la Tabla 6.2 y Tabla 6.3 se resumen los valores de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 para los modos aéreo y marítimo, respectivamente.

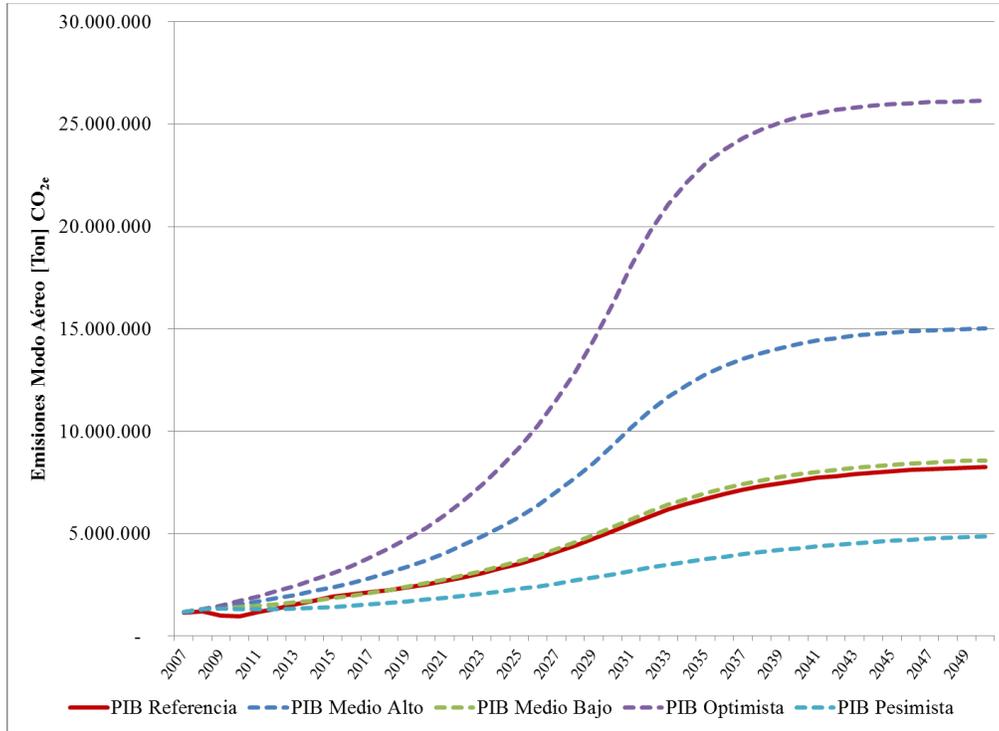


Figura 6.4 Trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo aéreo

Tabla 6.3 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo aéreo nacional

Escenario	Combustible	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Gasolina Aviación	17.275	37.978	77.148	124.617
	Kerosene Aviación	1.127.284	2.478.337	5.034.423	8.132.065
PIB Medio Alto	Gasolina Aviación	17.685	55.795	140.307	226.604
	Kerosene Aviación	1.154.060	3.641.022	9.155.993	14.787.419
PIB Medio Bajo	Gasolina Aviación	17.685	38.825	80.175	129.509
	Kerosene Aviación	1.154.060	2.533.560	5.231.978	8.451.301
PIB Optimista	Gasolina Aviación	17.685	79.909	244.240	394.477
	Kerosene Aviación	1.154.060	5.214.619	15.938.272	25.742.280
PIB Pesimista	Gasolina Aviación	17.685	26.921	45.567	73.587
	Kerosene Aviación	1.154.060	1.756.780	2.973.570	4.802.063

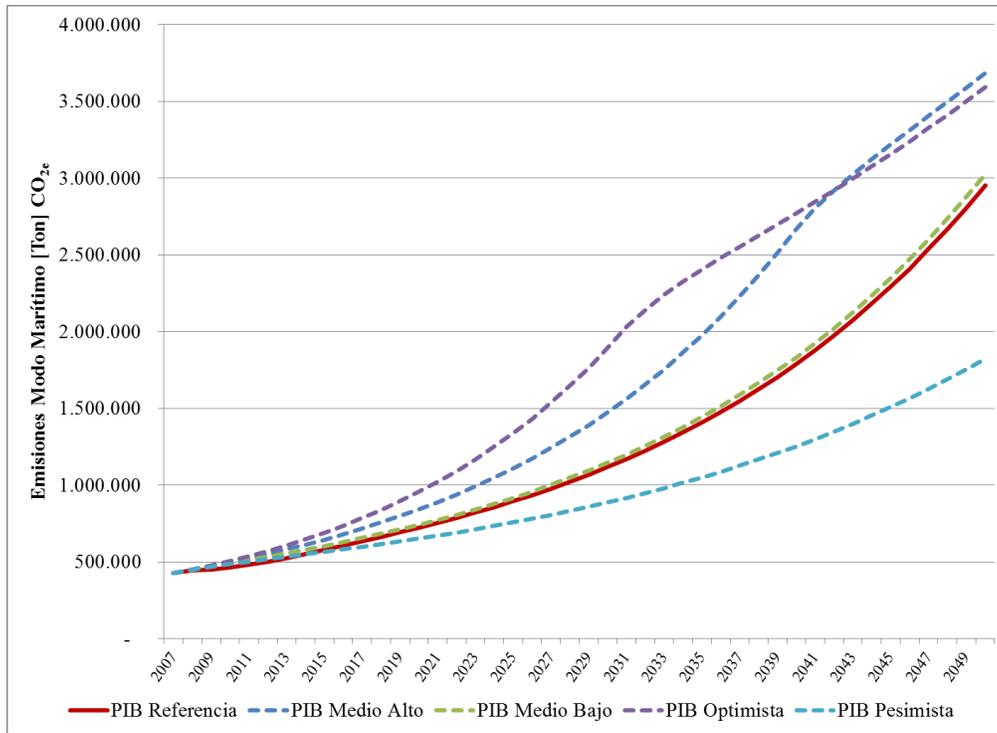


Figura 6.5 Trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo marítimo nacional

Tabla 6.4 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo marítimo

Escenario	Combustible	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	P. Diésel	145.891	246.786	381.606	1.007.914
	P. Combustible	281.531	476.231	736.399	1.945.009
PIB Medio Alto	P. Diésel	146.343	287.854	503.258	1.257.487
	P. Combustible	282.404	555.482	971.154	2.426.618
PIB Medio Bajo	P. Diésel	146.343	253.462	391.200	1.033.231
	P. Combustible	282.404	489.116	754.913	1.993.863
PIB Optimista	P. Diésel	146.343	326.518	645.869	1.225.797
	P. Combustible	282.404	630.093	1.246.357	2.365.465
PIB Pesimista	P. Diésel	146.343	222.906	303.355	622.786
	P. Combustible	282.404	430.149	585.395	1.201.813

Para el caso del modo aéreo, se observa que hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> se incrementará en 6,9 veces respecto al 2007 para el escenario *PIB Medio Alto* alcanzando el valor de 9,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 12,8 veces (16,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,6 veces (3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el modo aéreo serán 11,8 veces (15 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 21,3 veces (26,1 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 3,2 veces (4,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

En relación al modo marítimo se observa, en general, un crecimiento en las emisiones menos acentuado que en el modo aéreo. Hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> se incrementará en un 2,4 veces respecto al 2007 para el escenario *PIB Medio Alto* alcanzando el valor de 1,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 3,4 veces (1,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,1 veces (0,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el modo marítimo serán 7,6 veces (3,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 7,4 veces (3,6 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 3,3 veces (1,8 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

En referencia a las emisiones producidas por las operaciones internacionales o búnker de los modos aéreo y marítimo, la Tabla 6.5 resume los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los años 2007, 2020, 2030 y 2050<sup>27</sup>. Estas emisiones no se contabilizan en el inventario nacional de GEI según las directrices del IPCC.

Tabla 6.5 Resumen emisiones búnker modo aéreo y marítimo

Modo	Escenario de PIB	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
Bunker Aéreo	PIB Referencia	1.378.326	2.351.931	3.466.843	7.529.794
	PIB Medio Alto	1.359.786	2.570.355	4.164.007	9.404.062
	PIB Medio Bajo	1.359.786	2.397.072	3.532.690	7.672.809
	PIB Optimista	1.359.786	2.754.342	4.900.501	9.218.461
	PIB Pesimista	1.359.786	2.233.964	2.992.332	5.368.795
Bunker Marítimo	PIB Mundial	5.722.316	31.231.954	107.098.190	356.161.900

<sup>27</sup> Los resultados son para un escenario único de PIB mundial según lo descrito en el modelo de proyección

La Figura 6.6 a continuación señala la relación existente en las emisiones nacionales respecto a las búnker para los modos aéreo y marítimo en los distintos escenarios de PIB analizados en el estudio para los años 2020, 2030 y 2050. En general, se observa que las emisiones búnker de los modos marítimo y aéreo tienen una alta participación en las emisiones de CO<sub>2e</sub>, promediando para los 3 años mencionados y para todos los escenarios de PIB un 92,6% respecto a la suma global de emisiones (nacional y búnker). Para este mismo promedio, las emisiones aéreas nacionales corresponden al 6% y las marítimas nacionales a un 1,4%. De ahí la relevancia de descontarlas del inventario nacional de GEI pues de otra forma se estaría sobrestimando las emisiones en aproximadamente 72 veces el total de emisiones para el caso marítimo en el escenario *PIB Medio Alto* hacia el 2030.

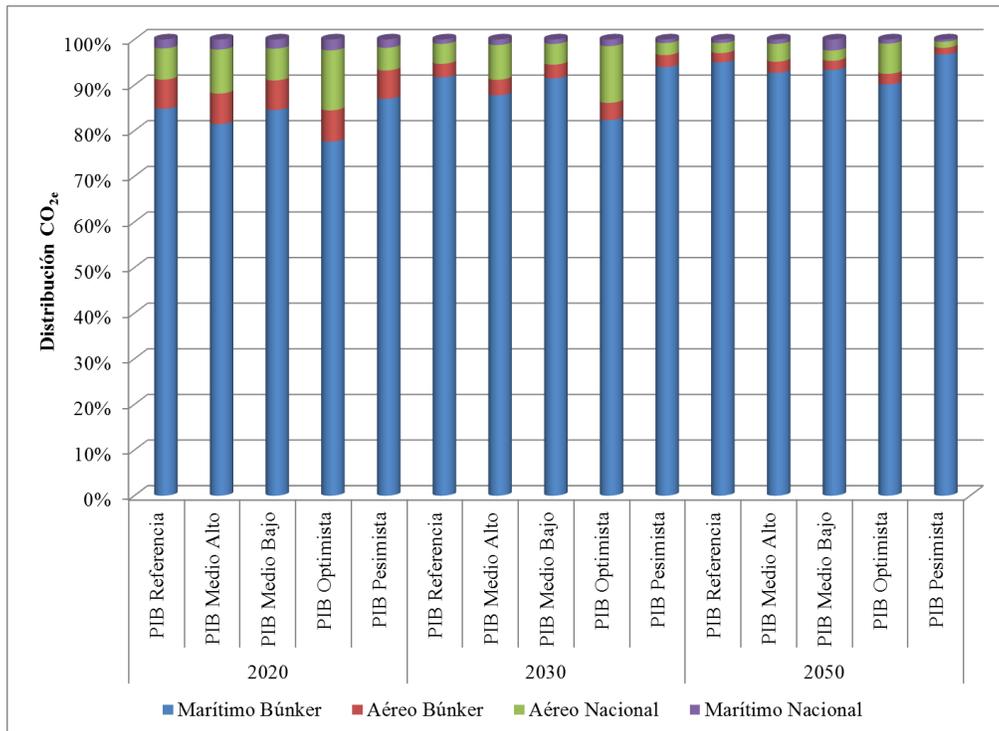


Figura 6.6 Resumen participación CO<sub>2e</sub> para los modos aéreo y marítimo según tipo de operación

### 6.1.1 Análisis diferenciado de emisiones modo marítimo y aéreo para periodo 2031-2050

En la proyección de emisiones, inicialmente se considera la proyección original de consumo energético, aéreo y marítimo, como la situación más desfavorable donde se mantiene la tendencia histórica y ninguna mejora tecnológica o uso de biocombustibles es incorporada.

Una vez evaluadas las emisiones en la condición más desfavorable, se realiza un análisis diferenciado para el periodo 2031-2050 incorporando eficiencia energética y uso de biocombustibles, según los antecedentes descritos en la sección 2.3 (ver Tabla 6.6).

Tabla 6.6 Parámetro para análisis de sensibilidad, modo aéreo y marítimo

Modo	Descripción	Valor
Aéreo	Mejora en EE entre 2031-2050	1,8% anual
	Uso de biocombustible para suplir el requerimiento energético (2031-2050)	0,1% del requerimiento energético anual
Marítimo	Mejora en EE entre 2031-2050	1% anual
	Uso de biocombustible para suplir el requerimiento energético (2031-2050)	0,1% del requerimiento energético anual

Se debe señalar que para el caso marítimo, las emisiones nacionales descuentan aquellas producidas por actividades pesqueras, pues estas no deben ser contabilizadas en el sector transporte por pertenecer al sector industrial. Luego, en el cálculo de emisiones a partir del consumo nacional marítimo, se debe descontar el consumo pesquero que se obtuvo del estudio “Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero” de la Comisión Nacional de Medioambiente (CONAMA), actual Ministerio de Medioambiente. Este valor corresponde a la participación informada en dicho estudio para el año 2006 y fue considerado como un parámetro que puede variar en la serie de tiempo dependiendo de la calidad de información disponible.

Los modelos empleados en el cálculo de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el modo aéreo y marítimo están basados en la proyección de demanda energética según el comportamiento histórico nacional. Luego, el análisis de sensibilidad presentado a continuación modifica la demanda energética según se define en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Descripción de análisis de sensibilidad modo aéreo y marítimo

ID	Modo	Descripción
EE	Aéreo y Marítimo	Mejora en el consumo energético de 1,8% anual desde el año 2031 hasta el 2050
BioCombustible	Aéreo y Marítimo	Incorporación de uso de biocombustible para el 0,1% del requerimiento energético anual, el cual se descuenta de las emisiones de CO <sub>2e</sub>
EE+BioCombustible	Aéreo y Marítimo	Mejora en el consumo energético del 1,8% anual y además, uso de biocombustible para el 0,1% del requerimiento energético con EE.

Según los antecedentes revisados en el capítulo 2, el uso del biocombustibles en el sector transporte al año 2030 a nivel mundial sería del orden del 4%. Sin embargo, se espera que su uso se concentre en países productores como China, India, Brasil, entre otros, por lo que se consideró un valor conservador de 0,1% para el caso local, pues Chile no es productor de biocombustibles y hacia el año 2007 no existía un uso relevante a éste ni una política que lo promoviera dentro del sector transporte.

En relación a la eficiencia energética, se utilizó el valor de mejora de 1,8% a nivel mundial según los antecedentes revisados en el capítulo 2. Si bien este valor está asociado al modo aéreo, se consideró la misma cifra para el modo marítimo para efectos de éste análisis de sensibilidad.

La Tabla 6.8 y la Tabla 6.9 representan el resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2040 y 2050 en los modos aéreo y marítimo, respectivamente. Los resultados fueron evaluados para el escenario *PIB de Referencia* y se comparan los resultados de emisiones del caso CSR y los 3 casos de sensibilidad descritos en la Tabla 6.7.

Tabla 6.8 Resumen sensibilidad emisiones, escenario *PIB Referencia*, modo aéreo

Modo	Escenario	CO <sub>2e</sub> [Ton/año]	
		2040	2050
Aéreo	CSR	10.551.368	21.780.263
	EE	8.652.122	13.939.368
	BioCombustible	10.445.854	21.344.658
	EE+BioCombustible	8.565.601	13.660.581

Tabla 6.9 Resumen sensibilidad emisiones, escenario *PIB Referencia*, modo marítimo

Modo	Escenario	CO <sub>2e</sub> [Ton/año]	
		2040	2050
Marítimo	CSR	1.789.571	2.952.923
	EE	1.467.448	1.889.871
	BioCombustible	1.771.675	2.893.865
	EE+BioCombustible	1.452.773	1.852.073

La eficiencia energética representa la alternativa que más reduce emisiones de CO<sub>2e</sub>, como era de esperar según los parámetros definidos al inicio de esta subsección. Se observa que en el 2050, en ambos modos los avances en eficiencia energética esperados a nivel mundial reducirían en un 36% las emisiones respecto a la situación de CSR, llegando a 13.939 miles de toneladas de CO<sub>2e</sub> y 1.890 miles de toneladas de CO<sub>2e</sub> para los modos aéreo y marítimo, respectivamente.

Respecto al uso de biocombustibles, según la tendencia conservadora considerada, en ambos modos se debiera alcanzar una reducción del 2% en el 2050 respecto a la situación de CSR, llegando a 21.345 miles de toneladas de CO<sub>2e</sub> y 2.894 miles de toneladas de CO<sub>2e</sub> para los modos aéreo y marítimo, respectivamente.

## 6.2 Resultados Transporte de Carga Terrestre

La Figura 6.7 y Figura 6.8 indican las emisiones de CO<sub>2e</sub> para la línea base o CSR según los distintos escenarios de PIB para los modos ferroviario y caminero-camión, respectivamente. En la Tabla 6.10 y Tabla 6.11 se resumen los valores de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 para los modos ferroviario y caminero-camión, respectivamente.

