



**Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente
CENMA - Universidad de Chile**



INFORME FINAL

**"ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO
ECONÓMICO Y SOCIAL DEL PLAN DE
DESCONTAMINACION ATMOSFERICA
DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS"**

**PREPARADO POR
CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE
PARA
CONAMA IX Región**

Marzo 2007

Contenidos

RESUMEN EJECUTIVO	2
1. Introducción	9
2. Antecedentes Preliminares del PDA	10
3. Metodología	14
4. Estimación de los Impactos del PDA	41
5. Análisis de las Medidas del PDA	44
6. Evaluación de Escenarios del PDA	70
7. Evaluación del Impacto Social del PDA	80
Referencias	87
Anexo 1. Metodologías de Evaluación de Beneficios	89

RESUMEN EJECUTIVO

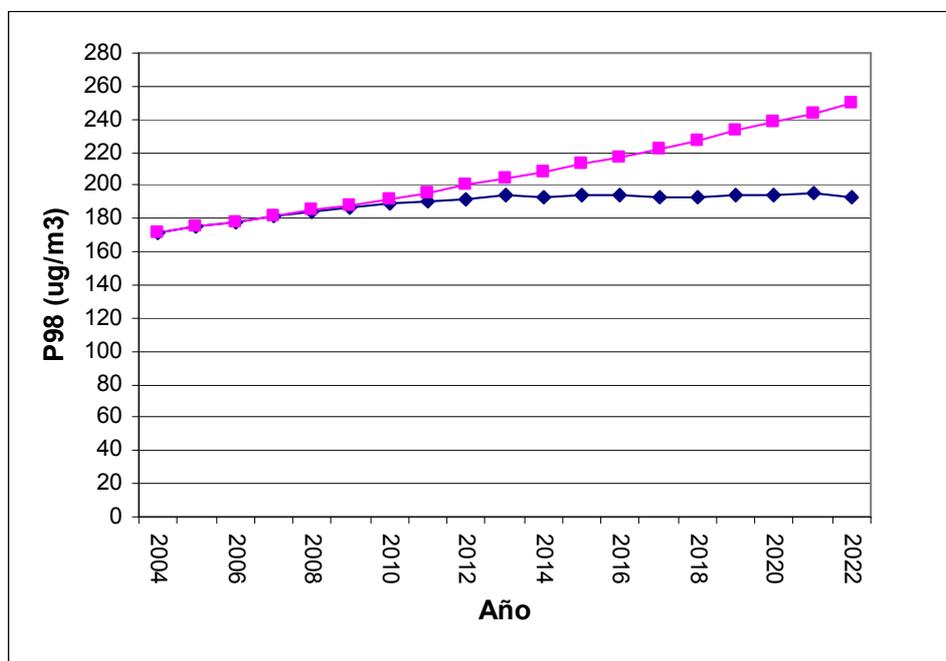
Análisis General del Impacto Económico y Social del Plan de Descontaminación del Aire de Temuco y Padre Las Casas

CONAMA IX Región ha elaborado una propuesta del Plan de Descontaminación del Aire (PDA) para la zona de Temuco y Padre Las Casas. El PDA es un instrumento de gestión ambiental que consiste de una serie de medidas que directa e indirectamente buscan reducir los niveles de contaminación por MP10 para así lograr el cumplimiento de la norma diaria de calidad del aire (percentil 98).

Por otro lado, el Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES) es una herramienta de evaluación que identifica y valora los impactos sobre la población, emisores y el Estado de las medidas del PDA.

- La evaluación considera supuestos conservadores a juicio del consultor, dada la incertidumbre existente respecto a una serie de variables que influyen en las emisiones de MP10 en Temuco y Padre Las Casas.
- Se considera el modelo de estimación de emisiones residenciales desarrollado por Sanhueza et al. (2005), modificado por las tasas de recambio de cocinas. Sobre la base de este modelo se realizan las proyecciones futuras de emisiones residenciales considerando el crecimiento de la población y los cambios en la composición socio-económica en el área de Temuco y Padre Las Casas.
- En relación a los otros sectores, se realizan un análisis ad-hoc de cada sector (industria, fuentes móviles, quemas, incendios) para visualizar las posibilidades de proyección de las emisiones en el tiempo.
- Para evaluar la proyección de las concentraciones para el percentil 98 se desarrolla un modelo emisión-concentración del tipo roll-back, el cual también permite evaluar el cumplimiento del valor de percentil 98. El modelo asume un día típico de invierno, distribuyendo los aportes de cada tipo de fuentes conforme al nivel de actividad en dicho período.
- El escenario base sin PDA asume que se ha implementado la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña según la propuesta gradual de Eugenio Collados. Este supuesto es muy importante, ya que evita un aumento continuo de las concentraciones diarias de MP10 durante el período de análisis. Lo anterior puede observarse en la siguiente figura:

**Figura N° R.1. Escenario base (sin PDA) para el percentil 98
(con y sin norma de emisión para artefactos de combustión residencial)**



Nota: Línea superior corresponde a escenario base sin norma de emisión
Línea inferior corresponde a escenario base con norma de emisión

- De la figura anterior se observa que la implementación de una norma de misión para artefactos de combustión residencial a leña si bien no forma parte del PDA tendría una influencia muy importante sobre las posibilidades de cumplimiento de este. Por ello, se considera que dicha norma de emisión es un elemento crucial en aliviar la tendencia hacia el incremento de valor del percentil 98 en el tiempo.
- Las medidas evaluadas en el PDA corresponden a las siguientes:
 - Programa de arborización urbana.
 - Prohibición de las quemas agrícolas durante el período del 1 de abril al 31 de septiembre.
 - Norma de emisión para fuentes estacionarias: calderas industriales y puntuales.
 - Prohibición de la comercialización de leña húmeda.
 - Prohibición del funcionamiento de chimeneas de hogar abierto.
 - Sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios.
 - Programa de subsidios para el aislamiento térmico de viviendas sociales priorizadas (10.00 subsidios en el plazo de 10 años).
 - Programa de recambio de artefactos antiguos de calefacción (alrededor de 12.500 subsidios en el plazo de 10 años).
- Los beneficios cuantificables que han sido identificados corresponden a reducción en número de casos de mortalidad y morbilidad producto de la contaminación del aire por MP10, mejoras en la visibilidad y un menor consumo de energía (leña). En adición, existen otros impactos no cuantificados: reducción en el riesgo de incendios producto de mala combustión.