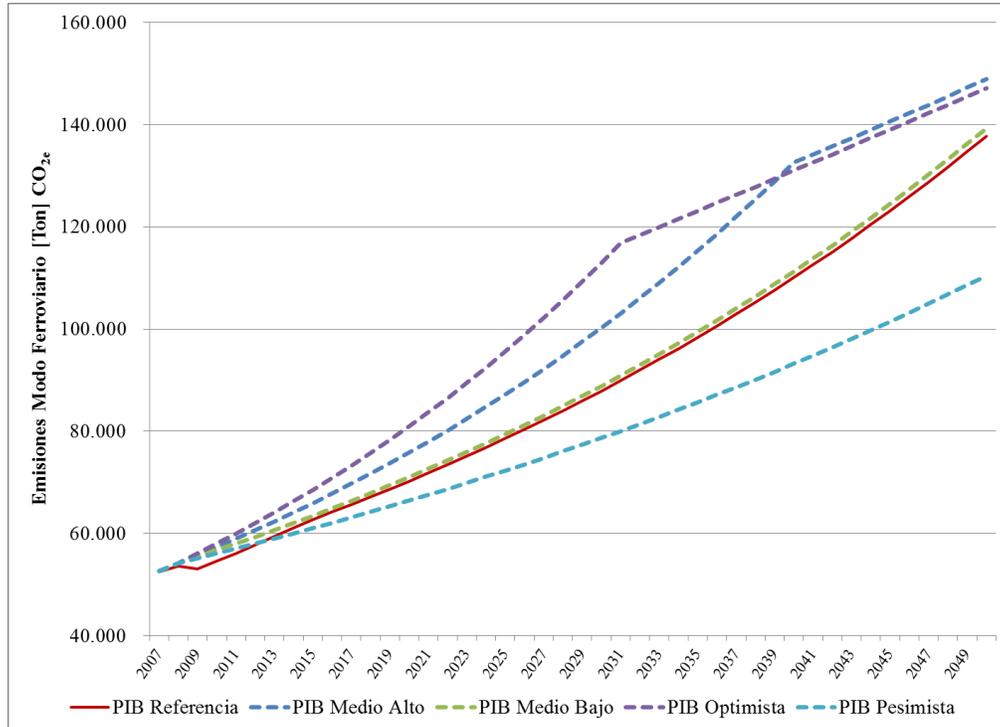


Figura 6.7 Trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo ferroviario

Tabla 6.10 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo ferroviario

Escenario	Combustible	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Diésel	52.459	70.240	87.919	137.747
PIB Medio Alto	Diésel	52.659	75.833	100.265	148.854
PIB Medio Bajo	Diésel	52.659	71.009	88.882	139.256
PIB Optimista	Diésel	52.659	80.935	112.977	147.146
PIB Pesimista	Diésel	52.659	66.449	78.699	110.391

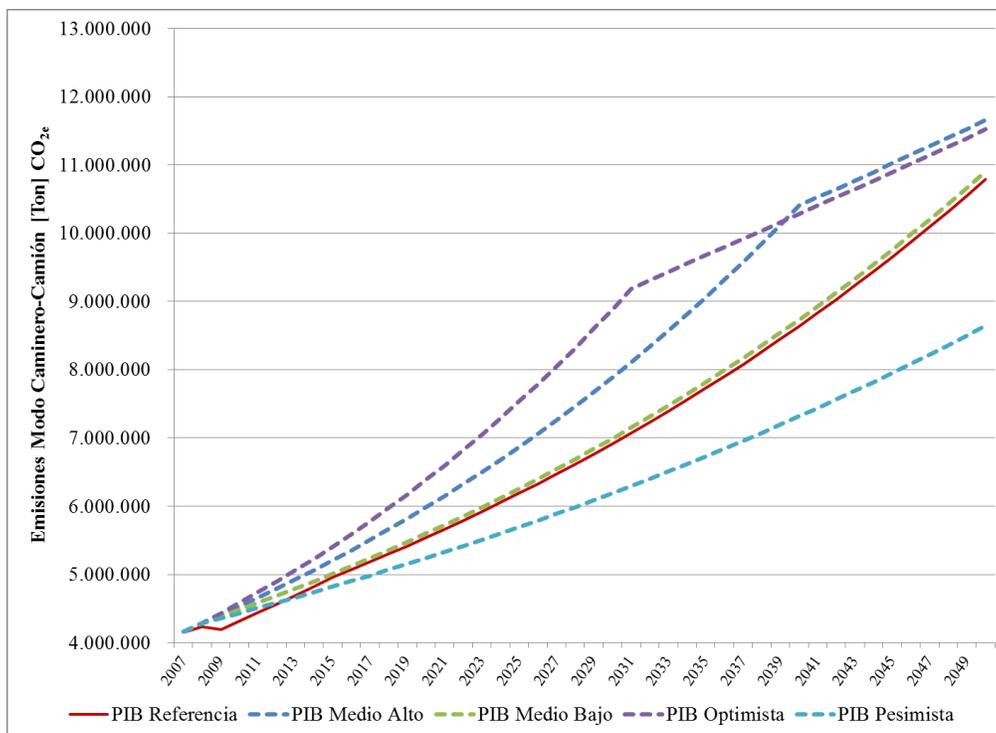


Figura 6.8 Trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo caminero-camión

Tabla 6.11 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, modo caminero-camión

Escenario	Combustible	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Diésel	4.150.480	5.539.995	6.917.788	10.786.559
PIB Medio Alto	Diésel	4.166.356	5.981.175	7.889.208	11.656.345
PIB Medio Bajo	Diésel	4.166.356	5.600.667	6.993.548	10.904.689
PIB Optimista	Diésel	4.166.356	6.383.557	8.889.414	11.522.593
PIB Pesimista	Diésel	4.166.356	5.241.036	6.192.359	8.644.385

Para el caso del modo ferroviario, se observa que hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el escenario *PIB Medio Alto* se incrementará en un 90% respecto al 2007, alcanzando el valor de 100,3 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 1,2 veces (113 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 49% (78,7 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el modo ferroviario serán 1,8 veces (148,9 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>), 1,8 veces (147,1 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,1 veces (110,4 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

Para la categoría camión, se observa que hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> se incrementará en un 89% respecto al 2007 para el escenario *PIB Medio Alto* alcanzando el valor de 7,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y

*PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 1,1 veces (8,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 49% (6,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para la categoría camión serán 1,8 veces (11,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 1,7 veces (11,5 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,1 veces (8,6 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

La Figura 6.9 indica la participación de las emisiones de CO<sub>2e</sub> producidas por transporte de carga terrestre al 2050 para el escenario *PIB Medio Alto*.

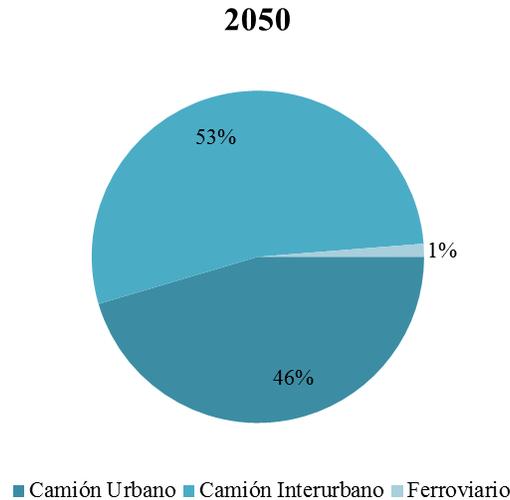


Figura 6.9 Distribución de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de carga terrestre según actividad urbana e interurbana, año 2050, PIB de *Medio Alto*

Se observa de la Figura 6.9 y la Tabla 6.13 que hacia el 2050 para el escenario *PIB Medio Alto* el 53% de las emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de carga terrestre se generan por actividad interurbana de camiones (6,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 46% la actividad urbana de camiones (5,4 miles de toneladas CO<sub>2e</sub>) y solo el 1% el modo ferroviario (0,15 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>).

Tabla 6.12 Resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de carga terrestre desagregado por tipo de actividad de camión, *PIB Medio Alto*

Modo/Actividad	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
Camión Urbano	1.917.528	2.752.782	3.630.936	5.364.727
Camión Interurbano	2.250.341	3.230.565	4.261.135	6.295.850
Ferroviano	52.659	75.833	100.265	148.854
<b>Total</b>	<b>4.220.528</b>	<b>6.059.180</b>	<b>7.992.337</b>	<b>11.809.431</b>

Un análisis similar al anterior se muestra en la Figura 6.10 y donde se ve la distribución de las emisiones de CO<sub>2e</sub> producidas por transporte de carga terrestre al 2050 para el escenario *PIB Medio Alto*, esta vez desagregando al modo caminero-camión en las categorías liviano, mediano y pesado.

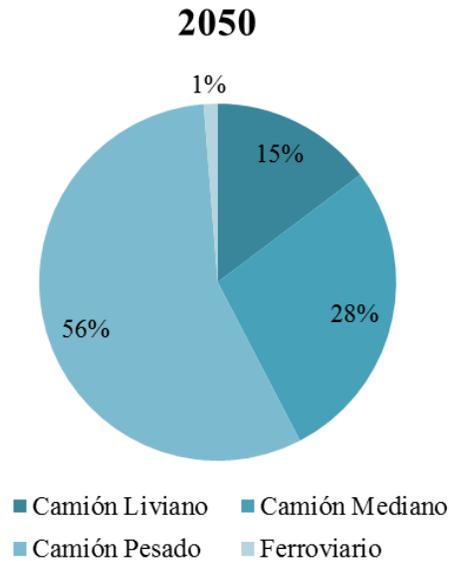


Figura 6.10 Distribución de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de carga terrestre según categoría de camión, año 2050, *PIB Medio Alto*

Se observa que el 15% de las emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de carga terrestre las generan los camiones livianos (1,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 28% por camiones medianos (3,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 56% por camiones pesados (6,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y solo el 1% el modo ferrovionario (0,15 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>)

Tabla 6.13 Resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de carga terrestre desagregado por categoría de camión, *PIB Medio Alto*

Modo/Actividad	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
Camión Liviano	621.675	892.470	1.177.173	1.739.280
Camión Mediano	1.166.555	1.674.693	2.208.931	3.263.707
Camión Pesado	2.379.639	3.416.184	4.505.968	6.657.590
Ferrovionario	52.659	75.833	100.265	148.854
<b>Total</b>	<b>4.220.528</b>	<b>6.059.180</b>	<b>7.992.337</b>	<b>11.809.431</b>

### 6.3 Resultados Transporte de Pasajeros Terrestre

La Figura 6.11 indica las emisiones de CO<sub>2e</sub> para la línea base o CSR según los distintos escenarios de PIB para todo el transporte de pasajeros terrestre, el cual considera las categorías vehículo particular, bus, taxi y tren subterráneo<sup>28</sup>. En la Tabla 6.14 se resumen los valores de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050.

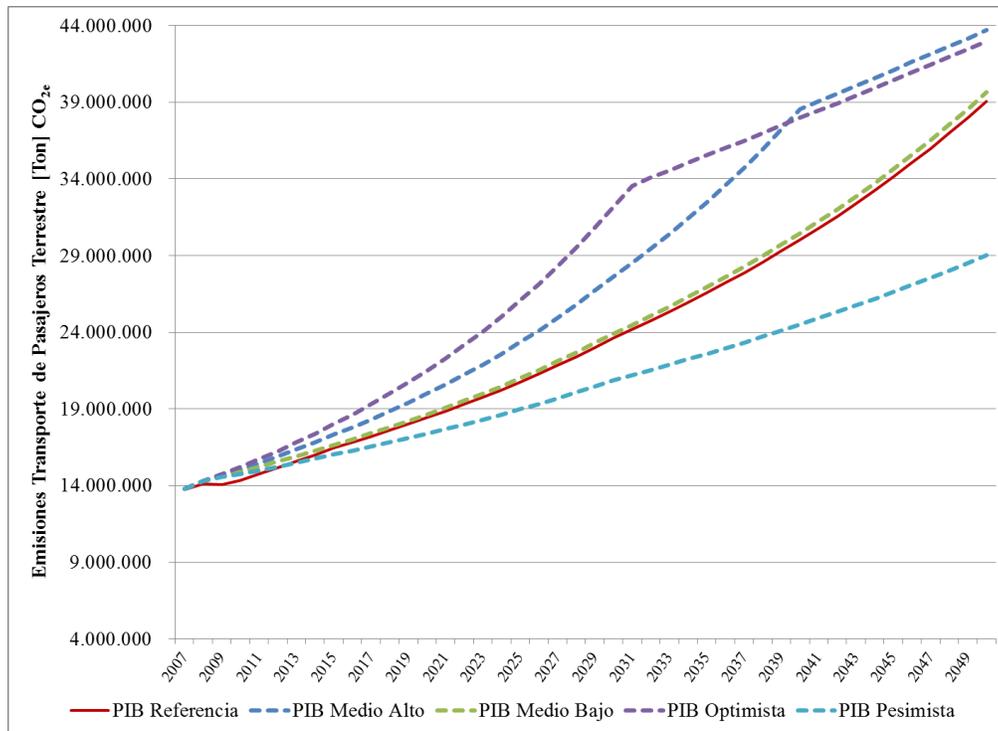


Figura 6.11 Trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, transporte de pasajeros terrestre

Tabla 6.14 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenario de PIB, transporte de pasajeros terrestre

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	13.754.839	18.419.863	23.618.524	39.036.703
PIB Medio Alto	13.800.576	19.993.900	27.639.963	43.701.725
PIB Medio Bajo	13.800.576	18.633.193	23.919.472	39.643.806
PIB Optimista	13.800.576	21.494.824	32.191.132	42.971.709
PIB Pesimista	13.800.576	17.397.985	20.863.497	29.024.759

<sup>28</sup> Esta categoría sólo aplica en aquellas regiones donde existe tren subterráneo

Para el transporte de pasajeros terrestre, se observa que hacia el año 2030 la trayectoria de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el escenario *PIB de Medio Alto* se incrementará en un 100% respecto al 2007, alcanzando el valor de 27,6 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>. En los escenarios *PIB Optimista* y *PIB Pesimista* hacia el 2030 el incremento será de 1,3 veces (32,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 51% (20,9 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), respectivamente, respecto al año 2007. Hacia el año 2050, las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el transporte de carga terrestre serán 2,2 veces (43,7 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 2,1 veces (43 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y 1,1 veces (29 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) respecto al año 2007, para los escenarios *PIB Medio Alto*, *PIB Optimista* y *PIB Pesimista*, respectivamente.

La Figura 6.12 indica la participación de las emisiones de CO<sub>2e</sub> producidas por transporte de carga de pasajeros al 2050 para el escenario *PIB Medio Alto*, desagregado por categoría: vehículo particular, taxi, bus y tren subterráneo.

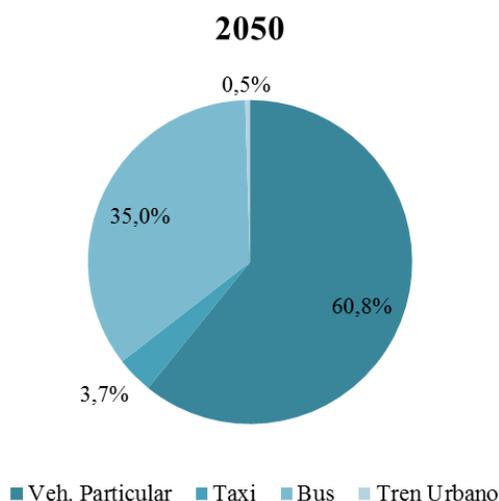


Figura 6.12 Distribución de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de pasajeros terrestre según categoría, año 2050, *PIB Medio Alto*

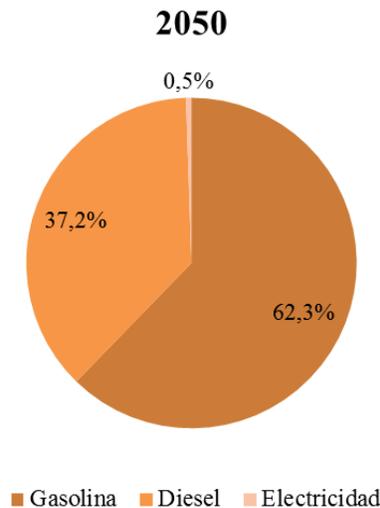
Se observa de la Figura 6.12 y la Tabla 6.15 que hacia el 2050 para el escenario *PIB Medio Alto* el 60,8% de las emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de pasajeros terrestre nacional se generan por los vehículos particulares (26,6 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 35% los buses (15,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 3,7% los taxis (1,6 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y solo el 0,5% el tren subterráneo<sup>29</sup> (0,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>).

<sup>29</sup> Las emisiones del tren subterráneo fueron evaluadas con el factor de emisión del SIC, según los casos existentes en la RM, RV y RVIII

Tabla 6.15 Resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de pasajeros terrestre desagregado por categoría, *PIB Medio Alto*

Categoría	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
Veh. Particular	8.398.134	12.170.381	16.708.987	26.580.393
Taxi	740.430	951.065	1.196.909	1.599.892
Bus	4.542.427	6.722.283	9.555.072	15.307.616
Tren Urbano	119.586	150.171	178.995	213.824
<b>Total</b>	<b>13.800.576</b>	<b>19.993.900</b>	<b>27.639.963</b>	<b>43.701.725</b>

Un análisis similar al anterior se muestra en la Figura 6.13 y la Tabla 6.16 donde se señala la participación en las emisiones de CO<sub>2e</sub> producidas por transporte de pasajeros terrestre al 2050 según las distintas fuentes de energía: gasolina, diésel y electricidad (caso *PIB Medio Alto*).

Figura 6.13 Distribución de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de pasajeros terrestre según fuente de energía, año 2050, *PIB Medio Alto*

Se observa que hacia el 2050 para el escenario *PIB Medio Alto*, el 62,3% de las emisiones de transporte de pasajeros nacional se generan a partir de la combustión de gasolina (27,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>), 37,2% por combustión diésel (16,3 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>) y solo el 0,5% por consumo eléctrico (0,2 millones de toneladas CO<sub>2e</sub>)

Tabla 6.16 Resumen de emisiones de CO<sub>2e</sub> para transporte de pasajeros terrestre desagregado por fuente de energía, PIB Medio Alto

Fuente de Energía	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
Gasolina	8.837.220	12.685.261	17.304.150	27.217.175
Diésel	4.843.771	7.157.530	10.151.218	16.252.078
Electricidad	119.586	151.110	184.596	232.472
<b>Total</b>	<b>13.800.576</b>	<b>19.993.900</b>	<b>27.639.963</b>	<b>43.701.725</b>

A continuación se presentan los resultados agregados de emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de pasajeros desagregados por región según el escenario *PIB Medio Alto*, para el período 2007-2050 (Figura 6.14 y Tabla 6.17).

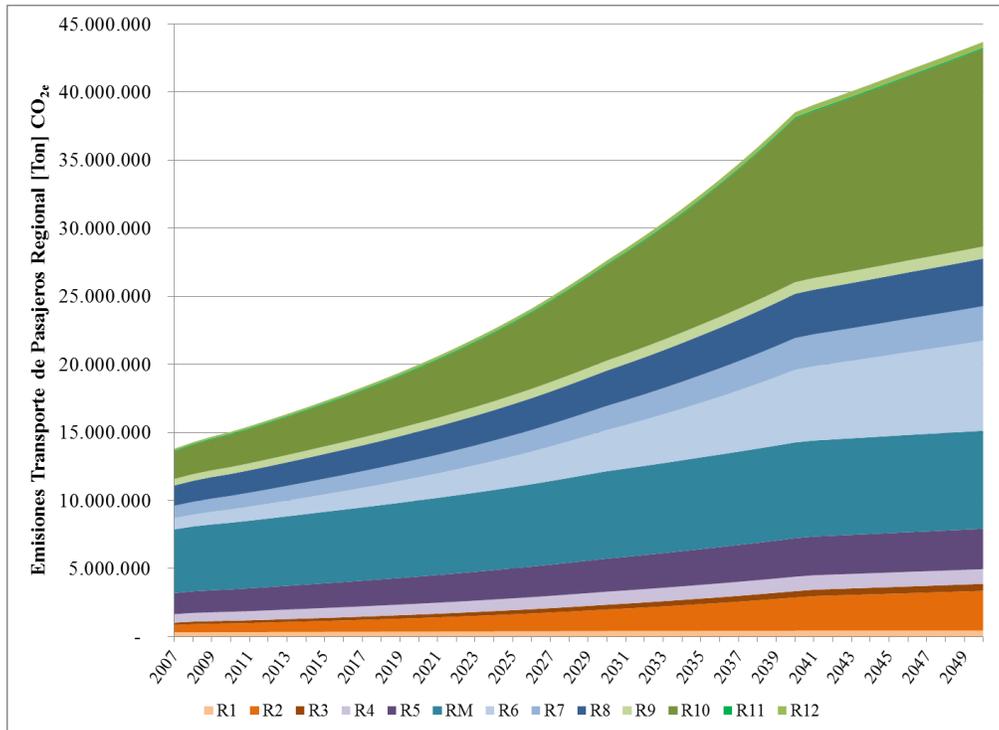


Figura 6.14 Emisiones CO<sub>2e</sub> para transporte de pasajeros terrestre desagregado por región, *PIB Medio Alto*

Tabla 6.17 Emisiones transporte de pasajeros terrestre desagregado por región, *PIB Medio Alto*

Región	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
RI	314.074	372.299	415.287	442.296
RII	543.652	994.970	1.580.170	2.924.020
RIII	172.391	260.883	351.122	512.239
RIV	623.452	794.890	957.068	1.081.145
RV	1.540.648	1.994.232	2.427.122	2.958.677
RM	4.683.823	5.599.735	6.424.898	7.206.156
RVI	834.799	1.697.253	3.026.245	6.619.436
RVII	903.622	1.334.680	1.773.796	2.540.694
RVIII	1.487.711	2.037.310	2.594.367	3.492.088
RIX	478.511	612.448	735.331	890.640
RX	2.027.001	4.022.522	7.001.765	14.514.809
RXI	67.577	80.003	89.040	95.740
RXII	123.314	192.675	263.752	423.785
Total	<b>13.800.576</b>	<b>19.993.900</b>	<b>27.639.963</b>	<b>43.701.725</b>

En general para el período 2007-2050, las regiones donde se concentran las emisiones de CO<sub>2e</sub> producidas por el transporte de pasajeros terrestre son la RM, RV, RVIII y RX<sup>30</sup>.

El promedio de participación para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 fue, en orden descendente para el caso *PIB Medio Alto*, 25,4% para la RM, 23,3% para la RX y 9% para la RVIII y RVIII. Es importante señalar que la RX fue considerada según la antigua regionalización debido a la información histórica disponible, por lo que al desagregarla, su participación debiese disminuir en términos relativos.

En este mismo análisis, las emisiones de CO<sub>2e</sub> hacia el 2030 aumentaron con respecto a la situación regional respectiva del 2007 en 2,5 veces en la RX, 0,74 veces en la RVIII, 0,58 veces en la RV y 0,37 veces en la RM. Hacia el 2050, la RX es la que tiene el mayor incremento regional con 6,2 veces las emisiones del 2007. Para el caso de la RVIII, RV y RM los incrementos al 2050 fueron de 1,35 veces, 0,92 veces y 0,54 veces, respectivamente.

La Tabla 6.18 a continuación indica los resultados desagregados por categoría de transporte de pasajeros para las cuatro regiones principales identificadas previamente. El detalle regional del resto del país se puede consultar en el Anexo H.

<sup>30</sup> La RX es considerada como la RX y la RXIV para este análisis.

Tabla 6.18 Emisiones desagregadas por categorías de transporte de pasajeros terrestre para las cuatro regiones con mayor participación, *PIB Referencial*

Región	Categoría	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
R5	Veh. Particular	1.010.842	1.366.186	1.710.671	2.194.726
	Taxi	90.952	107.236	121.532	127.750
	Bus	412.196	484.928	549.919	578.379
	Tren Subterráneo	26.657	35.883	44.999	57.823
	<b>Total</b>	1.540.648	1.994.232	2.427.122	2.958.677
RM	Veh. Particular	3.504.028	4.304.396	5.038.941	5.857.305
	Taxi	281.953	305.495	323.689	308.277
	Bus	804.914	875.556	928.272	884.573
	Tren Subterráneo	92.929	114.288	133.996	156.001
	<b>Total</b>	4.683.823	5.599.735	6.424.898	7.206.156
R8	Veh. Particular	848.923	1.225.743	1.621.879	2.341.290
	Taxi	56.121	71.139	85.197	100.766
	Bus	582.667	740.428	887.291	1.050.032
	<b>Total</b>	1.487.711	2.037.310	2.594.367	3.492.088
R10	Veh. Particular	609.638	1.314.755	2.427.208	5.624.082
	Taxi	56.594	107.019	180.694	350.992
	Bus	1.360.769	2.600.747	4.393.863	8.539.736
	<b>Total</b>	2.027.001	4.022.522	7.001.765	14.514.809

En términos generales, las emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de pasajeros terrestre se generan principalmente por el uso de vehículo particular y buses, los cuales son responsables de más del 90% de las emisiones regionales en cada caso. A excepción de la RX<sup>31</sup>, los vehículos particulares tienen mayor participación que los buses en las emisiones de CO<sub>2e</sub>, donde al año 2030 representan un 78% para la RM, un 70% para la RV y un 63% para la RVIII. Esta misma categoría al año 2050 representan un 81% para la RM, un 74% para la RV y un 67% para la RVIII.

En relación a la participación de las emisiones de CO<sub>2e</sub> de buses en la RM, RV y RVIII hacia el 2030, corresponden a 14%, 23% y 34%, respectivamente. Hacia el año 2050, esta misma categoría representa el 12% para la RM, 20% para la RV y 30% para la RVIII.

Para el caso de la RX, la participación al 2030 en las emisiones de CO<sub>2e</sub> es de 35% para vehículos particulares y 63% para buses. Hacia el 2050 esta participación es de 39% para vehículos particulares y 59% para buses

<sup>31</sup> La RX es considerada como la RX y la RXIV para este análisis.

## 6.4 Análisis de Sensibilidad

En la presente sección se realizan sensibilidades a distintos parámetros utilizados en los modelos desarrollados para el presente estudio respecto al escenario *PIB Medio Alto*, asumiendo cambios en los valores de éstos en el período 2007-2030.

El propósito de esta sección es ver cuánto afectan las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> del sector transporte por la variación de los valores específicos de parámetros empleado en el modelo e identificar así aquellos datos que requieran reducir su incertidumbre para cálculos futuros.

Los análisis siguen una estructura común basada en variaciones de 1% y 10% de los parámetros que se escogen en esta sección para cada modelo. Luego, se determinan los cambios en magnitud (rango) de las emisiones del sector transporte al tener un error entre 1% y 10% en los parámetros más relevantes de cada modelo.

Los casos a analizar se indican en las siguientes subsecciones con su respectiva descripción. Se incluyen casos aislados, es decir, modificando de a un parámetro a la vez, así como combinaciones de casos para ver el efecto agregado en las emisiones totales del sector.

### 6.4.1 Sensibilidad emisiones transporte de carga terrestre

En relación al análisis de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el transporte de carga terrestre, se realizan tres tipos de sensibilidades al modelo, según se indica en la Tabla 6.19:

Tabla 6.19 Descripción análisis de sensibilidad para modelo de carga terrestre

Sensibilidades	ID	Descripción
B. Partición modal carga	B.1	Cambio de 1% en la partición modal de carga. Determinar el efecto en las emisiones si el parámetro para desagregar el TKM total varía un 1%. Se analiza el caso en que TKM ferroviario es un 1% mayor que el caso base. Luego, los TKM de la categoría camión se reducen para el tipo de operación interurbano, según el modelo.
	B.2	Cambio de 10% en la partición modal de carga. Determinar el efecto en las emisiones si el parámetro para desagregar el TKM total varía un 10%. Se analiza el caso en que TKM ferroviario es un 10% mayor que el caso base. Luego, los TKM de la categoría camión se reducen para el tipo de operación interurbano, según el modelo.
C. Participación urbano-interurbano	C.1	Cambio de 1% en la partición por tipo de operación en la categoría camión. Determinar el efecto en las emisiones si el parámetro para desagregar el TKM total de la categoría camión varía un 1%. Se analiza el caso en que TKM urbano es un 1% mayor que el caso base. Luego, los TKM interurbano se reducen en este mismo factor y los TKM ferroviarios se mantienen igual al caso base.
	C.2	Cambio de 10% en la partición por tipo de operación en la categoría camión. Determinar el efecto en las emisiones si el parámetro para desagregar el TKM total de la categoría camión varía un 10%. Se analiza el caso en que TKM urbano es un 10% mayor que el caso base. Luego, los TKM interurbano se reducen en este mismo factor y los TKM ferroviarios se mantienen igual al caso base.

Sensibilidades	ID	Descripción
D. Factor de carga	D.1	Cambio de 1% en la tasa de carga ferroviaria. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro tasa de carga ferroviaria varía un 1% más que el caso base. La tasa de carga para la categoría camión se mantiene.
	D.2	Cambio de 10% en la tasa de carga ferroviaria. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro tasa de carga ferroviaria varía un 10% más que el caso base. La tasa de carga para la categoría camión se mantiene.
	D.3	Determinar el efecto en las emisiones si el parámetro tasa de carga para la categoría camión se cambia según los valores menos conservadores indicados en el Anexo B (tasas de cargas mayores a las del caso base).

A continuación se indican los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 para el caso *PIB Medio Alto* para ambos casos analizados (Tabla 6.20).

Tabla 6.20 Emisiones del sector transporte según análisis de sensibilidad para modelo de carga, *PIB Medio Alto*

ESCENARIO	CO <sub>2e</sub> [ton/año]		
	2007	2020	2030
CSR	19.620.083	30.591.062	46.400.147
B.1	19.584.653	30.540.228	46.333.128
B.2	19.265.781	30.082.725	45.729.948
C.1	19.627.289	30.601.406	46.413.792
C.2	19.692.139	30.694.505	46.536.589
D.1	19.619.562	30.590.311	46.399.155
D.2	19.615.296	30.584.168	46.391.032
D.3	18.201.308	28.554.283	43.713.624

En relación a los parámetros que fueron modificados en un 1% y 10% según lo descrito en la Tabla 6.19, se observa que aquel que más efecto tiene en las emisiones totales del sector transporte es el caso de cambio modal entre ferroviario y camiones (B.1/B.2). Luego, un error de un 1% y 10% en la asignación de TKM entre el modo ferroviario y camiones implica una diferencia de 0,14% y 1,44% en las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> del sector transporte hacia el 2030, respectivamente. El parámetro menos sensible en este mismo análisis fue la tasa de carga ferroviaria (D.1/D.2), que incluso variando un 10% su valor, el efecto en las emisiones totales del sector sigue siendo irrelevante (0,02% al 2030).

Para el caso D.3, en donde la variación de tasa de carga para camiones se basa en números menos conservadores que los empleados en el modelo (definidos en el Anexo B), se observa un mayor efecto en las emisiones totales del sector transporte, reduciéndose hacia el año 2030 en un 5,8% respecto al caso base o CSR.

### 6.4.2 Sensibilidad emisiones transporte de pasajeros terrestre

Con respecto al análisis de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el transporte de pasajeros terrestre, se definió, a modo de referencia, sensibilidades solamente en las cuatro regiones identificadas previamente (sección 6.3) como las con mayor participación en las emisiones de CO<sub>2e</sub> en el país para este subsector: RV, RM, RVIII y RX. Se analizan dos tipos de casos que se indican en la Tabla 6.21.

Tabla 6.21 Descripción análisis de sensibilidad para modelo de pasajeros terrestre

Sensibilidades	ID	Descripción
A. Partición modal pasajeros	A.1	Cambio de 1% en la partición modal de la RV, RM, RVIII y RX, entre las categorías vehículo particular y bus. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro para desagregar el PKM total de cada región varía un 1% entre las categorías vehículo particular y bus. Se analiza el caso en que PKM de bus es un 1% mayor que el caso base. Luego, los PKM de la categoría vehículo particular se reducen en este mismo factor
	A.2	Cambio de 10% en la partición modal de la RV, RM, RVIII y RX, entre las categorías vehículo particular y bus. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro para desagregar el PKM total de cada región varía un 10% entre las categorías vehículo particular y bus. Se analiza el caso en que PKM de bus es un 10% mayor que el caso base. Luego, los PKM de la categoría vehículo particular se reducen en este mismo factor
	A.3	Escenario en que la partición modal de pasajeros varía <b>para todas las regiones</b> . Determinar el efecto en emisiones si el parámetro la partición modal varía hacia según la tendencia histórica observada entre los años 1998-2006 (ver Anexo K)
E. Tasa de ocupación	E.1	Cambio de 1% en la tasa de ocupación vehículo particular de la RV, RM, RVIII y RX. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro tasa de ocupación vehículo particular varía un 1% más que el caso base. La tasa de ocupación para las otras categorías se mantiene
	E.2	Cambio 10% en la tasa de ocupación vehículo particular de la RV, RM, RVIII y RX. Determinar el efecto en emisiones si el parámetro tasa de ocupación vehículo particular varía un 10% más que el caso base. La tasa de ocupación para las otras categorías se mantiene

A continuación se indican los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 para el caso *PIB Medio Alto* para ambos casos analizados (Tabla 6.22).

Tabla 6.22 Emisiones del sector transporte según análisis de sensibilidad para modelo de pasajeros, *PIB Medio Alto*

ESCENARIO	CO <sub>2e</sub> [ton/año]		
	2007	2020	2030
CSR	19.620.083	30.591.062	46.400.147
A.1	19.620.083	30.514.232	46.222.963
A.2	19.620.083	29.822.768	44.628.299
A.3	19.917.421	33.880.189	53.241.937
E.1	19.560.940	30.509.764	46.293.230
E.2	19.077.044	29.844.600	45.418.448

En relación a los parámetros que fueron modificados en un 1% y 10% según lo descrito en la Tabla 6.21, se observa que aquel que más efecto tiene en las emisiones totales del sector transporte es el caso de cambio modal entre buses y vehículo particular (A.1/A.2). Luego, un error de un 1% y 10% en la asignación de PKM entre la categoría bus y vehículo particular implica una diferencia de 0,38% y 3,82% en las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> del sector transporte hacia el 2030, respectivamente. El parámetro menos sensible en este mismo análisis fue la tasa de ocupación para vehículo particular (E.1/E.2), variando un 10% su valor, el efecto en las emisiones totales del sector 2% al 2030. Hay que recordar que estos análisis se hicieron modificando solo en las regiones RV, RM, RVIII y RX.