- Los efectos en salud son estimados utilizando la función de daño para el año base 2004, considerando relaciones dosis-respuesta de la literatura y una valoración que considera tanto la pérdida de productividad, el costo de tratamiento, así como la desutilidad asociada a enfermedades y mortalidad.
- Para el caso del daño en visibilidad producto de la contaminación del aire por MP10 se utiliza una transferencia de los beneficios estimados para la Región Metropolitana para el PPDA. Dicha transferencia considera diferencias en población, ingresos per-cápita y niveles de contaminación para su corrección.
- Se estima que el daño en salud alcanza a US\$ 9.287 por ug/m3 MP10 promedio anual, mientras que el beneficio en visibilidad llegaría a US\$ 450 por ug/m3 MP10 promedio anual.
- La evaluación de costos sociales considera anualizar los costos de inversión para un período de 20 años en el caso de los artefactos de combustión residencial a leña, considerando para todas las evaluaciones una tasa social de descuento del 10%.
- Se identifican costos que son privados y otros que son públicos. Los costos privados están asociados a las medidas: (i) norma de emisión de fuentes estacionarias; (ii) prohibición de uso de leña húmeda; (iii) prohibición del funcionamiento de chimeneas; y (iv) el sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios. Los costos públicos consideran todas las medidas indirectas de fiscalización, monitoreo, educación y participación ciudadana, así como las medidas directas que reducen emisiones, tales como el programa de arborización urbana, el subsidio al aislamiento térmico de viviendas sociales y el programa de recambio de artefactos de calefacción a leña.
- Se realizó una evaluación para cada una de las medidas señaladas anteriormente en términos de:
 - Valor presente de la reducción de emisiones asociadas a cada medida por período.
 - Valor presente de los beneficios = corresponden a beneficios en salud, visibilidad y ahorro de energía cuando corresponda durante el período.
 - Valor presente del impacto en concentración anual de MP10 (reducción de concentraciones de MP10 anual) durante un período
 - Valor presente de los costos sociales = corresponden a los costos en medidas de cumplimiento, los cuales están anualizados para hacerlos comparables con los beneficios en el período de análisis, 2008-2022.
 - Valor presente de los costos privados = corresponden a los costos efectivos en inversión que deben incurrir los agentes durante el período 2008-2022.
 - Indicadores de costos efectividad:
 - Costo de reducción por tonelada de MP10
 - Costo de reducción por ug/m3 de MP10
 - Indicador de eficiencia = razón beneficio/costo
- Se utiliza el valor presente en todos los indicadores, ya que esta medida permite incorporar el hecho que reducciones en emisión y/o concentración son más valoradas mientras más pronto ocurran en el tiempo. Del mismo modo, ello permite calcular las medidas de costos-efectividad promedio durante el período 2008-2022 de manera más simple si contamos con el valor presente de los costos, estos últimos también estimados en la tabla siguiente.
- Los resultados de indicadores son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla N° R.1. Resumen de Indicadores por Medida (Valor Presente, período 2008-2002)

Medida	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m ³ MP10 promedio anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m ³)	B/C
Programa de Arborización Urbana	5	52.579	0	71.188	222.222	13.183	1.007.497	0,7
Norma de Emisión Fuentes Estacionarias	288	2.802.830	4	2.849.973	2.849.973	9.901	756.654	1
Prohibición Quemadas Agrícolas	162	1.579.836	2	0	0	0	0	N.D
Prohibición Leña Húmeda	4.069	39.622.063	53	6.719.875	6.719.875	1.651	126.205	6
Prohibición Chimeneas	414	4.205.590	5	371.130	415.410	896	68.472	11
Compensación de emisiones	1.226	14.535.897	16	2.622.732	3.363.953	2.140	163.527	6
Programa de Aislación Térmica	718	11.131.973	9	9.657.115	11.373.594	13.446	1.027.605	1
Programa de recambio de artefactos	1.613	18.230.164	21	2.649.477	3.910.150	1.642	125.527	7

Nota: Columnas 2 a 5 corresponden a valores presentes descontados con una tasa del 10% para el período 2008-2022.

Fuente: Elaboración propia.

- De la tabla anterior se desprende que a excepción de la arborización urbana, todas las medidas son eficientes (razón beneficio/costo > 1).
- Las medidas asociadas al sector de combustión residencial a leña son las que presentan un mayor potencial de reducción de emisiones. Estas medidas deberían ser consideradas como indispensables para el cumplimiento de las metas del PDA, como veremos más adelante.
- Respecto al cumplimiento de las metas de calidad del aire, la siguiente figura muestra la simulación del efecto conjunto de las medidas directas del PDA conforme al modelo roll-back desarrollado, considerando como escenario base (sin PDA) aquel donde ya e ha implementado la norma de emisión de artefactos de combustión residencial a leña:

**Tabla N° R.2. Evolución del Concentraciones y Aporte Sectoriales Percentil 98, PDA
(cifras en ug/m³)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	162,4	4,3	0,1	0,0	168
2009	0,9	149,6	4,3	0,1	0,0	155
2010	0,9	137,3	4,3	0,1	0,0	143
2011	0,9	132,8	3,8	0,1	0,0	138
2012	0,9	130,2	3,8	0,1	0,0	135
2013	0,9	127,5	3,8	0,1	0,0	132
2014	0,9	122,4	3,8	0,1	0,0	127
2015	0,9	119,8	3,8	0,1	0,0	125
2016	0,9	115,5	3,7	0,1	0,0	120
2017	0,9	111,4	3,7	0,1	0,0	116
2018	0,9	109,2	3,7	0,1	0,0	114
2019	0,9	109,3	3,7	0,1	0,0	114
2020	0,9	109,3	3,7	0,0	0,0	114
2021	0,9	109,4	3,7	0,0	0,0	114
2022	0,9	106,4	3,7	0,0	0,0	111

Fuente: Elaboración propia.

- El modelo estima un cumplimiento de la norma diaria de MP10 para el año 2016.
- Respecto a la modelación del cumplimiento, deben considerarse ciertos aspectos críticos que condicionan los resultados estimados:
 - Se considera que cocinas existentes pueden dejar de cumplir la función de uso para cocinar pero mantener la función de calefacción, en especial para hogares de estrato socioeconómico bajo. Ello afectaría la trayectoria del escenario base y el cumplimiento en el escenario con PDA. En el modelo de emisiones se han considerado tasas de recambio en la calefacción menores para el estrato socioeconómico bajo, consistente con este hecho estilizado.
 - La medida de compensación de emisiones para nuevos proyectos inmobiliarios supone que todos los conjuntos habitacionales de estratos alto y medio donde se utiliza leña como calefacción compensan emisiones de forma efectiva. Se ha supuesto que el mecanismo de compensación corresponde al recambio de un artefacto de combustión existente y que no cumple la norma de emisión por un artefacto de calefacción que cumpla la norma de emisión. Bajo dicho escenario, la compensación será efectiva si y sólo si ella no permite el aumento de las emisiones por nuevos proyectos en el tiempo. Ello asume que los artefactos existentes no hubieran sido recambiados voluntariamente por los hogares existentes. Si lo anterior no ocurriera, entonces la compensación sólo implicaría un adelantamiento o consumación de algo que hubiera ocurrido naturalmente, y no sería efectiva.
 - Lo anterior también corre para el caso del programa de recambio por parte del Estado, dado que si se implementa un recambio en un hogar que igualmente

hubiera renovado su artefacto de combustión sin programa de recambio, entonces el recambio no generaría una reducción de emisiones.