Para el caso A.3, en donde la variación de la partición modal de todas las regiones en base a la tendencia histórica (Anexo K), se ve que hay un efecto de aumento en las emisiones esperable. Esta nueva partición modal, que incrementa la partición de vehículos particulares en desmedro del uso del transporte público, es más desfavorable en emisiones que el caso base utilizado en el modelo, lo que implica un incremento en las emisiones totales del sector transporte de 14,7% al año 2030 respecto a la situación de CSR. La tabla a continuación resume los resultados obtenidos para el sector transporte en los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050, considerando la partición modal del escenario A.3. Además, la figura a continuación señala las trayectorias de emisiones del sector para los distintos PIB considerando el caso A.3.

Tabla 6.23 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB, Escenario A.3

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.826.562	30.369.327	42.933.217	77.413.936
PIB Medio Alto	19.917.421	33.880.189	53.241.937	91.893.957
PIB Medio Bajo	19.917.421	30.745.737	43.598.079	78.728.017
PIB Optimista	19.917.421	37.674.398	66.931.237	101.835.581
PIB Pesimista	19.917.421	28.115.514	36.573.471	57.493.603

Los resultados de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte bajo esta condición indican que en el escenario *PIB de Referencia* las emisiones totales del sector alcanzarían al año 2030 y 2050 un total de 42,9 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> y 77,4 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, respectivamente. Las cifras anteriores equivalen a un aumento de 1,2 y 2,9 veces respecto a las emisiones de CO<sub>2e</sub> en el año 2007.

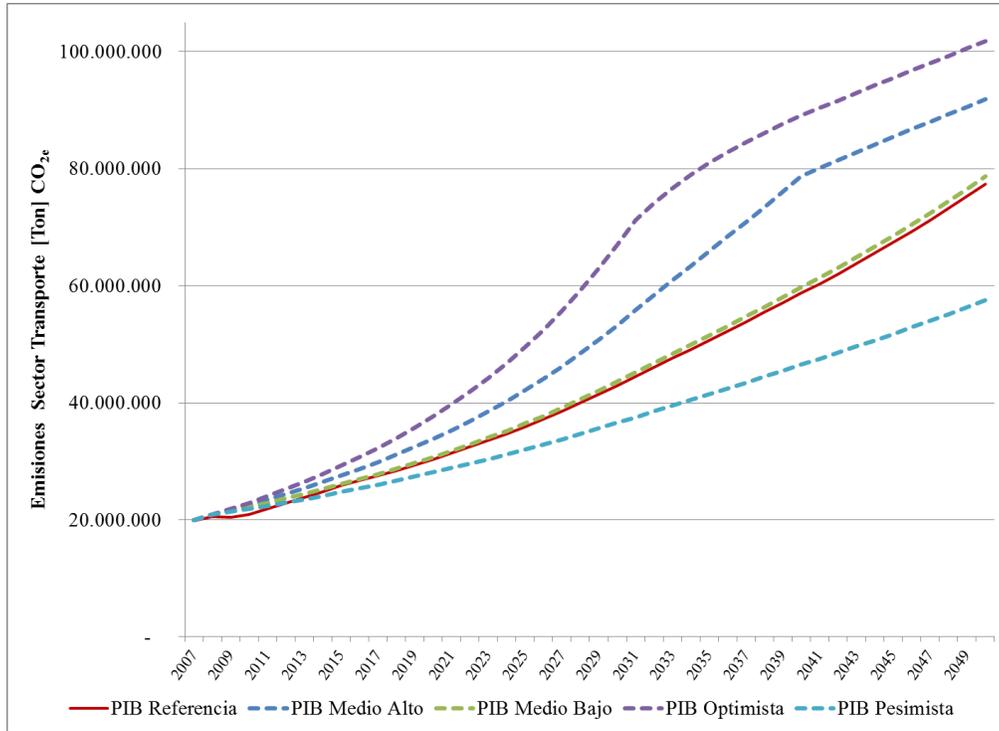


Figura 6.15 Emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB, Escenario A.3

Los resultados del sector transporte desagregados por modo y para los distintos escenarios de PIB analizados en el presente estudio se indican a continuación, bajo la condición de partición modal según A.3:

Tabla 6.24 Resultados desagregados por modo para emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenarios de PIB, Escenario A.3

Escenario	Modo	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Aéreo	1.144.558	2.516.315	5.111.571	8.256.681
	Marítimo	427.423	723.017	1.118.005	2.952.923
	Ferrovionario	52.459	70.240	87.919	137.747
	Caminero	18.202.122	27.059.754	36.615.722	66.066.584
	<b>Total</b>	<b>19.826.562</b>	<b>30.369.327</b>	<b>42.933.217</b>	<b>77.413.936</b>
PIB Medio Alto	Aéreo	1.171.745	3.696.817	9.296.300	15.014.023
	Marítimo	428.747	843.336	1.474.412	3.684.105
	Ferrovionario	52.659	75.833	100.265	148.854
	Caminero	18.264.270	29.264.203	42.370.960	73.046.974
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>33.880.189</b>	<b>53.241.937</b>	<b>91.893.957</b>
PIB Medio Bajo	Aéreo	1.171.745	2.572.384	5.312.153	8.580.810
	Marítimo	428.747	742.578	1.146.114	3.027.094
	Ferrovionario	52.659	71.009	88.882	139.256
	Caminero	18.264.270	27.359.766	37.050.930	66.980.857
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>30.745.737</b>	<b>43.598.079</b>	<b>78.728.017</b>
PIB Optimista	Aéreo	1.171.745	5.294.528	16.182.511	26.136.757
	Marítimo	428.747	956.611	1.892.226	3.591.262
	Ferrovionario	52.659	80.935	112.977	147.146
	Caminero	18.264.270	31.342.324	48.743.523	71.960.416
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>37.674.398</b>	<b>66.931.237</b>	<b>101.835.581</b>
PIB Pesimista	Aéreo	1.171.745	1.783.701	3.019.137	4.875.650
	Marítimo	428.747	653.055	888.750	1.824.600
	Ferrovionario	52.659	66.449	78.699	110.391
	Caminero	18.264.270	25.612.309	32.586.885	50.682.962
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>28.115.514</b>	<b>36.573.471</b>	<b>57.493.603</b>

Como referencia, en la RM, al año 2020 se esperaría una partición modal 56,2% de transporte privado y 43,8% de transporte público (Taxi 1,6%, Metro 12,8% y Bus 29,4%) según el modelo. En general, no existen proyecciones de particiones modales para el país, sin embargo Sectra, en la presentación del Plan de Maestro de Transporte de Santiago al 2025 declara una partición modal de 56% transporte privado y 44% transporte público en su escenario base, cabe destacar que la partición modal no es proyectada sino resultado de una modelación de transporte.

#### 6.4.3 Combinación de casos

En la Tabla 6.25 se describen las combinaciones de sensibilidades que se analizaron a partir de los casos definidos previamente.

Tabla 6.25 Descripción de sensibilidades para modelo de carga y pasajeros combinados

ID	Descripción
A.1, B.1 y C.1	Combinación de sensibilidades según ID. 1% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana.
A.1, B.1, C.1, D.1, D.3 y E.1	Combinación de sensibilidades según ID. 1% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana, tasa de carga ferroviaria, tasa de ocupación vehículo particular. Tasa de carga para camión según Anexo B
A.2, B.2 y C.2	Combinación de sensibilidades según ID. 10% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana
A.2, B.2, C.2, D.2, D.3 y E.2	Combinación de sensibilidades según ID. 10% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana, tasa de carga ferroviaria, tasa de ocupación vehículo particular. Tasa de carga para camión según Anexo B
A.3, B.1 y C.1	Combinación de sensibilidades según ID. 1% partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana. Partición modal de pasajeros según Anexo K
A.3, B.2 y C.2	Combinación de sensibilidades según ID. 10% partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana. Partición modal de pasajeros según Anexo K
A.3, B.1, C.1, D.1, D.3 y E.1	Combinación de sensibilidades según ID. 1% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana, tasa de carga ferroviaria, tasa de ocupación vehículo particular. Tasa de carga para camión según Anexo B. Partición modal de pasajeros según Anexo K
A.3, B.2, C.2, D.2, D.3 y E.2	Combinación de sensibilidades según ID. 10% partición modal de pasajeros, partición modal de carga y partición camión urbana-interurbana, tasa de carga ferroviaria, tasa de ocupación vehículo particular. Tasa de carga para camión según Anexo B. Partición modal de pasajeros según Anexo K

A continuación se indican los resultados de emisiones de CO<sub>2e</sub> para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 para el caso *PIB Medio Alto* para ambos casos analizados (Tabla 6.26).

Tabla 6.26 Emisiones del sector transporte según combinación de análisis de sensibilidad para modelo de pasajeros y carga, *PIB Medio Alto*

ESCENARIO	CO <sub>2e</sub> [ton/año]		
	2007	2020	2030
CSR	19.620.083	30.591.062	46.400.147
A.1, B.1, C.1	19.584.725	30.463.502	46.156.079
A.1, B.1, C.1, D.1, D.3, E.1	18.127.349	28.376.102	43.404.349
A.2, B.2, C.2	19.266.502	29.315.465	43.959.464
A.2, B.2, C.2, D.2, D.3, E.2	17.505.208	26.929.102	40.929.643
A.3, B.1, C.1	19.882.063	33.829.459	53.175.053
A.3, B.2, C.2	19.563.839	33.372.886	52.573.101
A.3, B.1, C.1, D.1, D.3, E.1	18.421.456	31.708.762	50.362.974
A.3, B.2, C.2, D.2, D.3, E.2	17.772.882	30.582.648	48.756.235

En relación al análisis combinado de las sensibilidades revisadas anteriormente, se observan variaciones de un -11,8% (menor) y un +14,6% (mayor) que el caso base o de CSR para el total de las emisiones del sector transporte al 2030.

El caso analizado que combina cambios en partición modal de carga, partición urbana-interurbana y partición modal de pasajeros, implica un impacto en las emisiones entre 0,53% y 5,3% hacia el 2030, para los caso 1% y 10% de variación. Esto caso es el que presente menor impacto global en las emisiones.

Respecto a la combinación que presenta mayor impacto en las emisiones del sector transporte, se observa un aumento de hasta un 14,6% respecto al caso de CSR producto de una cambio en la partición modal de todo el país (según Anexo K) y variaciones en la partición modal de carga y entre tipo de operación (urbana-interurbana).

En general, los resultados con mayor variación implican el empleo de una tasa de carga para la categoría camión menos conservadora (Anexo B) y una partición modal de pasajeros más desfavorable (anexo K). El resto de los parámetros por sí solo (Tabla 6.19 y Tabla 6.21) implican un cambio de hasta un 4% de las emisiones totales del sector transporte si es que se tiene una incertidumbre del 10% en las magnitudes consideradas en la evaluación actual de los modelos.

## 6.5 Comparación de Resultados

La sección a continuación compara los resultados obtenidos en el presente estudio con los resultados de inventarios de emisiones de GEI previos (subsección 6.5.1) y con los resultados obtenidos a partir de la evaluación con datos disponibles para el período 2007-2012 (subsección 6.5.2), recordando que el desarrollo del estudio (2012) consideró información disponible hacia el 2006, según lo indicaban las bases del mismo.

Los resultados del estudio que fueron empleados en esta comparación corresponden a los obtenidos en el escenario *PIB de Referencia* ya que la variación proyectada de dicho escenario de PIB, corresponde para los primeros años a la variación real observada para el periodo 2007-2011.

### 6.5.1 Inventarios sectoriales previos

A continuación se realizan comparaciones de los resultados obtenidos de CO<sub>2e</sub> para los distintos modos, respecto a otras proyecciones generadas a nivel local.

En la “*Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*” (Ministerio de Medioambiente, 2011) se reporta el inventario nacional de emisiones de GEI para el sector transporte en el año 2006 (INGEI). Además se presentan resultados de proyecciones para el período 2010-2025.

Los resultados reportados en el documento mencionado anteriormente indican que el sector transporte emite en el año 2006 un total de 17,1 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>. Los resultados para el escenario *PIB de Referencia* obtenidos en el presente estudio indican para el 2007 un total de 19,5 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, lo cual corresponde a un 12% de incremento entre el 2006 (referencia) y 2007 (dato estimado en este estudio).

Esta tendencia creciente observada entre el año 2006-2007 también se observó en el BNE como gasto energético asociado al sector transporte. Si bien esta fuente no desagrega los consumos búnker en los modos marítimo y aéreo, representa la fuente oficial a nivel país del comportamiento histórico energético para este sector, entre otros sectores. La Tabla 6.27 indica el total de energía consumida (Tcal) por consumo de combustibles fósiles según el BNE (sin descontar bunker). Se observa que al entre el año 2006 y 2007 hay un crecimiento del 6,3% en el consumo, mientras que en entre el 2005-2006 hubo un incremento de 1,5% y, posteriormente, entre el 2007 y 2008 hubo un incremento de 3,5%. Se incluye como antecedente en la Tabla 6.27 el consumo proyectado para el CSR según el escenario *PIB de Referencia*.

Tabla 6.27 Consumo energético agregado sector transporte para combustibles fósiles según BNE y según proyección 2007-2011 de CSR-*PIB de Referencia*.

Año	BNE (Tcal) <sup>32</sup>	Variación Anual BNE	PIB Referencia (Tcal)
2004	72.965		-
2005	79.647	8,4%	-
2006	80.889	1,5%	-
2007	86.319	6,3%	89.079
2008	89.437	3,5%	94.258
2009	85.580	-4,5%	95.875
2010	83.386	-2,6%	99.325
2011	86.590	3,7%	105.429

Otra razón que explique este incremento de 12% para el 2006-2007 es la metodología empleada en la referencia citada respecto a la utilizada en el presente estudio (basado en la demanda y no en el consumo).

Otro antecedente referenciado al año 2006 se obtiene al realizar el cálculo directo de las emisiones a partir de las tercalorías del BNE 2006 para el sector transporte<sup>33</sup> desagregadas por tipo de combustible. Si solo se consideran los modos caminero y ferroviario, en total emiten 17,06 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, lo cual equivale aproximadamente al inventario total reportado por el INGEI para el sector transporte al 2006. Esto pudiera indicar que existe una leve subestimación del inventario INGEI si se considera al BNE como fuente oficial de consumos, y que para estos dos modos el valor reportado es válido para reportarlo dentro del inventario nacional ya que no tienen la componente bunker como los casos marítimo y aéreo.

### **Análisis por Modo**

En términos de participación por modo a nivel nacional, la Figura 6.16 y la Tabla 6.28 indican los resultados de las proyecciones y la participación por modo para los cortes temporales 2010, 2015, 2020 y 2025, según el documento citado del Ministerio de Medioambiente.

<sup>32</sup> BNE no descuenta emisiones búnker para los modos marítimo y aéreo.

<sup>33</sup> A partir de FE del IPCC 2006 definidos por tipo de combustible y modo

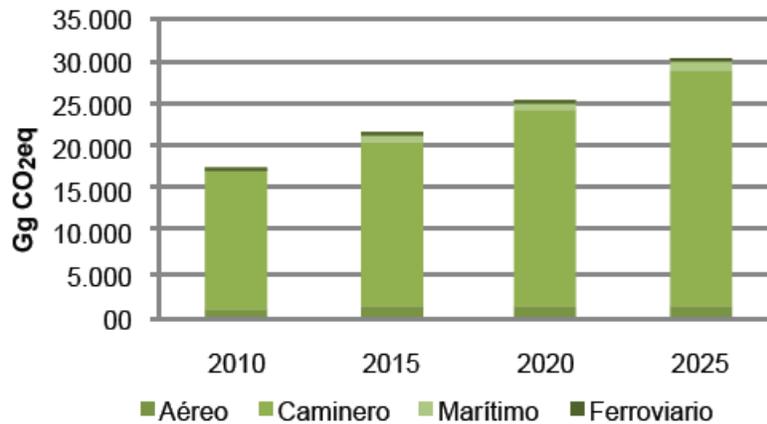


Figura 6.16 Proyección de emisiones de CO<sub>2e</sub> en el sector transporte chileno para el período 2010-2025. Fuente: *Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, Ministerio de Medioambiente, 2011.

Tabla 6.28 Proyección porcentual de emisiones de CO<sub>2e</sub> en el sector transporte según modos para el período 2010-2025. Fuente: *Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, Ministerio de Medioambiente, 2011.

Modo	2010	2015	2020	2025
Aéreo	5,3%	5,2%	4,6%	4,4%
Caminero	91,4%	90,5%	90,5%	90,2%
Marítimo	3,0%	4,0%	4,6%	5,2%
Ferrovionario	0,3%	0,3%	0,3%	0,2%

Los resultados obtenidos en el presente estudio para el caso *PIB de Referencia* en los mismos cortes temporales de la Figura 6.16 y la Tabla 6.28 se indican en la Tabla 6.29. En términos generales, la participación por modo y las tendencias hacia el año 2025 son las mismas para ambos resultados. Sin embargo, se observa una mayor participación en las emisiones de CO<sub>2e</sub> en términos relativos en el modo aéreo en los resultados reportados en el presente estudio. Respecto a las magnitudes, la referencia citada indica que al 2025 el sector transporte emite 30,1 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> y el resultado obtenido en el presente estudio señala un total de 31,4 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, es decir, un 4,1% mayor.

El modo caminero en ambos resultados es el de mayor participación y hacia el 2025, sin embargo, en los resultados presentados en la Tabla 6.28, la participación de este modo es relativamente sostenida en el tiempo, en cambio para los resultados obtenidos en el presente estudio, la participación se reduce en un 7,5% hacia el 2025 respecto al 2010 debido al crecimiento del modo aéreo.

Finalmente, para ambos inventarios los modos marítimo y ferroviario son menores al 6% del total de las emisiones nacionales. La Tabla 6.29 resume la participación obtenida en el escenario *PIB de Referencia*.

Tabla 6.29 Resultados desagregados por modo para emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenarios de *PIB de Referencia*

<b>Modo</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>
Aéreo	4,8%	8,0%	9,2%	11,2%
Caminero	92,6%	89,3%	87,9%	85,7%
Marítimo	2,3%	2,4%	2,7%	2,8%
Ferroviano	0,3%	0,3%	0,3%	0,2%

### **Análisis RM**

Respecto a la evaluación a nivel regional obtenida por el modelo de transporte de pasajeros terrestre, se comparan los resultados obtenidos en el Inventario de Emisiones de la RM para fuentes móviles, 2005<sup>34</sup>, ver Tabla 6.30) y los resultados obtenidos de la modelación desarrollada en el presente estudio. Si bien esta referencia corresponde un año distinto al 2006, representa una fuente de carácter oficial para comparar magnitudes en la Región Metropolitana con los resultados obtenidos en este estudio.

---

<sup>34</sup> Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005”, Dictuc por encargo de CONAMA RM, año 2007.

Tabla 6.30 Emisiones CO<sub>2</sub> transporte de pasajeros terrestre 2005. Fuente: Inventario de Emisiones de la RM para Fuentes Móviles 2005

Categoría	Emisiones [ton] CO <sub>2</sub>
Veh. Particular	3.785.922
Taxi	230.061
Bus	743.627
<b>Total</b>	<b>4.759.611</b>

Al comparar los resultados de la tabla anterior con los resultados obtenidos en el presente estudio para la RM en el año 2007, escenario *PIB de Referencia* (Tabla 6.18), se observa que la categoría vehículo particular reportada en inventario de emisiones de la RM-2005 es 5% mayor que las emisiones reportadas en el presente estudio. En relación a las categorías de taxis y buses, las emisiones de CO<sub>2</sub> reportadas en el inventario RM-2005 son 20% y 9% menores que las mismas del presente estudio, año 2007, lo cual en parte responde a la tendencia creciente en el tiempo de las emisiones generales en el sector transporte.

En resumen, los resultados obtenidos en el presente informe para estimar y proyectar las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte están dentro de los órdenes de magnitud de proyecciones generadas en estudios previos nacionales para el sector, tanto en términos de magnitud de emisiones generadas por modo, como en las tendencias proyectadas. Este hecho es relevante al considerar que la clásica metodología aplicada en este sector a partir de series históricas de consumo de combustible, parque vehicular y niveles de actividad fueron reemplazados por dos nuevos enfoques metodológicos: uno basado en la demanda de transporte de carga terrestre y otro basado en el transporte de pasajeros terrestre, manteniendo la metodología clásica basada en consumo energético para los modos aéreo y marítimo nacional.

Las diferencias más notorias en términos de emisiones de CO<sub>2e</sub> resultantes del enfoque metodológico clásico y la nueva propuesta en este estudio basada en demanda, es que el sector caminero tiene un crecimiento más amortiguado pues no está directamente ligado al parque vehicular, que crece sostenidamente en el tiempo, sino con la demanda real de transporte, ya sea de carga o de pasajeros. Al asumir que el parque vehicular crece y que entonces, todo el parque se mueve y genera emisiones, puede sobreestimar el consumo de combustible y en consecuencia las emisiones, lo cual no necesariamente ocurre al incorporar variables como tasa de ocupación por tipo vehicular en un modelo basado en la demanda de pasajeros, por ejemplo.

### 6.5.2 Emisiones con datos 2007-2012

Dado que la definición de CSR debía considerar información disponible hasta el año 2007, se realizó una evaluación de emisiones con información disponible y no proyectada para el sector transporte. La fuente de información escogida es el Balance Nacional de Energía (BNE) del Ministerio de energía, el cual reporta consumos energéticos (Tcal) por modo y

agregado a nivel nacional<sup>35</sup>, entre otros consumos sectoriales. Se debe tener en cuenta que los datos asignados a los modos marítimo y aéreo no descuentan el consumo búnker.

La Tabla 6.31 indica los valores de emisiones de CO<sub>2e</sub> en base al BNE y las obtenidas en este estudio para el escenario *PIB de Referencia*, con y sin bunker. Dado que los modos aéreo y marítimo no descuentan bunker en el BNE, se determinó el valor de emisiones nacionales directo de evaluar el BNE y otro a partir de la resta del consumo internacional proyectado en este estudio para los años 2007-2011 al valor total del BNE (denominado como BNE\*\*). Las últimas filas en la Tabla 6.31 contienen la diferencia porcentual de las emisiones obtenidas en este estudio respecto a las obtenidas con datos del BNE, con y sin bunker.

Tabla 6.31 Comparación de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte para 2007 y 2011

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]				
	2007	2008	2009	2010	2011
CSR-PIB Referencia (sin bunker)	19.529.758	20.053.168	19.757.682	20.149.830	20.872.868
CSR PIB Referencia (con bunker)	26.630.399	28.226.939	28.734.863	29.816.385	31.712.011
BNE	26.872.336	27.868.844	26.566.835	25.594.046	26.832.827
BNE**	19.771.694	19.695.073	17.589.654	15.927.491	15.993.684
Diferencia sin bunker	1,2%	-1,8%	-12,3%	-26,5%	-30,5%
Diferencia sin bunker	0,9%	-1,3%	-8,2%	-16,5%	-18,2%

BNE\*\* corresponde al valor BNE menos el valor búnker estimado en este estudio

Se observa que al año 2007, los resultados de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte a partir del BNE son un 1,2% mayor que los resultados obtenidos a partir de las proyecciones llevadas a cabo en el capítulo 5. Hacia el año 2011, los resultados de emisiones en base al BNE comienzan a ser menores que las obtenidas a partir de las proyecciones, llegando a ser 30% menor con respecto al año 2011 del Escenario *PIB de Referencia*.

Las razones que explican esta diferencia pueden tener varios orígenes. Lo primero que se identifica es que la tendencia al alza en las emisiones proyectadas de CSR no sigue el mismo patrón que el BNE, el cual tiene una caída a partir del año 2009. Esto se produce por los modelos econométricos basados en la tendencia histórica creciente lo cual no correspondió a la tendencia del reporte BNE para los años 2007-2011.

Otro factor influyente en la diferencia hacia el 2011 es el descuento de las emisiones búnker de los modos aéreo y marítimo al total reportado por el BNE pues este valor viene de la proyección econométrica ya que no está disponible como dato explícito en el BNE. Si se comparan los resultados con búnker, las emisiones calculadas a partir del BNE son un 18,2% menor a las reportadas en este informe, sumando al inventario nacional los resultados obtenidos de la proyección de emisiones búnker.

<sup>35</sup> El Balance Nacional de Energía está disponible hasta el año 2011

Finalmente, las incertidumbres del modelo que se analizaron en la sección 4 pudieran afectar las diferencias. Sin embargo, la econometría que determinó las emisiones búnker se identifican como principales causas de las diferencias entre emisiones con datos proyectados respecto a los obtenidos con la información del BNE, sumado a que no es posible desagregar dichos consumos de manera directa desde esta fuente. Este hecho ha sido señalado como una barrera en la determinación de las emisiones bunker (aéreo y marítimo) del sector transporte en estudios previos y revisados en el desarrollo del presente informe. La principal causa es que El Servicio Nacional de Aduanas (SNA) no ha sistematizado la generación de esta base de datos en el tiempo y tampoco ha habido una definición a nivel de instituciones (Ministerio de Energía y SNA), a pesar de las conclusiones generadas en el estudio “*Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero*”- CONAMA 2010.

## 6.6 Coherencia de Parque Vehicular y Emisiones

En la siguiente sección, se analiza la coherencia entre la proyección del parque vehicular y las emisiones, considerando que las emisiones están determinadas por las proyecciones de las variables PKM y TKM a continuación se analiza la coherencia entre el parque y los kilómetros recorridos por la flota separados en transporte de pasajeros y carga.

### 6.6.1 Transporte de pasajeros

En el caso de transporte de pasajeros, se analiza la coherencia en relación al parque de vehículos de pasajeros y al parque de buses. En las siguientes figuras se muestra la relación entre el parque proyectado, los kilómetros totales proyectados y en consecuencia los km por cada vehículo al año para el escenario *PIB Medio Alto*.

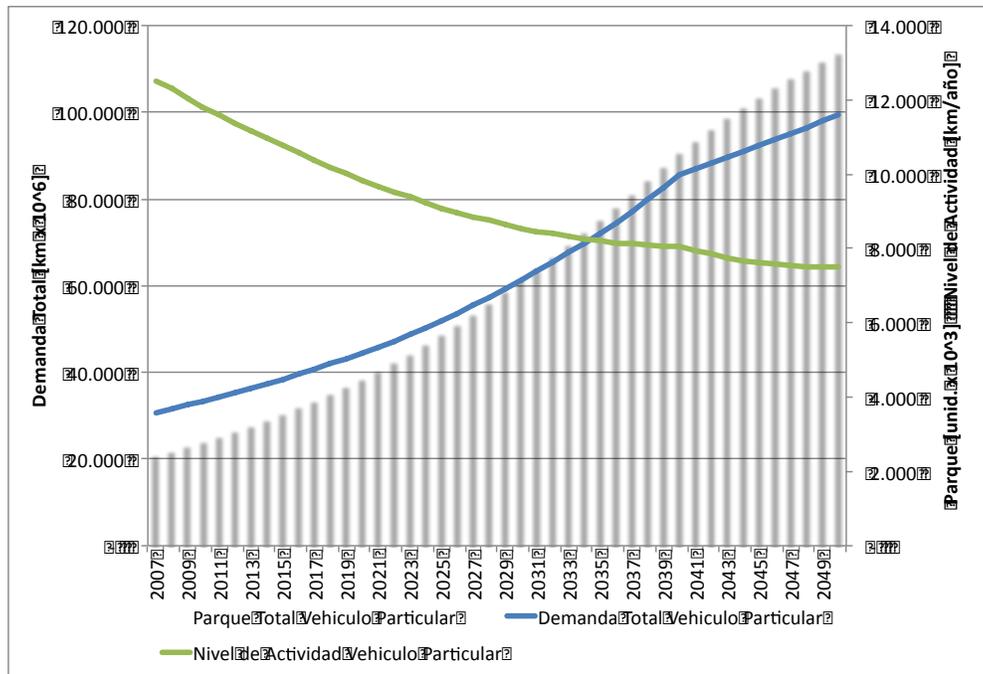


Figura 6.17 Coherencia entre proyección de parque de vehículos particulares y Demanda Total, *PIB Medio Alto*

En la Figura 6.17 se observa la proyección de parque vehicular particular en relación a la demanda total en kilómetros obtenida del cálculo de PKM para este tipo de transporte. La conclusión es que la demanda crece en menor medida que el parque vehicular y el resultado es que al relacionar ambas variables el Nivel de Actividad baja de 12.515 (km/año) a 7.490 (km/año) entre el año 2007 y el año 2050. Este resultado presenta una coherencia entre los PKM y el parque si se considera que la tasa de motorización de vehículos particulares alcanzará en el año 2050 los 650 vehículos por cada 1.000 habitantes (tasa acorde con los países de la OCDE<sup>36</sup>), por lo que muchos de los nuevos vehículos se puede interpretar que

<sup>36</sup> <http://www.oecd.org/publications/factbook/36340933.pdf>

serán segundos vehículos utilizados de manera menos intensiva. Esta hipótesis justificaría que, en promedio, los vehículos bajen su nivel de actividad en el tiempo.

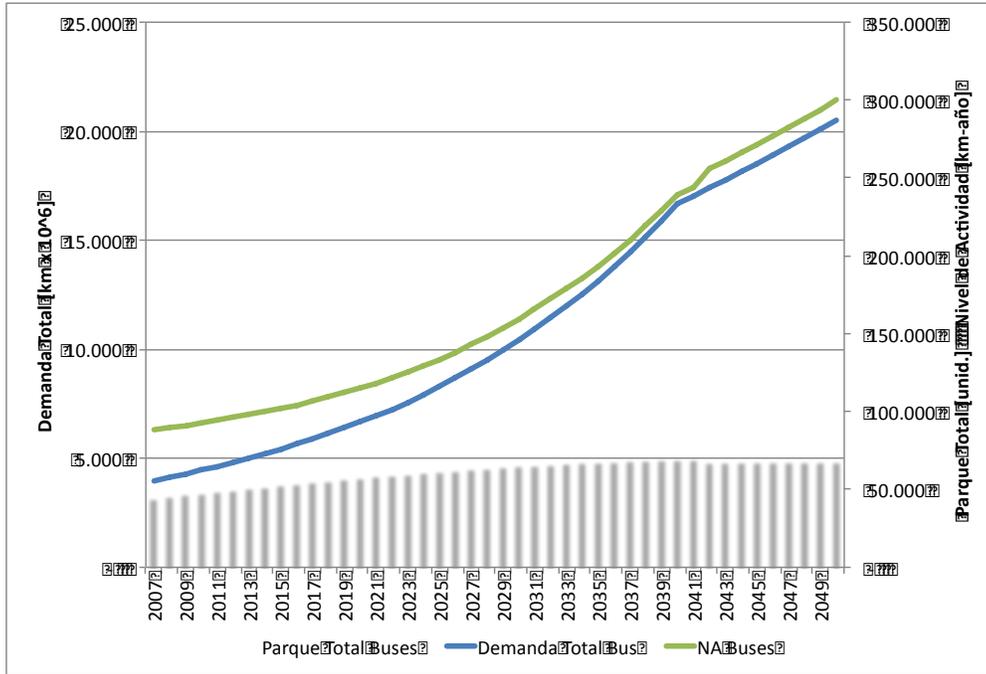


Figura 6.18 Coherencia entre proyección de parque de buses particulares y Demanda Total, PIB Medio Alto

La Figura 6.18 muestra el mismo análisis realizado para vehículos particulares en buses. Cabe recordar que bajo esta categoría se encuentran tanto los buses urbanos como los interurbanos y rurales. En este caso se observa que la demanda por transporte crece 5 veces entre los años 2007 y 2050, mientras que el parque se mantiene muy estable, pasando de 44.816 buses en el año 2007 a 68.261 buses en el año 2050. El efecto es que el nivel de actividad de los buses crece de manera desproporcionada llegando a 300.034 (km/año) por bus en el 2050. Este valor es desproporcionado porque implicaría que cada bus recorrería 822 km diarios<sup>37</sup> mientras que en el 2007 este recorrido es de 242 km, un incremento de 4 veces. En este caso la proyección de parque estaría subestimada por lo que no responde a la demanda proyectada para este modo de transporte. Es por lo tanto importante destacar que la utilización de la metodología de PKM para buses se justifica de manera que las emisiones respondan al incremento de la demanda por este modo de transporte.

Finalmente, el escenario A3 fue considerado por el equipo MAPS-Chile como el escenario que mejor representa la situación futura del transporte de pasajeros en Chile, por consiguiente se realiza el análisis de coherencia de este escenario a continuación.

<sup>37</sup> Considerando 365 días año

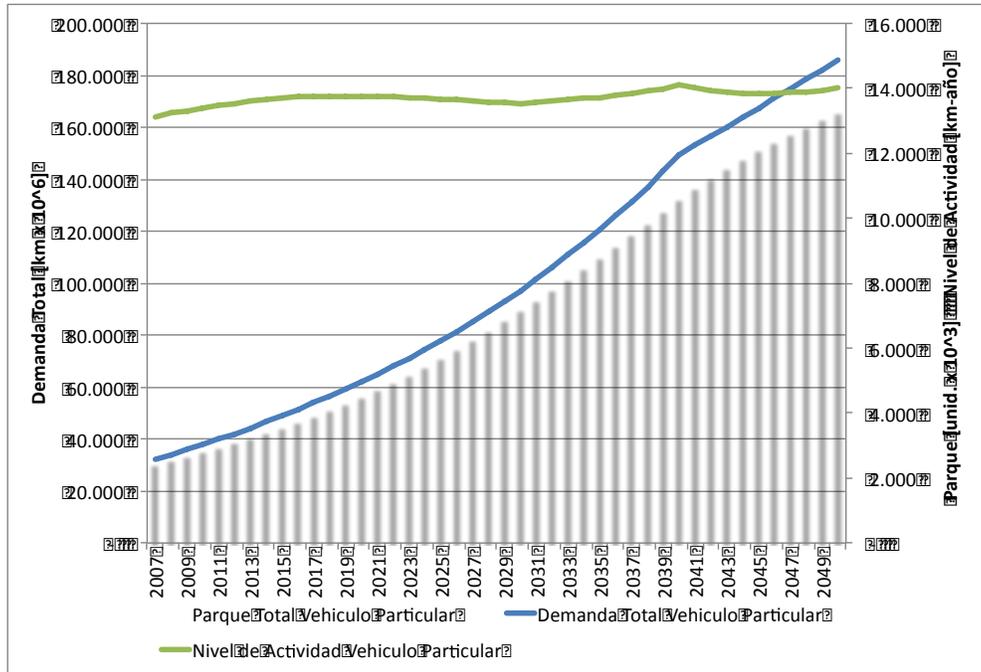


Figura 6.19 Coherencia entre proyección de parque de vehículos particulares y Demanda Total, Escenario A3, *PIB Medio Alto*

En el caso del escenario A3 se observa que la proyección de Demanda Total es seguida también por la proyección de Parque Vehicular, pasando de 13.112 (km/año) a 14.011 (km/año), es decir el nivel de actividad unitario por vehículo se mantendría en un rango menor a los 1.000 kilómetros. Este escenario presenta coherencia con el supuesto del escenario A3 que considera que la partición modal pasa gradualmente del transporte público al transporte privado. En resumen, este escenario consideraría que cada vehículo que ingresa al parque se usa lo mismo o más durante el periodo analizado.