- Los dos puntos anteriores ponen de manifiesto la necesidad de un diseño de instrumentos económicos que considere los problemas de asimetría de información (selección adversa) existentes en una implementación efectiva de compensación de emisiones o programas de recambio.
 - Finalmente cabe hacer notar que las medidas de compensación de emisiones, programa de subsidios al aislamiento térmico en viviendas sociales y los subsidios para el recambio de artefactos de calefacción son medidas necesarias para asegurar el cumplimiento de la norma de calidad diaria de MP10.
- Finalmente, se realizó una evaluación consolidada de las medidas del PDA para determinar los beneficios y costos del PDA. Los resultados son mostrados en las Tablas R.3 y R.4. Se puede observar que el PDA de Temuco y Padre Las Casas presenta beneficios que superan largamente a los costos sociales de su implementación. El beneficio social neto del PDA alcanza a US\$ 59,9 millones en valor presente para el período 2008-2022. Los beneficios vienen principalmente dados por reducción de casos de morbilidad y mortalidad en salud con cerca del 87% del total de beneficios.
 - Respecto a la distribución de beneficios y costos, la mayor parte de los beneficios son asignados a la población afectada, aún cuando también se perciben beneficios producto del PDA para los emisores. Estos últimos corresponden a ahorro en costos de energía productos del uso de artefactos de calefacción más eficientes energéticamente. Respecto a los costos, un 63% de ellos son asumidos por el Estado, mientras que el sector privado asume el 37% restante. De los costos del Estado, una parte importante corresponde a tareas de fiscalización, monitoreo, educación, etc. (US\$ 6,2 millones o el 34% del costos del Estado) y el resto corresponde a las medidas de arborización urbana y los programas de subsidio al aislamiento térmico de viviendas sociales y subsidio al recambio de estufas.

**Tabla N° R.3. Distribución de Beneficios y Costos del PDA
Temuco y Padre Las Casas, 2008-2022
(Valor Presente en Millones de US\$, con una tasa de descuento del 10%)**

Sector-Beneficios	Emisores	Estado	Población	Total
Industria y comercio	0,0	0,4	1,3	1,7
Agricultura	0,0	0,4	1,2	1,6
Hogares	7,8	16,4	61,6	85,8
Transporte	0,0	0,0	0,0	0,0
Total Beneficios	7,8	17,1	64,1	89,0
Sector-Costos	Emisores	Estado	Población	Total
Industria y comercio	1,2	1,9	0,0	3,1
Agricultura	0,0	1,1	0,0	1,1
Hogares	9,7	14,7	0,0	24,4
Transporte	0,0	0,5	0,0	0,5
Total Costos	10,9	18,2	0,0	29,1
Beneficio Social Neto	-3,1	-1,1	64,1	59,9

Nota: el redondeo de los valores genera que las sumas no sean exactas

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° R.4. Estimación de Beneficios y Costos del PDA, Período 2008-2022.

Año	Conc. Anual (ug/m3 MP10)	Reducción MP10 (Ton MP/Año)	% Reducción Año Base	BENEFICIOS (Millones de US\$/Año)				COSTOS (Millones de US\$/Año)		BSN (MMUS\$/Año)
				Salud	Visibilidad	Ahorro Energía	Total	Costos Sector Privado	Costos Estado	
2004	50	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2005	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2006	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2007	52	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2008	47	390	3,85%	3,6	0,2	0,1	3,9	0,5	1,3	2,1
2009	44	664	10,59%	6,2	0,3	0,3	6,8	0,9	1,2	4,7
2010	41	932	17,07%	8,7	0,4	0,4	9,5	1,2	1,6	6,7
2011	40	1044	20,19%	9,7	0,5	0,5	10,7	1,4	1,7	7,5
2012	39	1115	21,63%	10,4	0,5	0,8	11,7	1,5	2,1	8,1
2013	38	1186	23,06%	11,0	0,5	1,0	12,5	1,5	2,4	8,6
2014	37	1258	25,76%	11,7	0,6	1,1	13,3	1,6	2,7	9,1
2015	36	1326	27,15%	12,3	0,6	1,2	14,1	1,6	3,0	9,6
2016	35	1400	29,68%	13,0	0,6	1,7	15,3	1,8	3,3	10,2
2017	34	1465	31,87%	13,6	0,7	1,8	16,1	1,9	3,6	10,6
2018	33	1516	33,05%	14,1	0,7	1,9	16,7	1,9	3,8	11,0
2019	33	1523	33,07%	14,1	0,7	2,0	16,8	2,0	3,8	11,0
2020	33	1531	33,08%	14,2	0,7	2,3	17,2	2,0	3,8	11,4
2021	33	1540	33,09%	14,3	0,7	2,4	17,4	2,1	3,8	11,5
2022	33	1551	34,70%	14,4	0,7	2,5	17,6	2,2	3,8	11,6
Valor Presente (tasa de descuento del 10%)				77,4	3,7	7,8	89,0	10,9	18,2	59,9

Fuente: Elaboración propia.

1. Introducción

El presente documento contiene el Análisis General del Impacto Económico y Social del Plan de Descontaminación de Temuco y Padre Las Casas elaborado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) para CONAMA IX Región. En este trabajo han participado el profesor Eugenio Figueroa B. (Ph.D University of Maryland) como coordinador, Enrique Calfucura T. (M.A University of Toronto) como investigador principal y Cristián Retamal (Ing. Pontificia Universidad Católica) como investigador asociado.

El Plan de Descontaminación de Temuco y Padre Las Casas (de ahora en adelante PDA) es un instrumento de gestión ambiental que ha sido propuesto por la Comisión Nacional del Medio Ambiente para el cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire diaria de MP10. Al respecto según el DS N° 35/2005 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, las Comunas de Temuco y Padre Las Casas fueron declaradas zonas saturadas por PM10 en 24 horas debiendo implementarse un Plan de Descontaminación del Aire de acuerdo a lo establecido en la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente.

En relación a lo anterior, el Reglamento de la Ley de Bases del Medio Ambiente exige la elaboración de un análisis general del impacto económico y social de las normas de emisión, calidad y planes de descontaminación que sean propuestas dentro del programa priorizado de planes y normas. Este, especifica que dicho análisis debe poner énfasis en "...evaluar los costos y beneficios para la población, ecosistemas o especies directamente afectadas o protegidas; los costos y beneficios a el o los emisores que deberán cumplir la norma; y los costos y beneficios para el Estado como responsable de la fiscalización del cumplimiento de la norma...".

El presente documento aborda la evaluación de beneficios y costos económicos y sociales producto de la implementación del anteproyecto de PDA de Temuco y Padre Las Casas. Se espera que el PDA de Temuco y Padre Las Casas permita reestablecer la calidad del aire a niveles que permitan el cumplimiento de la norma primaria de calidad del aire para MP10 (norma diaria). En adición, el PDA debe responder a ser un instrumento de gestión ambiental que sea efectivo y eficiente, entendiendo por esto último, la maximización de los beneficios sociales, económicos y medioambientales. Para ello, el AGIES evalúa los efectos del PDA sobre los distintos agentes: población, emisores y Estado, en función de los impactos sobre: el medio ambiente, la salud de las personas; los costos que deban asumir los individuos o empresas; y finalmente los esfuerzos que realice el Estado para descontaminar el área en estudio.