Para el mismo escenario en el caso de los buses se presenta la siguiente imagen.

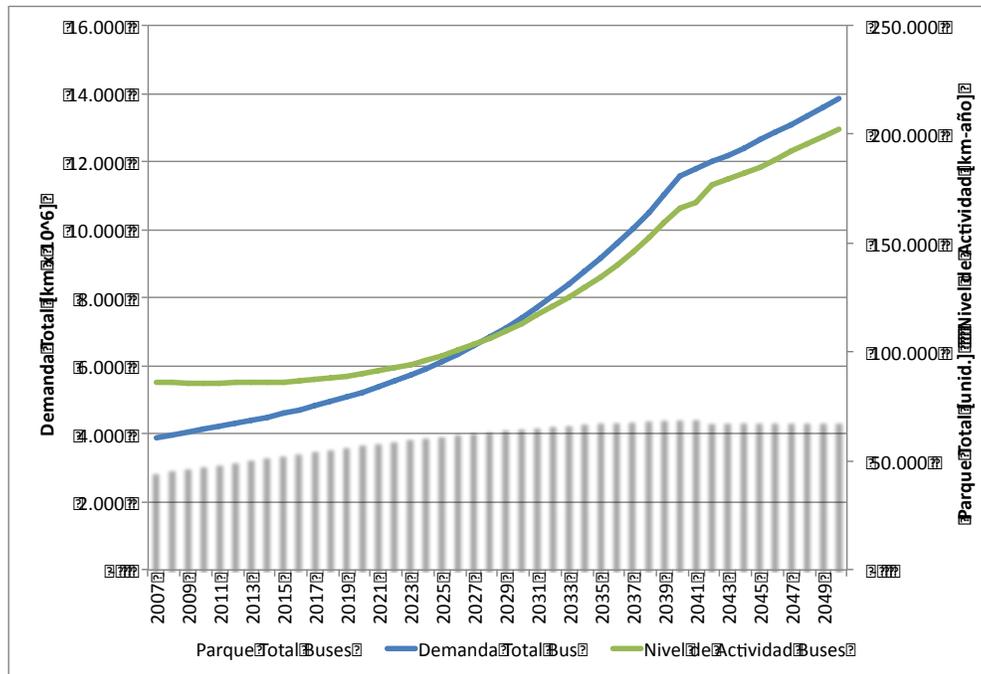


Figura 6.20 Coherencia entre proyección de parque de buses particulares y Demanda Total, Escenario A3, *PIB Medio Alto*

En el caso del parque de buses, se observa que el análisis de coherencia del escenario A3 presenta una situación similar a la del escenario base pero esta vez el efecto es atenuado. La demanda por transporte en bus aumenta 3,5 veces entre el 2007 y el 2050 mientras que el parque crece de 44.816 buses en el año 2007 a 68.261 buses en el año 2050. Considerando lo anterior el nivel de actividad de los buses aumentaría de 86.219 (km/año) a 202.601 (km/año) lo que corresponde a 236 km al día en el 2007 y 555 km al día en el 2050. Nuevamente se concluye que el parque de buses esta subestimado. Se observa un gran crecimiento de la demanda a partir del año 2025 que en un análisis más completo podría justificar la inclusión de otros modos como el ferroviario.

Es importante reforzar que la utilización de la metodología PKM permite obtener mejores resultados en la proyección de variables de transporte.

### 6.6.2 Transporte de carga

Para realizar el análisis de coherencia para los valores de consumo y parque obtenidos por modelos econométricos distintos, se derivó primero la actividad anual y luego diaria por vehículo para definir si las distancias obtenidas guardan coherencia con valores aceptables observados en la realidad. Los detalles de esta modelación se encuentran en el Anexo L.

En primera instancia se analizó la actividad diaria obtenida, donde los valores promedio por año variaron entre los 91 y 125 kilómetros diarios en el caso *PIB Medio Alto*, dependiendo del escenario y tipo de transporte. Si consideramos que de acuerdo a la Dirección de

Vialidad del gobierno de Chile<sup>38</sup> la ruta 70 Avenida Américo Vespucio tiene una longitud total de 64,8 km, significa que la actividad estimada equivale a recorrer entre 1,4 y 1,93 veces al día, esta importante arteria de la capital del país. En consecuencia la estimación del transporte urbano guarda coherencia con el perímetro urbano de la principal ciudad de Chile. Por otra parte, la distancia diaria para el transporte interurbano representa un viaje de Santiago al Puerto de San Antonio por día, por origen-destino separado por 117,86 kilómetros, de acuerdo a la página oficial de vialidad<sup>39</sup> del gobierno de Chile. Si bien este no es el único par origen y destino, se debe considerar que este nivel de actividad representa también 1 viaje cada 2 semanas desde la capital a Puerto Montt, ciudades separadas por 1.032.45 kilómetros de acuerdo al sitio web ya mencionado. Si se considera que no todos los camiones tienen carga todos los días, pudiendo realizar fácilmente viajes *long haul* una vez por semana, el número obtenido es razonable y evidencia que el parque no opera a su máxima capacidad, al menos considerando el valor promedio.

Si se evalúa la evolución de la actividad anual en el escenario de referencia, de la cual se derivó la actividad diaria, se observa un crecimiento de poco más del 10% en la actividad por camión de vehículos livianos urbana, sin llegar a niveles de saturación de la capacidad de transporte, esto es de 30 mil kilómetros al año en 2007 a aproximadamente 34 km/año entre los años 2025 y 2040, decayendo hasta alcanzar un nivel levemente superior en el año 2050 al inicial, con 32 mil kilómetros por año para un vehículo promedio. Para el escenario medio alto se observa un comportamiento muy similar, con un máximo menor al escenario de referencia, cercano a los 32 mil kilómetros por año entre 2025 y 2040.

Para el caso de los vehículos medianos y pesados, la tendencia es a reducir la actividad anual por camión de manera consistente, sin importar el escenario en análisis, resultando en una caída de la actividad anual por vehículo de aproximadamente un 10% para los vehículos medianos en el escenario de referencia, y levemente superior al 20% de reducción en el caso de los camiones pesados para el mismo escenario. Para ambos tipos de vehículos, es decir, medianos y pesados, la caída en actividad anual mantiene la tendencia en el escenario medio alto.

Si se observa el crecimiento del parque, se tiene que éste crece más rápido que la demanda, lo que explica la caída de actividad promedio por vehículo. En la información histórica se observa que el parque crece con rezago respecto del incremento de la demanda, lo que se puede explicar por razones de mercado como por ejemplo que la inversión en vehículos es una decisión importante para las empresas de carga y estas sólo hacen crecer su flota si su capacidad de satisfacer la demanda se ve mermada en el tiempo. Así mismo, puede haber un desfase en la disminución en la tasa de crecimiento del parque, ya que las decisiones de inversión pueden haberse tomado antes de una caída en la demanda por transporte.

Otro aspecto importante a señalar es que un enfoque de proyección de emisiones por parque que no refleje de buena manera esta caída en la actividad por vehículo incurra en sobre estimación de las emisiones del parque.

---

<sup>38</sup> Red Vial Nacional – Dimensionamiento y Características. Departamento de Gestión Vial del Gobierno de Chile, año 2008.

<sup>39</sup> <http://servicios.vialidad.cl/Distancias/Distancias.asp>

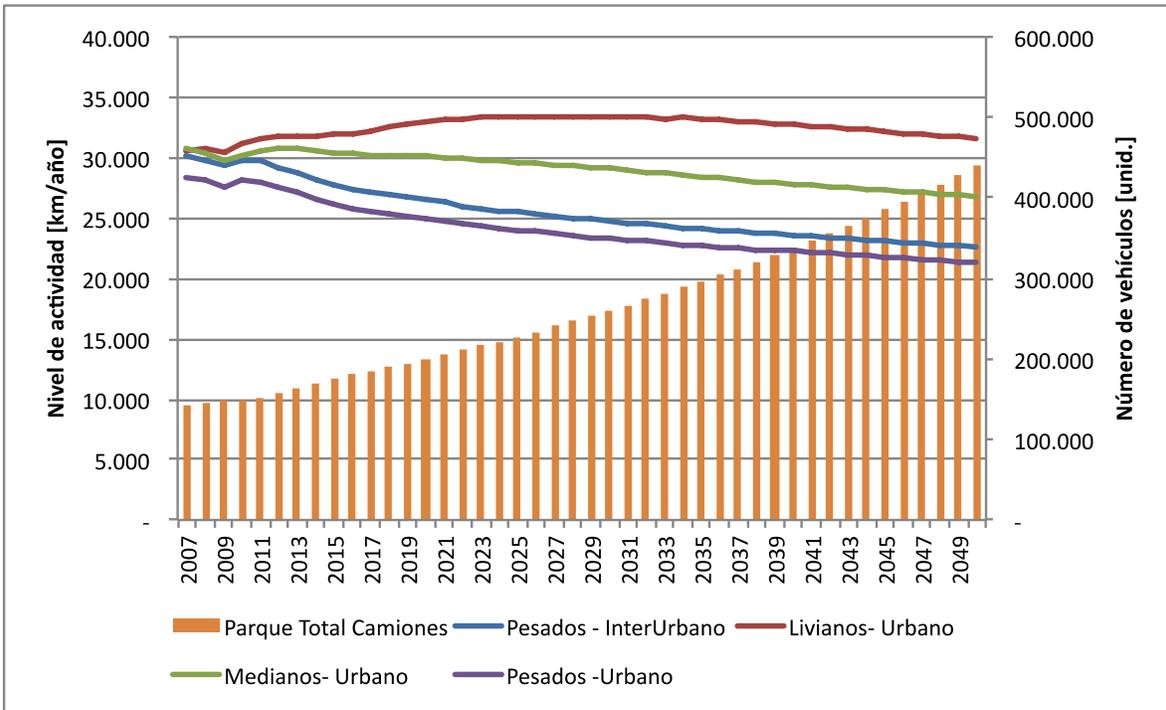


Figura 6.21. Evolución de actividad por categoría de camión, escenario de referencia.

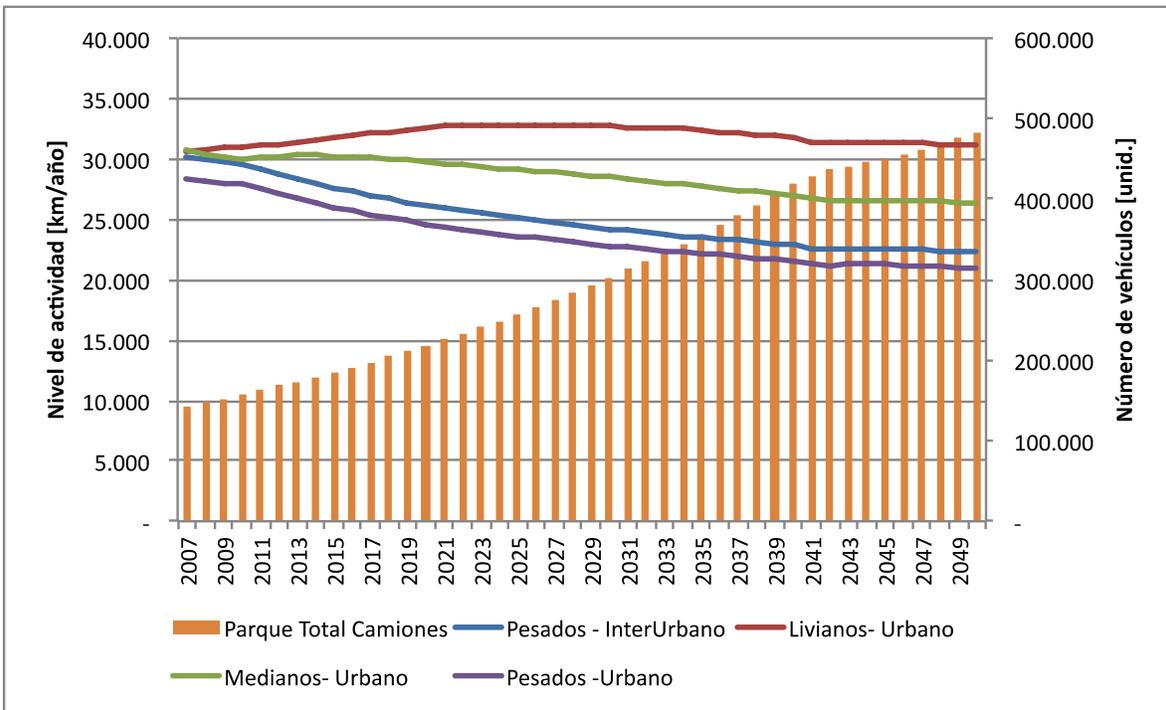


Figura 6.22. Evolución de actividad por categoría de camión, escenario medio alto.

Según nuevos antecedentes discutidos durante el GCE4<sup>40</sup> el INE reporta en su informe “Transporte por Carretera<sup>41</sup>, Informe Anual 2007” un total de 3.963.885.918 km recorridos para un total de 65.057 camiones, los cuales pertenecen o son subcontratados por las empresas que responden la encuesta que da origen al informe. Si se consideran ambos valores los 65.057 camiones reportados por el INE recorrieron en promedio 60.911 km, sin embargo el mismo INE reporta un número total de camiones al año 2007 de 139.211, es decir no se incluyen en la encuesta 74.154 camiones. Existe alta incertidumbre asociada a la cantidad de kilómetros recorridos por esos 74.154 camiones. Suponiendo que esos vehículos recorren en promedio 20.000 km aproximadamente, el promedio ponderado del kilometraje recorrido de ambas flotas de camiones sería de 39.102 km al año. El cual tendría una diferencia de solo el 23% con respecto a los 30.050 que propone este estudio.

Por otra parte, si se consideran los 3.963.885.918 km y se asume una tasa de carga de 11,6 toneladas camión, el valor de TKM alcanzaría 45.981 millones de TKM, lo cual es razonable de acuerdo al valor de TKM publicado en el estudio previo “Análisis económicos del transporte de carga nacional”. Si se le agregan, 74.154 camiones a 20.000 km, a una tasa de 5,5 toneladas camión se deberían sumar 8.157 millones de TKM. En total la flota de camiones para el año 2007 sumaría 54.138 millones de TKM lo cual es un 19% mayor que el valor de TKM reportado por este estudio.

Considerando el mismo estudio del INE, se desprende que la actividad del transporte se concentra en 14.007 empresas, las cuales poseen el 95% de las ventas, mientras que 19.964 empresas concentran solo el 5%. Las 14.007 corresponden al Marco Muestral y por lo tanto en estas empresas se concentrarían los 65.057 camiones que declara la encuesta, quedando el resto de los camiones (74.154) en las 19.964 empresas que representan el 5% de las ventas. Utilizando las ventas totales que reporta el INE se puede concluir lo siguiente:

- Dividiendo el total de la facturación reportada por la encuesta (2.268.453.465 M\$) por los kilómetros totales<sup>42</sup> recorridos (3.963.885.918 km) se tiene que los ingresos promedio por kilómetro recorrido son de 572 \$/km.
- La actividad reportada por INE para las empresas que factura el 95% de las ventas anuales de transporte caminero corresponde a 3.964 millones de kilómetros, que a la tasa de carga definida (11,6 ton/veh) equivalen a 45.982 millones de TKM. Ambos valores son consistentes con la estimación de actividad de Sistemas Sustentables, quedando por resolver el aporte del parque adicional.
- Si el total de gastos<sup>43</sup> el año 2007 fue de 1.840 millones y el total de ingresos directos por transporte de carga fueron de 2.268 millones entonces el margen por el negocio de carga el año 2007 fue de un 23%.

---

<sup>40</sup> 4° reunión del Grupo de Construcción de Escenarios del proyecto MAPS-Chile

<sup>41</sup> Transporte de carga por Carretera corresponde la clasificación Clase: 6023 que abarca todos los tipos de transporte regular y no regular de carga por carretera, se incluye el transporte en camión de una gran variedad de mercancías, como troncos, ganado, productos refrigerados, carga pesada, carga a granel, muebles de mudanza, etc. Esta clasificación viene de la obligación de reportar por ser parte de la OCDE y el nombre en inglés corresponde a *Freight transport by road* es decir abarca todo tipo de transporte y no necesariamente interurbano. Esto se explica de manera completa en la respuesta a las observaciones del grupo GCE4.

<sup>42</sup> Con y sin carga.

<sup>43</sup> Considerando consumibles, recursos humanos y pagos a terceros.

- El parque no considerado por la encuesta asciende a 74.000 vehículos, lo que implica que el resto de los vehículos no considerado en la encuesta, es decir, un 53,3% del total del parque reportado por el INE (139.211 vehículos), recorrería una tasa de 2.960 km/año por vehículo. El promedio ponderado de nivel de actividad por vehículo<sup>44</sup> entonces sería de 30.050 km/vehículo.

En resumen, de los antecedentes aportados al final del estudio por el GCE se concluye que la actividad esta altamente concentrada en 47% del parque (65.057 camiones según INE), sin embargo, existe una enorme incertidumbre en la actividad del resto de la flota (53%) que no esta siendo reportada, según el análisis de este estudio los 74 mil camiones recorrerian 2.960 km/año por los ingresos reportados, cifra baja si se consideran los promedios mencionados en el GCE. Sin embargo, cabe destacar que según el estudio Análisis de la Eficiencia Energética en el Transporte Interurbano de Carga, realizado por CIMA Ingeniería, se presenta la siguiente tabla donde se muestra que de un Universo de 60.346 empresas, 44.223 de las mismas tienen una flota con un promedio de antigüedad de 15 años, es decir estos camiones habrían cumplido su vida útil. Según el estudio “Elaboración de una Estrategia Nacional para Reducir la Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes del Sector Transporte, 2012 realizado por Sistemas Sustentables, al año 2010 existirían 55 mil camiones que tienen una antigüedad mayor a los 15 años.

Tabla 6.32 Concentración de la industria y antigüedad de la flota.

**Tabla 6 – Concentración de la industria y antigüedad de la flota**

Tamaño de Flota	Cantidad de empresas	Proporción	Antigüedad Promedio [años]
1 vehículo	44.223	73,3%	15,3
2 vehículos	9.051	15,0%	13,3
3 vehículos	3.122	5,2%	11,8
4 vehículos	1.377	2,3%	11,0
5 vehículos	730	1,2%	10,2
6 a 10 vehículos	1.159	1,9%	9,7
11 a 100 vehículos	630	1,0%	7,6
Más de 100 vehículos	54	0,1%	4,0
<b>Total</b>	<b>60.346</b>	<b>100%</b>	<b>11,5</b>

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Plantas de Revisión Técnica

Finalmente, se concluye que el kilometraje promedio reportado en este estudio de 30 mil kilómetros por camión al año esta respaldado por el cálculo del promedio ponderado entre los 65 mil reportados en el INE que poseen una alta actividad y los 74 mil que comprenden en su mayoría camiones con una antigüedad mayor a los 15 años, con baja actividad. Cifra que se a la vez es congruente con los TKM totales que fueron validados por CGE.

<sup>44</sup> 60.991 km/año para 46,7% de los vehículos y 2.960 para el 53,3% restante.

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1 Conclusiones Generales

Las conclusiones generales del estudio se indican a continuación:

- Se determinaron y proyectaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el sector Transporte a nivel nacional para el período 2007-2050, donde se consideró como año de inicio el 2007 y se detallaron resultados para los años 2020, 2030 y 2050 para los 5 escenarios de PIB proveídos por el proyecto MAPS-Chile:
  - *PIB de Referencia*
  - *PIB Medio Alto*
  - *PIB Medio Bajo*
  - *PIB Optimista*
  - *PIB Pesimista.*
- Se desarrollaron 3 modelos para estimar emisiones del sector transporte en común acuerdo con la contraparte. Para el caso de los modos aéreo y marítimo, se desarrollaron modelos basados en la proyección de la demanda energética, lo cual representa la metodología característica en estudios nacionales previos, en base a la información disponible para estos modos a nivel local. En ambos modos se estimaron además las emisiones por operación internacional o búnker, las cuales no deben ser contabilizadas dentro del inventario nacional de emisiones de GEI. Adicionalmente, para el modo marítimo, se descontaron las emisiones producidas por actividades pesqueras ya que estas no corresponden al sector transporte sino que al sector industrial.
- En relación a los modos caminero y ferroviario, se desarrolló un nuevo enfoque metodológico para la estimación de emisiones el cual está basado en la proyección la demanda de transporte, ya sea de carga o de pasajeros, y no en la proyección del parque vehicular y consumo energético asociado.
- Los modelos desarrollados para estimar las emisiones de GEI, según sea la demanda de transporte de carga o transporte de pasajeros, representan un aporte para el sector transporte en términos metodológicos y de recopilación de información a nivel local. Además, este enfoque permite modelar de manera más representativa escenarios de mitigación de GEI, por lo que también dichos modelos representan un aporte para las etapas futuras del proyecto MAPS-Chile.
- Todos los modelos desarrollados para el cálculo de emisiones utilizaron los datos básicos proveídos por la contraparte del estudio para asegurar coherencia entre todos los sectores modelados por el proyecto MAPS-Chile.
- Se recopiló la información necesaria para representar las emisiones del sector transporte de línea base o Crecimiento sin Restricción (CSR), limitando su uso a solamente aquella información que se encontraba disponible antes del 2007.

- Se identificaron vacíos de información existentes para la evaluación de los distintos modelos de emisiones y se completó con información validada por la contraparte técnica, de manera de proyectar las emisiones de CSR en forma adecuada y respaldada. Además, se definieron parámetros para aquellos datos relevantes en el cálculo de emisiones que no contaban con una serie histórica consolidada para su proyección.
- En base a estos parámetros relevantes se realizaron análisis de sensibilidad para el cálculo de emisiones de GEI para el escenario *PIB Medio Alto* utilizando los modelos desarrollados en el presente estudio. En el caso de transporte de carga terrestre, se realizaron sensibilidades respecto al cambio modal de la demanda de carga entre el modo ferroviario, traspaso de TKM entre la categoría camión interurbano y variaciones de tasa de carga ferroviaria y de camiones. Para el caso del transporte de pasajeros terrestre, se sensibilizó la partición modal entre vehículo particular – buses y respecto a la tasa de ocupación de vehículos particulares para las cuatro regiones del país donde se concentran las emisiones de CO<sub>2e</sub> en este subsector (RV, RM, RVIII y RX<sup>45</sup>). Además, se evaluó el modelo con una nueva serie de partición modal de pasajeros basada en la información histórica, cuyos resultados se señalan en las conclusiones específicas de este capítulo.
- Los resultados de emisiones de GEI obtenidos en el presente estudio para el sector transporte fueron comparados con resultados provenientes de estudios nacionales previos. Las series previas proyectadas de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector al 2025 resultaron ser 2,8% menores a los valores obtenidos en el 2025 para el presente estudio en el escenario *PIB de Referencia*.
- Las diferencias identificadas indicaron que el sector caminero tiene un crecimiento más amortiguado que los inventarios previos para el sector transporte. Esto se explica por el tratamiento metodológico, pues el nuevo enfoque no está directamente ligado al parque vehicular, que crece sostenidamente en el tiempo, sino con la demanda real de transporte, ya sea de carga o de pasajeros. Al asumir que el parque vehicular crece y que entonces, todo el parque se mueve y genera emisiones, puede sobreestimar el consumo de combustible y en consecuencia las emisiones, lo cual no necesariamente ocurre al incorporar variables como tasa de ocupación por tipo vehicular en un modelo basado en la demanda de pasajeros, por ejemplo.

---

<sup>45</sup> <sup>45</sup> La RX es considerada como la RX y la RXIV para este estudio.

## 7.2 Conclusiones Específicas

Las conclusiones específicas del estudio se indican a continuación:

- Los resultados de CO<sub>2e</sub> para la el escenario Línea Base 2007 o de crecimiento sin restricción (CSR) obtenidos para el sector transporte indican que en el escenario *PIB de Referencia* las emisiones totales del sector alcanzarían al año 2030 y 2050 un total de 36.9 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> y 61,2 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, respectivamente. Las cifras anteriores equivalen a un aumento de 89% y 2,1 veces respecto a las emisiones de CO<sub>2e</sub> en el año 2007.
- Los resultados del sector transporte para los distintos escenarios de PIB analizados en el presente estudio se indican a continuación (estos resultados suponen que la participación modal de transporte de pasajeros se mantiene constante):

Tabla 7.1 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.529.758	27.269.431	36.853.807	61.170.614
PIB Medio Alto	19.620.083	30.591.062	46.400.147	74.205.053
PIB Medio Bajo	19.620.083	27.619.831	37.460.169	62.295.654
PIB Optimista	19.620.083	34.210.456	59.268.260	84.369.468
PIB Pesimista	19.620.083	25.142.225	31.042.442	44.479.784

- En términos de participación de las emisiones por modo, el modo caminero es el mayor responsable en las emisiones de CO<sub>2e</sub> nacional del sector, para todos los escenarios de PIB y para todos los años del período proyectado (2007-2050). Para el caso *PIB de Referencia*, en los años 2030 y 2050 el modo caminero es responsable del 83% y 81% de las emisiones del sector, respectivamente.
- El modo aéreo resultó ser el segundo con mayor participación en las emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte. Para el caso *PIB de Referencia* en los años 2030 y 2050, el modo aéreo es responsable del 14% y 13% de las emisiones del sector, respectivamente.

- Los resultados del sector transporte desagregados por modo y para los distintos escenarios de PIB analizados en el presente estudio se indican a continuación:

Tabla 7.2 Resultados desagregados por modo para emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenarios de PIB

Escenario	Modo	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Aéreo	1.144.558	2.516.315	5.111.571	8.256.681
	Marítimo	427.423	723.017	1.118.005	2.952.923
	Ferroviario	52.459	70.240	87.919	137.747
	Caminero	17.905.319	23.959.858	30.536.312	49.823.262
	<b>Total</b>	<b>19.529.758</b>	<b>27.269.431</b>	<b>36.853.807</b>	<b>61.170.614</b>
PIB Medio Alto	Aéreo	1.171.745	3.696.817	9.296.300	15.014.023
	Marítimo	428.747	843.336	1.474.412	3.684.105
	Ferroviario	52.659	75.833	100.265	148.854
	Caminero	17.966.932	25.975.075	35.529.171	55.358.070
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>30.591.062</b>	<b>46.400.147</b>	<b>74.205.053</b>
PIB Medio Bajo	Aéreo	1.171.745	2.572.384	5.312.153	8.580.810
	Marítimo	428.747	742.578	1.146.114	3.027.094
	Ferroviario	52.659	71.009	88.882	139.256
	Caminero	17.966.932	24.233.860	30.913.020	50.548.494
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>27.619.831</b>	<b>37.460.169</b>	<b>62.295.654</b>
PIB Optimista	Aéreo	1.171.745	5.294.528	16.182.511	26.136.757
	Marítimo	428.747	956.611	1.892.226	3.591.262
	Ferroviario	52.659	80.935	112.977	147.146
	Caminero	17.966.932	27.878.381	41.080.546	54.494.303
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>34.210.456</b>	<b>59.268.260</b>	<b>84.369.468</b>
PIB Pesimista	Aéreo	1.171.745	1.783.701	3.019.137	4.875.650
	Marítimo	428.747	653.055	888.750	1.824.600
	Ferroviario	52.659	66.449	78.699	110.391
	Caminero	17.966.932	22.639.020	27.055.855	37.669.143
	<b>Total</b>	<b>19.620.083</b>	<b>25.142.225</b>	<b>31.042.442</b>	<b>44.479.784</b>

- En relación a las emisiones asociadas al transporte de pasajero terrestre nacional, se identificaron cuatro regiones donde se concentra más del 65% de las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> para este subsector: RV, RM, RVIII y RX. El promedio de participación para los cortes temporales 2007, 2020, 2030 y 2050 fue, en orden descendente para el *PIB de Referencia*, 27,1% para la RM, 21,5% para la RX y 9,6% para la RV y RVIII. Es importante señalar que la RX fue considerada según la antigua regionalización debido a la información histórica disponible, por lo que al desagregarla, su participación debiese disminuir en términos relativos.

- En términos generales, las emisiones de CO<sub>2e</sub> del transporte de pasajeros terrestre se generan principalmente por el uso de vehículo particular y buses, los cuales son responsables de más del 90% de las emisiones regionales en cada caso. La tabla a continuación indica los resultados desagregados por categoría de transporte de pasajero para las cuatro regiones principales identificadas previamente, en el escenario *PIB Medio Alto*:

Tabla 7.3 Emisiones desagregadas por categorías de transporte de pasajeros terrestre para las cuatro regiones con mayor participación, *PIB Medio Alto*

Región	Categoría	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
R5	Veh. Particular	1.010.842	1.366.186	1.710.671	2.194.726
	Taxi	90.952	107.236	121.532	127.750
	Bus	412.196	484.928	549.919	578.379
	Tren Urbano <sup>46</sup>	26.657	35.883	44.999	57.823
	<b>Total</b>	1.540.648	1.994.232	2.427.122	2.958.677
RM	Veh. Particular	3.504.028	4.304.396	5.038.941	5.857.305
	Taxi	281.953	305.495	323.689	308.277
	Bus	804.914	875.556	928.272	884.573
	Tren Urbano	92.929	114.288	133.996	156.001
	<b>Total</b>	4.683.823	5.599.735	6.424.898	7.206.156
R8	Veh. Particular	848.923	1.225.743	1.621.879	2.341.290
	Taxi	56.121	71.139	85.197	100.766
	Bus	582.667	740.428	887.291	1.050.032
	<b>Total</b>	1.487.711	2.037.310	2.594.367	3.492.088
R10	Veh. Particular	609.638	1.314.755	2.427.208	5.624.082
	Taxi	56.594	107.019	180.694	350.992
	Bus	1.360.769	2.600.747	4.393.863	8.539.736
	<b>Total</b>	2.027.001	4.022.522	7.001.765	14.514.809

- Se realizaron sensibilidades a los modelos de emisión desarrollados en el presente estudio para el escenario *PIB Medio Alto* para determinar el efecto en la estimación de emisiones total de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte.
- Para el modelo de transporte de carga terrestre, se analizaron 3 situaciones:
  - El efecto de cambio modal de TKM o demanda desde la categoría camión interurbano al modo ferroviario
  - El efecto de traspaso de TKM o demanda de carga entre las categorías camión interurbano a urbano.
  - Efecto de cambios en las magnitudes de las tasas de carga ferroviaria y de camiones

<sup>46</sup> Emisiones de carácter informativo. Las emisiones indirectas producidas por consumo eléctrico en el transporte deben ser consideradas en el sector generación.

- Para el modelo de transporte de pasajeros terrestre, se analizaron 2 situaciones aplicadas a las cuatro regiones con mayor participación en las emisiones de este subsector: RV, RM, RVIII y RX:
  - El efecto de cambio modal de PKM o demanda desde la categoría bus a vehículo particular
  - Efecto de cambios en las magnitudes de las tasas de ocupación para la categoría vehículo particular
- Adicionalmente, se hizo un análisis de sensibilidad empleando una nueva serie de partición modal para transporte de pasajeros para todo el país.
- Finalmente, se realizó un análisis para ver combinaciones de los casos de revisados anteriormente y así ver su efecto en el total de emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte.
- Los principales resultados del análisis de sensibilidad se indican a continuación:
  - **Transporte de Carga.** En relación a los parámetros que fueron modificados en un 1% y 10% según lo descrito en la Tabla 6.19, se observó que el parámetro que más efecto tiene en las emisiones totales del sector transporte es el caso de cambio modal entre ferroviario y camiones. Luego, un error de un 1% y 10% en la asignación de TKM entre el modo ferroviario y camiones implica una diferencia de 0,14% y 1,44% en las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> del sector transporte hacia el 2030, respectivamente. El parámetro menos sensible en este mismo análisis fue la tasa de carga ferroviaria, que incluso variando un 10% su valor, el efecto en las emisiones totales del sector sigue siendo irrelevante (0,02% al 2030). Para el caso donde la variación de tasa de carga para camiones se basa en números menos conservadores que los empleados en el modelo (definidos en el Anexo B), se observa un mayor efecto en las emisiones totales del sector transporte, reduciéndose hacia el año 2030 en un 5,8% respecto al caso base o CSR.
  - **Transporte de Pasajeros.** En relación a los parámetros que fueron modificados en un 1% y 10% según lo descrito en la Tabla 6.21, se observó que aquel que más efecto tiene en las emisiones totales del sector transporte es el caso de cambio modal entre buses y vehículo particular. Luego, un error de un 1% y 10% en la asignación de PKM entre la categoría bus y vehículo particular implica una diferencia de 0,38% y 3,82% en las emisiones totales de CO<sub>2e</sub> del sector transporte hacia el 2030, respectivamente. El parámetro menos sensible en este mismo análisis fue la tasa de ocupación para vehículo particular, variando un 10% su valor, el efecto en las emisiones totales del sector 2% al 2030. Hay que recordar que estos análisis se hicieron modificando solo en las regiones RV, RM, RVIII y RX. Para el caso A.3, en donde la variación de la partición modal de todas las regiones en base a la tendencia histórica (Anexo K), se ve que hay un efecto de aumento en las emisiones esperable. Esta nueva partición modal, que es más desfavorable que el caso base utilizado en el modelo implica un incremento en las emisiones totales del sector transporte de 14,7% al año 2030 respecto a la situación de CSR.