Los beneficios directos del PDA corresponden a: (i) reducción en el número de casos por mortalidad y morbilidad asociados a la contaminación atmosférica por MP10; (ii) mejoras en la visibilidad de las personas que habitan el área afectada, lo cual puede traducirse en un mayor disfrute de amenities ambientales; y (iii) el ahorro de costos asociados a la mantención de fachadas producto que la menor contaminación.

Desde el punto de vista de los costos económicos, esos pueden asociarse a (i) mayores costos de fiscalización y monitoreo por parte del Estado; (ii) costos de abatimiento de sustancias contaminantes para fuentes emisoras existentes, ya sea residenciales, industriales, comerciales, inmobiliarias o vehiculares, entre otras; y (iii) mayores costos por acreditación de emisiones para fuentes emisoras contaminantes.

Por otro lado, respecto a los impactos sociales del PDA, los más importantes tienen relación con el cambio de hábitos y tecnología asociada a la combustión de leña para uso residencial:

- El ordenamiento del mercado de la leña residencial incidiría sobre proveedores y comercializadores informales, los cuales muchas veces están asociados a hogares de bajos ingresos.
- La prohibición del uso de artefactos de combustión a leña que no certifiquen el cumplimiento de la norma de emisión, si la medida es fiscalizable, afectaría fuertemente a los hogares de menores ingresos.
- Un subsidio a sectores de menores ingresos puede ser muy costosa económicamente. La alternativa de subsidiar a sectores de ingreso medio podría, en dichos términos, ser bastante más costo-efectiva.

Por otro lado, la implementación de regulaciones adicionales en otros sectores que emiten puede tener un impacto social relevante:

- Exigencias de compensación de emisiones encarecerían el costo de viviendas sociales y el costo de entrada de la industria al área de Temuco y Padre Las Casas. El mayor costo de la vivienda podría trasladarse a precios, cantidad o calidad; esto es un mayor precio de venta, menor construcción de número de viviendas sociales, ó viviendas sociales de menor tamaño. El mayor costo en el sector industrial podría prevenir la instalación de nuevas calderas industriales en Temuco y Padre Las Casas¹.

2. Antecedentes Preliminares del PDA

2.1 Antecedentes

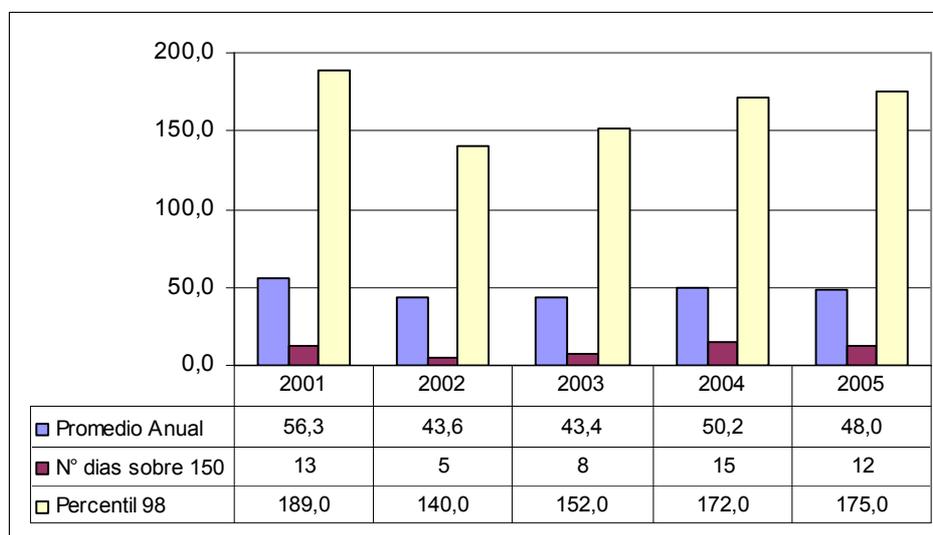
Las comunas de Temuco y Padre Las Casas se ubican a 674 Km. al sur de Santiago, a riberas del río Cautín y en la depresión intermedia de la región, ocupando una superficie de 875,7 km², lo que corresponde al 2,7% del territorio regional. El área urbana definida por ambas comunas se ha constituido en la zona urbana de mayor crecimiento poblacional en la zona sur de Chile, influida fuertemente por la migración rural de la población (INE, 2002).

El crecimiento de la población y los hábitos de consumo de la misma, en conjunto con las condiciones topográficas especiales del área de Temuco y Padre Las Casas, han llevado a un sostenido aumento de las concentraciones de contaminantes en el aire. Al respecto, CONAMA IX Región (2004) ha señalado que la norma primaria de 24 horas para MP10 se encuentra sobrepasada, tanto por el número de días como por el valor del percentil 98 (Figura N°1), cumpliendo de esta forma los requisitos para declarar a la ciudad como zona saturada².

¹ Ello depende de si los costos de compensación son elevados; existan alternativas de localización (de viviendas sociales y actividad industrial) que compitan con el área de influencia del PDA; y las economías de ámbito.

² Además, se encuentra en el nivel de latencia para las concentraciones anuales del periodo 2001-2002 y 2003.

**Figura N° 1. Excedencia de norma primaria de MP10, Temuco
Período 2001-2005**



Fuente: CONAMA IX Región(2006).

De acuerdo a la actualización del inventario 2004 (Sanhueza et al., 2005), la fuente emisora más relevante en Temuco y Padre Las Casas corresponde a la combustión de leña residencial con un 87% del total de las emisiones de MP10³. En consecuencia, el PDA contiene una serie de medidas principalmente orientadas a mejorar aquellos aspectos deficitarios de la combustión de la leña (combustible, artefactos, eficiencia térmica de la vivienda y usuario responsable). En el resto de los sectores emisores, se espera la implementación de esfuerzos que permitan al menos una reducción de las emisiones que sea equitativa respecto al sector residencial, tal como lo señala uno de los principios que establece la Ley de Bases del Medio Ambiente. Finalmente, el PDA establece exigencias de compensación de emisiones para MP10 con el objetivo de prevenir el aumento de las concentraciones de material particulado producto del crecimiento económico y poblacional.

Las Tablas N° 1 y N° 2 muestran las emisiones de MP10 asociadas a los distintos sectores y la combustión residencial, respectivamente.

³ Al año 2004, las emisiones residenciales aportan el 87% del total de emisiones sin considerar las Fugitivas.

Tabla N°1: Resumen Inventario de Emisiones, 2004

Sub Grupo	Categoría	Sub Categoría	Emisiones MP (ton/año)	%
PUNTUALES	Combustión	Edificios	21,01	0,6
	Industria	Procesos, Combustión Externa y Evaporativas	237,9	6,4
	Sub Total Puntuales		258,91	7,0
AREALES	Residencial	Combustión Externa	0,54	0,0
		Combustión Leña	3238,29	86,6
	Otras	Incendios Forestales	82,69	2,2
		Quemas Agrícolas	98,49	2,6
		Cigarrillos	4,63	0,1
Sub Total Areales		3424,64	91,6	
Fuentes Móviles	En Ruta	54,12	1,4	
TOTAL (SIN EMISIONES FUGITIVAS)			3737,67	100,0

Fuente: CENMA (2001) y Sanhueza et al. (2005).

Tabla N°2: Emisión de PM10 por Tipo de Artefacto y Leña

Tipo de Leña	Tipo de artefacto	Emisión (ton/año)	%
Seco	Cocina	314.61	9.7
	Salamandra	27.83	0.9
	Estufa simple	115.98	3.6
	Estufa doble cámara	18.72	0.6
	Chimenea	30.94	1.0
Húmedo	Cocina	1422.94	43.9
	Salamandra	207.68	6.4
	Estufa simple	876.31	27.1
	Estufa doble cámara	94.30	2.9
	Chimenea	128.98	4.0

Fuente: Sanhueza et al. (2005).

En la Tabla N° 1, se observa la preponderancia de las emisiones residenciales dentro del total de emisiones de MP10 en el área de Temuco y Padre Las Casas, siendo por lejos, el principal sector emisor de ambas comunas⁴. Del mismo modo, la combustión de leña en artefactos de cocina y estufas simples representan casi el 84% de las emisiones residenciales.

⁴ La estimación del inventario de emisiones asume la condición típica de funcionamiento, lo cual puede resultar en una subestimación de las emisiones residenciales, ya que en condiciones de mala combustión, los factores de emisión pueden aumentar en un factor de 5 respecto a la condición típica según estimaciones realizadas en Suiza con artefactos nacionales.

2.2 Enfoque del PDA

El problema de contaminación atmosférica en Temuco y Padre Las Casas presenta características particulares que lo diferencian de problemas en la calidad del aire de otros centros urbanos, específicamente la Región Metropolitana.

- El área de Temuco y Padre Las Casas presenta un menor desarrollo industrial, siendo su principal actividad económica la ligada a comercio y servicios.
- El tamaño del parque vehicular es reducido, y si bien el vehículo promedio utilizado es comparativamente más contaminante que uno utilizado en la Región Metropolitana. El efecto escala es lo suficientemente relevante para reducir la importancia de las emisiones vehiculares en comparación con otros sectores.
- Finalmente, debido a las condiciones climatológicas y de oferta de combustibles energéticos, la leña se ha constituido en el principal combustible asociado al sector residencial. Ello ha redundado en que el principal responsable de las emisiones de MP10 en el área de Temuco y Padre Las Casas sea la combustión de leña a nivel residencial⁵.

Los antecedentes antes señalados dan cuenta de los elementos básicos sobre los cuales se basa el PDA: un conjunto de medidas que priorizan el control de las emisiones provenientes de la combustión residencial de leña. Sin embargo, el PDA aborda también otros sectores, teniendo presente las diferencias en la gradualidad en que se aplique las medidas y en la cantidad de recursos que se orienten a su cumplimiento.

El Análisis General del Impacto Económico y Social del PDA de Temuco y Padre Las Casas pone especial atención sobre los impactos económicos y sociales de la implementación de las medidas control de la combustión de leña residencial. En adición a los usuales indicadores de eficiencia (beneficio/costo), costo-efectividad y logro de metas, se señalan aspectos críticos que pueden afectar la factibilidad de cumplimiento del PDA, tales como las necesidades de fiscalización y recursos para sustentar las principales medidas de control de la contaminación, como veremos más adelante.

Para dar cumplimiento a las normas de calidad del aire, el PDA se propone la implementación de medidas de carácter permanente y alto impacto en el sector de combustión de leña residencial. Por otro lado, estas medidas de alto impacto (uso leña seca; programa de subsidios para la aislación térmica de viviendas, programa de subsidios para la reconversión de artefactos de calefacción residencial a leña; sistema de compensación de emisiones para nuevos proyectos, entre otros) deben ser necesariamente acompañadas de algún instrumento económico para su implementación sea efectiva y minimice los impactos sociales negativos producto del PDA.

⁵ Sanhueza et al. (2005) señalan que los estudios realizados en la ciudad de Temuco (inventario de emisiones, diseño de escenarios para apoyar la gestión del aire, modelación de calidad del aire, etc.) han confirmado que la fuente principal de contaminación atmosférica por PM10 es la combustión residencial de leña para cocina y calefacción, siendo en menor medida los aportes de otras fuentes tales como, calefacción de edificios de servicios, industrias, transporte vehicular, quemas agrícolas, e incendios forestales. Un análisis de dichos antecedentes se realiza más adelante.

3) Una estimación de beneficios sociales asociados a las reducciones de emisión generadas por las medidas del PDA: beneficios en salud, beneficios en visibilidad y beneficios en materiales⁶.

4) Un análisis de los impactos sociales sobre una serie de variables socio-económicas, tales como empleo, precios, competitividad y distribución del ingreso.

3.2 Proyección de línea base de emisiones sin PDA

Desde el punto de vista metodológico, la proyección de las emisiones y concentraciones puede realizarse utilizando variables económicas tales como el crecimiento económico regional para cada sector productivo. Se definen proyecciones sobre la base de los diferentes sectores regulados en base a la información existente:

- Sector Residencial
- Sector Industrial
- Sector Fuentes Móviles
- Incendios y Quemados Agrícolas

A continuación se detallan cada uno de los pasos seguidos en la estimación.

(a) Sector Residencial

Se utiliza como base el modelo de estimación de emisiones para combustión residencial del estudio “Diseño de escenarios para apoyar la gestión del aire en Temuco y Padre Las Casas” (Sanhueza et al., 2004). La estructura del modelo es presentado en la siguiente figura:

⁶ En adición, se ha señalado que la utilización de leña húmeda también generaría un impacto negativo sobre la probabilidad de incendios, por lo cual deberían considerarse como beneficio la disminución en el riesgo de pérdida de propiedades por causa de dicho siniestro.