- En relación al **análisis combinado** de las sensibilidades revisadas anteriormente, se observan variaciones de un -11,8% (menor) y un +14,6% (mayor) que el caso base o de CSR para el total de las emisiones del sector transporte al 2030.
- El caso analizado que combina cambios en partición modal de carga, partición urbana-interurbana y partición modal de pasajeros, implica un impacto en las emisiones entre 0,53% y 5,3% hacia el 2030, para los caso 1% y 10% de variación. Esto caso es el que presente menor impacto global en las emisiones.
- Respecto a la combinación que presenta mayor impacto en las emisiones del sector transporte, se observa un aumento de hasta un 14,6% respecto al caso de CSR producto de una cambio en la partición modal de todo el país (según Anexo K) y variaciones en la partición modal de carga y entre tipo de operación (urbana-interurbana).
- En general, los resultados con mayor variación implican el empleo de una tasa de carga para la categoría camión menos conservadora (Anexo B) y una partición modal de pasajeros más desfavorable (anexo K). El resto de los parámetros por sí solo (Tabla 6.19 y Tabla 6.21) implican un cambio de hasta un 4% de las emisiones totales del sector transporte si es que se tiene una incertidumbre del 10% en las magnitudes consideradas en la evaluación actual de los modelos.
- Del análisis de sensibilidad, el empleo de una nueva serie de partición modal para transporte de pasajero (caso A.3), basada en las tendencias históricas observadas, implicaron un aumento en las emisiones muy superior al caso base. Los resultados de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte bajo esta condición indican que en el escenario *PIB de Referencia* las emisiones totales del sector alcanzarían al año 2030 y 2050 un total de 42,9 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> y 77,4 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub>, respectivamente. Las cifras anteriores equivalen a un aumento de 1,2 y 2,9 veces respecto a las emisiones de CO<sub>2e</sub> en el año 2007.
- Los resultados del sector transporte bajo la condición de partición modal según A.3 se indican a continuación:

Tabla 7.4 Resumen emisiones de CO<sub>2e</sub> para el sector transporte según escenario de PIB, Escenario A.3

Escenario	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
	2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	19.826.562	30.369.327	42.933.217	77.413.936
PIB Medio Alto	19.917.421	33.880.189	53.241.937	91.893.957
PIB Medio Bajo	19.917.421	30.745.737	43.598.079	78.728.017
PIB Optimista	19.917.421	37.674.398	66.931.237	101.835.581
PIB Pesimista	19.917.421	28.115.514	36.573.471	57.493.603

- Los resultados del sector transporte desagregados por modo y para los distintos escenarios de PIB analizados en el presente estudio se indican a continuación, bajo la condición de partición modal según A.3:

Tabla 7.5 Resultados desagregados por modo para emisiones de CO<sub>2e</sub> según escenarios de PIB, Escenario A.3

Escenario	Modo	CO <sub>2e</sub> [ton/año]			
		2007	2020	2030	2050
PIB Referencia	Aéreo	1.144.558	2.516.315	5.111.571	8.256.681
	Marítimo	427.423	723.017	1.118.005	2.952.923
	Ferroviario	52.459	70.240	87.919	137.747
	Caminero	18.202.122	27.059.754	36.615.722	66.066.584
	<b>Total</b>	<b>19.826.562</b>	<b>30.369.327</b>	<b>42.933.217</b>	<b>77.413.936</b>
PIB Medio Alto	Aéreo	1.171.745	3.696.817	9.296.300	15.014.023
	Marítimo	428.747	843.336	1.474.412	3.684.105
	Ferroviario	52.659	75.833	100.265	148.854
	Caminero	18.264.270	29.264.203	42.370.960	73.046.974
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>33.880.189</b>	<b>53.241.937</b>	<b>91.893.957</b>
PIB Medio Bajo	Aéreo	1.171.745	2.572.384	5.312.153	8.580.810
	Marítimo	428.747	742.578	1.146.114	3.027.094
	Ferroviario	52.659	71.009	88.882	139.256
	Caminero	18.264.270	27.359.766	37.050.930	66.980.857
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>30.745.737</b>	<b>43.598.079</b>	<b>78.728.017</b>
PIB Optimista	Aéreo	1.171.745	5.294.528	16.182.511	26.136.757
	Marítimo	428.747	956.611	1.892.226	3.591.262
	Ferroviario	52.659	80.935	112.977	147.146
	Caminero	18.264.270	31.342.324	48.743.523	71.960.416
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>37.674.398</b>	<b>66.931.237</b>	<b>101.835.581</b>
PIB Pesimista	Aéreo	1.171.745	1.783.701	3.019.137	4.875.650
	Marítimo	428.747	653.055	888.750	1.824.600
	Ferroviario	52.659	66.449	78.699	110.391
	Caminero	18.264.270	25.612.309	32.586.885	50.682.962
	<b>Total</b>	<b>19.917.421</b>	<b>28.115.514</b>	<b>36.573.471</b>	<b>57.493.603</b>

### 7.3 Recomendaciones

A continuación se mencionan las principales recomendaciones del estudio que pudiesen ser útiles de analizar en la etapa posterior relacionada al sector transporte, en el marco del proyecto MAPS-Chile.

Los modelos de proyección de las variables de entrada a los modelos de emisiones, tales como demanda de transporte de carga, demanda de transporte de pasajero y consumos energéticos aéreo y marítimo desarrollados en el presente estudio tienen una base

econométrica dependiente del PIB nacional, PIB per cápita (regional o nacional) y PIB mundial. La restricción de incorporar información previa al año 2007 limitó la posibilidad de incluir datos o serie más completas de particiones modal, crecimiento urbano, número de viajes por modo, entre otros. El ajuste de la línea base para una siguiente etapa debiera incluir modelos de proyección que considere series de información que describan a nivel regional las particiones modales en base a variables económicas, de transporte y urbanísticas.

La estimación de las emisiones para los modos aéreo y marítimo deben descontar los consumos asociados por actividades internacionales. Las metodologías que desagregan el consumo de combustible para estos modos en nacional y búnker emplean como fuente inicial de información el Balance Nacional de Energía o BNE (del Ministerio de Energía y acceso público), el cual reporta el consumo global de los modos aéreo y marítimo sin descontar aquel consumo búnker. El estudio “*Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Búnker para Gases de Efecto Invernadero*”(Ministerio de Medioambiente, Enero 2010) descontó las emisiones búnker a partir de las bases de datos del Servicio Nacional de Aduana, dado que la compra de combustible para uso internacional es declarada por las distintas compañías que realizan este tipo de operación para recuperar impuestos. Esta información de Aduanas no es pública y tampoco es de fácil acceso, lo cual representa una barrera para una posible actualización de consumos internacionales post 2008<sup>47</sup>.

Para mejorar resultados de emisiones asociados a los distintos modos de transporte y a las categorías en que se dividen algunos modos, es relevante comenzar a generar información a nivel regional de manera periódica y sistemática por parte de las autoridades de Transporte y Energía, de tal forma de describir las tendencias en la elección de viajes en el transporte de pasajero y en el transporte de carga observadas año a año. Los modelos desarrollados en el presente estudio consideraron una serie de parámetros fijos entre los que destacan: partición modal de pasajeros, partición modal de carga, tasa de ocupación vehicular, tasas de carga, entre otros; esto debido a que la información existente es escasa o desactualizada.

Finalmente, en relación a variables que se debieran tomar en cuenta para futuros análisis de la interrelación entre sector transporte y el uso de suelo, existen diferentes estudios que analizan la relación entre el sector transporte y el uso del suelo. Uno de esos documentos es el *Handbook 5 del Handbook in Transport, Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, 2004, 127-146*. El estudio analiza 20 modelos que se consideran integrados, debido a que incluyen distintos usos urbanos como residencial, industrial y comercial. En estos modelos, el transporte está a veces incluido o a veces viene de un modelo de transporte aparte.

En la siguiente tabla se muestran diferentes variables que debieran estar incluidas en este tipo de modelos y que modelos se hacen cargo de dichas variables. Cabe destacar que dentro de este análisis se encuentra el modelo MUSSA<sup>48</sup> desarrollado por la Universidad de Chile y que se utiliza en Chile (Tabla esta en idioma original).

---

<sup>47</sup> Se tiene como antecedente que ediciones del BNE más recientes intentaron acceder a dicha información para poder desagregar consumos sin lograr concretar esto por parte de Aduanas en un tiempo razonable.

<sup>48</sup> Estudio “Análisis Políticas de Usos de Suelo”, Mideplan, 2003

Las variables consideradas son las siguientes y se separan por la velocidad de cambio (*Speed of Change*):

- Muy Lento: Red Vial y Uso de Suelo
- Lento: Lugares de Trabajo y Vivienda
- Rápido: Empleo y Población
- Inmediato: Carga y Viajes

En el caso del modelo MUSSA se observa que la Red Vial y los viajes se obtienen de un modelo de Transportes, en el caso de Santiago ese modelo es ESTRAUS<sup>49</sup>.

En el documento se sugiere que la evolución de este tipo de modelos considera los aspectos que se muestran en la siguiente tabla (tabla en idioma original).

Models	Speed of change							
	Very slow		Slow		Fast		Immediate	
	Networks	Land use	Work-places	Housing	Employment	Population	Goods transport	Travel
BOYCE	+				+	+		+
CUFM	(+)	+	+	+	+	+		(+)
DELTA	(+)	+	+	+	+	+		(+)
ILUTE	+	+	+	+	+	+	+	+
IMREL	+	+	+	+	+	+		+
IRPUD	+	+	+	+	+	+		+
ITLUP	+	+			+	+		+
KIM	+				+	+	+	+
LILT	+	+	+	+	+	+		+
MEPLAN	+	+	+	+	+	+	+	+
METROSIM	+	+	+	+	+	+		+
MUSSA	(+)			+	+	+		(+)
PECAS	+	+	+	+	+	+	+	+
POLIS	(+)	+			+	+		(+)
RURBAN	(+)	+			+	+		(+)
STASA	+	+	+	+	+	+	+	+
TLUMIP	+	+	+	+	+	+	+	+
TRANUS	+	+	+	+	+	+	+	+
TRESIS	+	+	+	+	+	+		+
URBANSIM	(+)	+	+	+	+	+		(+)

(+) provided by linked transport model

<sup>49</sup> ESTRAUS: A computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes, Joaquín de Cea Ch., et al TRB 2003.

Transport model		T1	T2	T3	T4
Land-use model		No public transport, no modal split	Public transport, no logit, 24 h	Public transport, logit, peak hour	Multimodal, activity-based
L1	None				
L2	Activity and judgement				
L3	No market-based land allocation				
L4	Logit allocation with price signals				
L5	Market-based land-use model				
L6	Activity-based land-use model				

Donde la evolución de la modelación debe partir de L1 a L6 y de T1 a T4, siendo estas variables las siguientes:

- L1: No hay modelo de Uso de Suelo.
- L2: Las actividades están asignadas por juicio profesional.
- L3: Modelo de asignación no basado en el mercado.
- L4: Modelo de asignación con señales de precio.
- L5: Modelo basado en el mercado totalmente integrado.
- L6: Modelación de Actividad y Uso de Suelo usando micro simulación.

En el caso de las columnas, T1 a T4 representa los niveles de modelación de demanda.

- T1: Sólo las calles y los viajes en vehículos livianos es modelado.
- T2: Se modela el transporte público con una elección modal simplificada (non-logit).
- T3: Modelación de la partición modal (Logit-based).
- T4: Actividad de viajes modelada por micro simulación.

En resumen, para simular la interacción entre Uso de Suelo, ordenamiento territorial y Transporte se debe trabajar con modelos de transporte y de Uso de suelo simultáneamente, considerando que la micro simulación es el objetivo final. Sin embargo, se debe tener en

cuenta que este tipo de aproximación es válida para ciudades o centros urbanos y no necesariamente útil cuando lo que se pretende analizar es el resultado a nivel país.

## 8 Bibliografía

### 8.1 Bibliografía Internacional

Department of Energy and Climate Change, United Kingdom. *2050 Pathways Analysis (2010)*. Documentos disponibles en:  
<http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/tackling/2050/2050.aspx>

South African National Energy Development Institute (SOC) Ltd. *Quantifying the energy needs of the transport sector for South Africa (2012)*

Department of Environment Affairs and Tourism South Africa. *A Modelling Input into the Long Term Mitigation Scenarios Process (2009)*

International Energy Agency. *World Energy Models (WEM), Methodology and Assumptions*. 2010.

Department on Climate Change and Efficiency, Australia. *Australia's emissions projections 2010*. Technical papers for each sectoral projection. Diciembre 2010. Documentos disponibles en:

<http://www.climatechange.gov.au/publications/projections/australias-emissions-projections.aspx>

IEA 2006, International Energy Agency, *World Energy Outlook 2006*, Capítulo 9, 231-232.

Joyce Dargay, Dermot Gately and Martin Sommer. *Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030*. Energy Journal, 2007, Vol. 28, No. 4.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory*

EMEP/CORINAIR *Emission Inventory Guidebook*, 2007, Transport Sector

Pindyck, R, Rubinfeld, D. (1991) *Econometrics models and economic forecast*. McGraw-Hill, 3ª edición.

Dahl, C. and Sterner, T. (1991) *Analysing gasoline demand elasticities: a survey*. *Energy Economics*, 13, 203-210.

Banaszak, S., Chakravorty, U. and Leung, P. S. (1999) *Demand for ground transportation fuel and pricing policy in Asian Tigers: A comparative study of Korea and Taiwan*, *The Energy Journal*, 20(2), 145-166.

Eltony, M. N. and Al-Mutairi, N. H. (1995) *Demand for gasoline in Kuwait: An empirical analysis using cointegration techniques*, *Energy Economics*, 17(3), 249-253.

Ramanathan, R. (1999) *Short- and long-run elasticities of gasoline demand in India: An empirical analysis using cointegration techniques*, *Energy Economics*, 21(4), 321-330.

Johnson, D., Fowkes, A. S., Whiteing, A. E., Maurer, H.H. and Shen, S. (2008). *Emissions modelling with a simple transport model*, refereed paper presented at the European Transport Conference, Leiden, the Netherlands, Octubre 6-8, 2008.

Schäfer, A. (2006) *Long-Term Trends in Global Passenger Mobility, The Bridge, Linking Engineering and society*, Andreas Schäfer 2006.

Cosgrove, D. (2011) *Long-term patterns of Australian public transport use*, David C. Cosgrove 2011.

Cosgrove, D. and Gargett, D. (2007), *Long-Term Trends In Modal Share For Urban Passenger Travel*, Paper presented to the Thredbo 10 International Conference on Competition and Ownership in Land Passenger Transport.

HAO jia, LI Lan, (2004), *The Study of Comprehensive Forecast Model for Railway Freight Transport* Volume, Baijing 2004 School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, China, 2004.

Ajanoovic, A., Dahl, C., Schipper, L. (2012), *Modelling transport demand and policies – An introduction*, *Energy Policy (41)*, ELSEVIER,1-3.

Sterner, T. (2006), *Survey of Transport Fuel Demand Elasticities*, Thomas Sterner, University of Gothenburg.

Lin, C. and Pince, L. (2010), *Gasoline price volatility and the elasticity of demand for gasoline*, Cynthia Lin and Lea Prince, Department of Agricultural and Resource Economics University of California

Base de datos estadísticos de IEA

[http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY\\_CODE=US](http://www.iea.org/stats/balancetable.asp?COUNTRY_CODE=US)

*Handbook 5 del Hanbook in Transport*, Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, 2004, 127-146

## 8.2 Bibliografía Nacional

Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA). *Implementación del Modelo LEAP*. Enero 2011.

POCH Ambiental. *Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía años 2000-2025*. Julio 2009.

Sistemas Sustentables. *Análisis y Desarrollo de una Metodología de Estimación de Consumos Energéticos y Emisiones para el Transporte*. Junio 2010.

Sistemas Sustentables. *Desarrollo y Aplicación de una Metodología Local de Cálculo de Emisiones Bunker para Gases de Efecto Invernadero*. Enero 2010.

Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA). *Proyección de la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energía años 2000-2025*. Julio 2009.

Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA). *Diseño de un Modelo de Proyección de Demanda Energética Global Nacional de Largo Plazo*. Junio 2008.

Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA). *“Análisis de aspectos críticos en la proyección de demanda energética global”*, CNE, 2010

Secretaría de Planificación de Transporte SECTRA. *Sistema de Información de Transporte Accesible por Internet (SINTIA)*

*Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ministerio de Medioambiente, 2011

J. E. Doña. *Evaluación Costo – Beneficio de la restricción al transporte de carga en el Anillo Américo Vespucio*. Cámara Chilena de la Construcción, año 2003.

LIBRA Ingenieros Consultores. *Análisis implementación programa de asesorías de transporte terrestre, VI etapa: OT 9. Plan de Transporte Interurbano, PTI. Análisis de eficiencia energética en el transporte de carga*. Sectra, año 2005.

Ingeniería DICTUC. *Análisis de Regulaciones sobre el Transporte de Carga Urbano y su Impacto en la Cadena Logística*. Subsecretaría de Transporte, año 2009.

Universidad de Chile. *Determinación de Factores de Emisión para Vehículos Pesados en la Región Metropolitana<sup>1</sup>*, CONAMA RM 2004.

Steer David. *“Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana”* (2011)

Cipres Ingeniería Ltda. *“Análisis económicos del transporte de carga nacional”* (2009)

Midepal, *“Análisis Políticas de Usos de Suelo”*, (2003)

Joaquín de Cea Ch., et al, *“ESTRAUS: A computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes”*, TRB 2003.

INE, *“Transporte por Carretera, Informe Anual”*, 2007