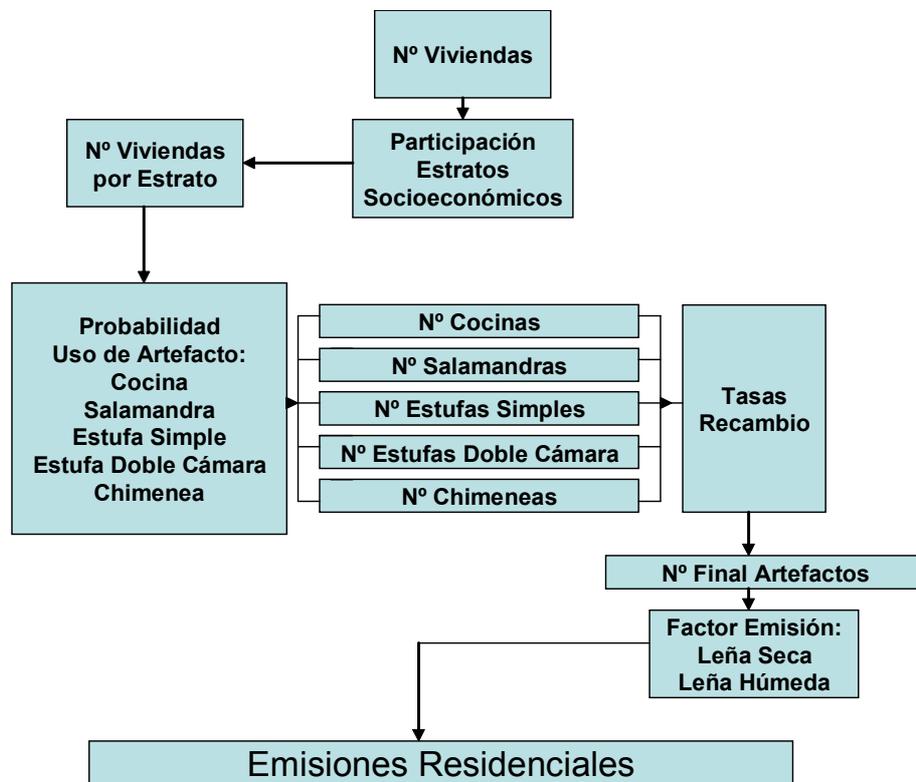


Figura N° 3. Modelo de Estimación de Emisiones

- Inicialmente se realiza una proyección del número de viviendas en el área de Temuco y Padre Las Casas. Esta proyección proviene del estudio “Diseño de escenarios para apoyar la gestión del aire en Temuco y Padre Las Casas” que en función de información de SECTRA, la encuesta VITAE y antecedentes de permisos de edificación evalúa el número de hogares para diferentes estratos socio-económicos en la zona en estudio. La siguiente tabla resume la información al respecto:

Tabla N° 3. Evolución del Número de Viviendas en Temuco y Padre Las Casas

Año	Estrato Alto	Estrato Medio	Estrato Bajo
2004	8.392	24.412	43.485
2005	9.484	25.290	44.258
2006	9.825	27.019	45.031
2007	11.026	27.990	45.802
2008	11.423	29.876	46.571
2009	12.380	30.768	47.791
2010	13.203	32.063	49.038
2011	14.654	34.193	48.848
2012	15.181	35.423	50.604
2013	15.727	36.697	52.424
2014	17.379	39.103	52.137
2015	18.004	40.509	54.012
2016	19.817	41.966	54.789
2017	20.530	44.683	55.552
2018	21.268	46.290	57.550
2019	22.033	47.955	59.620
2020	22.826	49.680	61.764
2021	23.647	51.466	63.985
2022	25.938	54.758	63.404

Fuente. Elaboración propia sobre la base de Sanhueza et al.(2005)

- El número de hogares por estrato socioeconómico es estimado aplicando las participaciones estimadas para cada año en el período 2001-2020, información proveniente de SECTRA. El número de viviendas por estrato y los porcentajes utilizados son presentados en la Tabla N° 4:

Tabal N° 4. Número de Viviendas Por Estrato Socioeconómico

Año	N° Viviendas	% Estrato Alto	% Estrato Medio	% Estrato Bajo	Viviendas Estrato Alto	Viviendas Estrato Medio	Viviendas Estrato Bajo
2001	69.222	8	39	53	5.538	26.997	36.688
2002	71.084	10	31	59	7.108	22.036	41.940
2003	73.640	11	31	58	8.100	22.828	42.711
2004	76.289	11	32	57	8.392	24.412	43.485
2005	79.032	12	32	56	9.484	25.290	44.258
2006	81.875	12	33	55	9.825	27.019	45.031
2007	84.819	13	33	54	11.026	27.990	45.802
2008	87.870	13	34	53	11.423	29.876	46.571
2009	91.030	14	34	53	12.380	30.768	47.791
2010	94.304	14	34	52	13.203	32.063	49.038
2011	97.695	15	35	50	14.654	34.193	48.848
2012	101.208	15	35	50	15.181	35.423	50.604
2013	104.848	15	35	50	15.727	36.697	52.424
2014	108.619	16	36	48	17.379	39.103	52.137
2015	112.525	16	36	48	18.004	40.509	54.012
2016	116.572	17	36	47	19.817	41.966	54.789
2017	120.765	17	37	46	20.530	44.683	55.552
2018	125.108	17	37	46	21.268	46.290	57.550
2019	129.608	17	37	46	22.033	47.955	59.620
2020	134.269	17	37	46	22.826	49.680	61.764
2021	139.098	17	37	46	23.647	51.466	63.985
2022	144.101	18	38	44	25.938	54.758	63.404

Fuente. Elaboración propia sobre la base de Sanhueza et al. (2004).

- Se estiman el número de diferentes artefactos de combustión residencial por estrato socioeconómico en función de información de la encuesta VITAE, utilizando la probabilidad de tenencia de cada tipo de artefactos para los diferentes estratos socio-económicos. La tabla N° 5 muestra las probabilidades utilizadas:

Tabla N° 5. Probabilidades de Uso de Artefactos por Estrato Socioeconómico

Tipo de artefacto	Probabilidad de usar el artefacto por Nivel de Estrato Socioeconómico		
	Alto	Medio	Bajo
Cocina	0,08	0,28	0,59
Salamandra	0,03	0,04	0,10
Estufa simple	0,30	0,39	0,11
Estufa doble cámara	0,09	0,08	0,00
Chimenea	0,07	0,04	0,00

Fuente: Sanhueza et al. (2004).

- Sanhueza et al. (2004) utilizan tasas de recambio de cocinas a leña por cocinas a gas derivadas de los censos de población y vivienda de los años 1992 y 2002, para considerar la disminución en el número de estos artefactos en el tiempo. La tasa anual de recambio del modelo varía entre un 6,6% y 5,3% anual para los estratos socio-económicos alto y bajo, respectivamente. En el modelo desarrollado por Sanhueza et al. (2004) cada tasa es combinada con el crecimiento en el número de viviendas por estrato. El efecto neto es la reducción del número de cocinas en el tiempo.

Estas tasas han sido modificadas dentro del modelo de emisiones producto de: (i) los datos del censo de población y viviendas preguntan por el combustible del artefacto para cocinar, pero no respecto a si se utilizan cocinas para calefacción; (ii) existe la percepción que los sectores de menores ingresos, si bien pueden cambiar cocinas a leña por cocinas a gas para uso de preparación de alimentos, tienden a mantener sus cocinas a leña para uso de calefacción, lo cual viene reflejado dentro de la encuesta VITAE (2002).

En razón a lo anterior, se optó por modificar la tasa de recambio a objeto de mantener más estable el número de cocinas en el estrato bajo a pesar del incremento de la población dentro de este último estrato.

El supuesto anterior es conservador, en el sentido que tiende a mantener un mayor número de emisiones en el tiempo respecto a los resultados del modelo de Sanhueza et al. (2004). Sin embargo, resulta coherente con la realidad social de las comunas de Temuco y Padre Las Casas, en donde la cantidad de hogares en el estrato socioeconómico bajo es muy alta y su nivel de ingresos es menor al resto del país (CASEN, 2003).

- En adición, a diferencia de Sanhueza et al. (2004) se asume un congelamiento en el crecimiento de chimeneas respecto al año base 2004, dado que según antecedentes de CONAMA, se ha constatado que este tipo de fuentes emisoras no crece en el tiempo dentro del área de influencia del PDA. Todo el incremento proyectado en el número de chimeneas para el período 2005-2022 fue traspasado a estufas doble cámara dentro del modelo de emisiones.
- Se utilizan estimaciones del consumo promedio anual de leña para cada tipo de artefacto, así como factores de emisión de la EPA y estimaciones de las proporciones de uso de leña seca y húmeda en el área de análisis. Para el caso del consumo de leña en chimeneas de estrato socioeconómico medio, se ha modificado el valor utilizado por Sanhueza et al. (2004) desde 10,5 m³/año a 6,0 m³/año, ya que se considera que el primer valor no es representativo y es muy superior comparativamente al consumo de leña del estrato alto. Los factores de emisión y consumos utilizados son presentados a continuación:

Tabla N° 8. Antecedentes para Estimaciones Emisiones Residenciales

Artefacto	Estrato	Consumo Leña (m3/año)	Factor de Emisión Leña Seca (g/kg. leña)	Factor de Emisión Leña Húmeda (g/kg. leña)
Cocina	Alto	7,7	15,3	17,3
	Medio	5,0	15,3	17,3
	Bajo	5,2	15,3	17,3
Salamandra	Alto	12,8	8,5	15,9
	Medio	4,3	8,5	15,9
	Bajo	3,6	8,5	15,9
Estufa Simple	Alto	6,0	8,1	15,3
	Medio	6,5	8,1	15,3
	Bajo	5,1	8,1	15,3
Estufa Doble Cámara	Alto	5,0	8,1	10,2
	Medio	6,2	8,1	10,2
	Bajo	4,6	8,1	10,2
Chimenea	Alto	6,0	16,6	17,3
	Medio*	6,0	16,6	17,3
	Bajo	0,0	16,6	17,3

Fuente: Elaboración propia en base a Sanhueza et al. (2004).

* valor modificado

- Finalmente, se considera una proporción de uso de leña seca del 20% del total, siendo el restante consumo correspondiente a leña húmeda.

La Tabla N° 9 muestra la evolución de emisiones de la línea base sin PDA para la combustión residencial:

**Tabla N° 9. Emisiones Residenciales de MP10
(Ton/Año)**

Año	Cocinas	Salamandras	Estufas simples	Estufas Dobles	Chimeneas	Total
2001	1.820	203	966	113	102	3.204
2002	1.887	221	899	102	97	3.205
2003	1.881	229	940	108	104	3.261
2004	1.880	235	989	114	110	3.328
2005	1.873	244	1.034	124	110	3.385
2006	1.872	251	1.087	135	110	3.454
2007	1.863	260	1.137	146	110	3.516
2008	1.860	267	1.195	158	110	3.590
2009	1.861	277	1.240	168	110	3.656
2010	1.865	287	1.294	179	110	3.735
2011	1.835	295	1.372	198	110	3.809
2012	1.849	306	1.421	207	110	3.893
2013	1.864	317	1.472	216	110	3.979
2014	1.831	326	1.560	237	110	4.064
2015	1.846	338	1.616	248	110	4.157
2016	1.832	350	1.688	265	110	4.246
2017	1.825	360	1.773	283	110	4.350
2018	1.840	373	1.836	295	110	4.454
2019	1.856	386	1.902	308	110	4.562
2020	1.872	400	1.971	321	110	4.674
2021	1.888	415	2.042	335	110	4.790
2022	1.847	427	2.161	364	110	4.909

Fuente: Elaboración propia basado en Sanhueza et al. (2005).

Contemporáneamente al proceso de elaboración del PDA se ha venido discutiendo la implementación de una norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña que apunte prevenir el aumento en los problemas de contaminación existentes en centro urbanos del país, Temuco y Padre Las Casas y especialmente, la Región Metropolitana⁷. Esta regulación ambiental busca reducir los niveles de emisión para nuevos artefactos que ingresen al mercado de manera gradual y considerando la eficiencia energética como un factor relevante.

A partir de lo anterior, se evaluó la pertinencia de incorporar la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña como parte del PDA o si ella debía ser considerada dentro del escenario base del PDA. Se optó por la segunda alternativa, dado que dicha norma es de carácter nacional y busca no sólo controlar problemas de contaminación en el área de Temuco y Padre Las Casas.

⁷ Nos referimos a la Región Metropolitana, porque es también una zona definida como saturada por contaminación del aire, y donde se ha observado un fuerte incremento de las ventas de artefactos de combustión residencial a leña, producto de la disminución de los costos para su adquisición (mayores facilidades de crédito), el menor costo de la leña respecto a combustibles alternativos y la amenaza de suministro energético en el futuro. Si las tendencias se mantienen, es esperable que el nivel de emisiones de estos artefactos se incrementen sustantivamente durante los próximos años en la Región, afectando las posibilidades de cumplimiento de las metas del PPDA de la Región Metropolitana.

La propuesta de norma de emisión actualmente en discusión utiliza valores límites en mg/MJ de energía útil (energía efectivamente transferida al recinto), ya que incluye tanto la emisión directa como la eficiencia, en un mismo parámetro. De esta manera, se podría lograr el cumplimiento de la norma con diversas tecnologías que combinan diferentes emisiones y diferentes eficiencias. La gradualidad propuesta corresponde a la siguiente:

Tabla N° 10. Valores de Norma

AÑO	LIMITE*	Eficiencia Energética
2008	Los límites son conocidos, pero no están vigentes (situación actual 3.5 g/kg)	65%
2009	1.8 g/kg leña	70%
2012	1 g/kg leña	75%
2016	0.5 g/kg leña	80%

*: valores medidos en laboratorio.

Se estima que los equipos de calefacción a leña que actualmente existen en el mercado presentan valores de emisión real entre 3 y 5 veces superiores al límite del año 2008, el cual ha sido considerado como valor de referencia. Para calcular las emisiones de nuevos artefactos de combustión residencial para los períodos futuros: 2009, 2012 y 2016, se consideró que los nuevos artefactos debían ser estufas de doble cámara modificadas y que cumplieran con los requerimientos de eficiencia energética mostrados en la tabla anterior. Ello significa que las reducciones de emisión entre artefactos que cumplan los valores de norma de emisión establecidos para diferentes períodos consideran dos efectos: (i) menor factor de emisión por kg de leña utilizado y (ii) mayor eficiencia energética que se traduce en menor consumo de combustible. Por otro lado, también es necesario considerar que el tipo de leña utilizada también influye en las emisiones finales de los nuevos artefactos. Por eso, se han corregido los factores de emisión obtenidos para cada nuevo valor de norma por un coeficiente que refleja la diferencia en porcentaje de reducción de emisiones finales de la estufa suiza medida con leña seca y leña húmeda. Los factores de emisión utilizados entonces para nuevos artefactos de combustión residencial a leña corresponden a estufas de doble cámara, como lo muestra la siguiente Tabla⁸:

⁸ Respecto a los factores de emisión para las diferentes tecnologías, se han considerado que la reducción en emisiones para cada artefacto en relación a la línea base es proporcional a las variaciones en los valores de norma.

Tabla N° 11. Factores de emisión MP10, Estufa Doble Cámara
(Unidades g/kg de leña)

Año	Seca	Húmeda
2009	3,8	5,6
2012	2,0	3,7
2016	0,9	2,5

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular las emisiones en el escenario con norma de emisión se ha considerado como nueva fuente a los artefactos de combustión a leña que entren a partir del 2009 y que deben cumplir con un estándar que reduce las emisiones de los artefactos nuevos. La tabla N° 12 muestra el stock y tipo de artefactos nuevos de calefacción a leña en el escenario sin norma de emisión a partir del año 2009. Esta cantidad de artefactos, bajo el escenario con norma de emisión, debería ser reemplazada con artefactos de calefacción a leña que cumplieran los límites de emisión señalados en la norma de emisión (posiblemente con estufas de doble cámara mejoradas).

Tabla N° 12. Stock Artefactos Nuevos, 2009-2022

Año	Salamandras	Estufas Simples	Estufas Doble Cámara
2009	436	2.154	689
2010	688	3.274	1.051
2011	815	4.851	1.653
2012	1.119	5.895	1.948
2013	1.435	6.977	2.254
2014	1.569	8.754	2.936
2015	1.900	9.938	3.278
2016	2.136	11.451	3.859
2017	2.386	13.166	4.404
2018	2.747	14.509	4.799
2019	3.120	15.901	5.207
2020	3.508	17.343	5.631
2021	3.909	18.836	6.069
2022	4.069	21.254	7.008

Fuente: Elaboración propia.

Los nuevos artefactos corresponden a:

- Renovación de artefactos: se ha asumido que el número de renovaciones es baja, un cuarto de los artefactos que entran por viviendas nuevas en Temuco y Padre Las Casas (1 de cada 5 nuevos artefactos es producto de la renovación de artefactos viejos). Este supuesto es más conservador que el utilizado por Ambiente Consultores para el anteproyecto de norma de emisión (1 de cada 4).
- Artefactos asociados a nuevos hogares en el área de análisis.

- No se ha considerado la renovación de cocinas, dado que no se cuenta con mediciones para estos equipos en condiciones típicas de operación ni para cocinas que cumplan norma. Como se señaló con anterioridad, en general el número de cocinas permanece estable en el tiempo.

La tabla N° 13 resume la proyección de emisiones de combustión residencial a leña en el período 2008-2022, asumiendo la implementación de la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña.

**Tabla N° 13: Proyección de Emisiones Residenciales, 2008-2022.
Escenario base con norma de emisión
(Ton/Año MP10)**

Año	Total
2008	3.580
2009	3.598
2010	3.621
2011	3.616
2012	3.634
2013	3.654
2014	3.628
2015	3.647
2016	3.632
2017	3.617
2018	3.628
2019	3.639
2020	3.650
2021	3.662
2022	3.614

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que el análisis es estático y no considera los incentivos que existirían en los hogares para: (i) renovar con antelación los artefactos de combustión para evitar mayores costos incrementales, y (ii) atrasar la renovación de artefactos de combustión a leña para evitar mayores costos de los equipos. Estos incentivos funcionan inversamente en relación a los potenciales grupos afectados. Hogares de estrato socio-económico altos tenderían a desarrollar el comportamiento (i), mientras que hogares de estrato socio-económico bajo tenderían a desarrollar el comportamiento (ii).

La norma de emisión además tiene un impacto indirecto sobre otras dos medidas del PDA: el programa de subsidios al recambio de artefactos de combustión residencial y la exigencia de compensación de emisiones. En ambos casos, la norma de emisión define los potenciales de reducción de emisiones alcanzables para equipos existentes.

(b) Sector Industrial

Respecto a la proyección de las emisiones asociadas al sector industrial, calderas y/o procesos, se realizó una revisión de los proyectos ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para estimar el crecimiento anual de las emisiones. La información disponible no logra dar cuenta de incrementos en proyectos industriales dentro del área de Temuco y Padre Las Casas en el período 2000-2005. Del mismo modo, el análisis de la tasa de crecimiento del Producto Regional Bruto del sector manufacturas según cifras del Banco Central de Chile en el período 1996-2002 muestra un estancamiento del PIB real del sector manufacturas en la IX Región.

Por lo anterior, se asume que las emisiones de MP10 producidas por el sector industrial se mantienen estables durante el período de análisis para el caso base sin PDA⁹. Según el inventario de emisiones 2004, estas emisiones alcanzarían a 259 ton/año.

(c) Sector Fuentes Móviles

El sector de fuentes móviles aporta de manera marginal a las emisiones de MP10 en el área de Temuco y Padre Las Casas (Sanhueza et al., 2005). No obstante lo anterior, la evidencia empírica muestra que el transporte parece ser uno de los sectores cuyo crecimiento se encuentra estrechamente ligado al crecimiento económico (Button et al, 1992). Por otro lado, el PDA establece la necesidad de regular las emisiones de fuentes móviles, en orden a al menos congelar el aporte sectorial a la contaminación del aire en el área bajo estudio.

La siguiente tabla resume la situación de emisiones del año 2005 según el inventario del CENMA para el nivel de actividad y factores de emisión promedio por categoría de vehículo:

Tabla N° 14. Emisiones Fuentes Móviles

Categoría	Emisión Anual (Ton MP10/Año)
Buses	32
Camiones	11,4
Vehículos Particulares	4,3
Vehículos Comerciales	5,5
Taxis	0,9
Motocicletas	0,02
Total	54.1

Fuente: Sanhueza et al. (2005).

Se puede apreciar a partir de lo anterior que la subcategoría de fuentes móviles que aporta mayormente a las emisiones del sector corresponde a buses con cerca del 60% del universo de emisiones del sector. De lo anterior, se desprende que el establecimiento de límites a la edad del parque de buses urbanos puede resultar en una medida muy efectiva para reducir las emisiones del

⁹ El análisis del SEIA muestra que la mayor parte de las calderas y procesos que se instalan en la IX Región se encuentran fuera del área de Temuco y Padre Las Casas.

sector. Cabe señalar que en la Región Metropolitana, se ha establecido un límite de 12 años para la antigüedad de buses circulando en zona urbana. Una medida de similares características podría significar una reducción sustancial de las emisiones del sector transporte, dado que las actuales normas de emisión para buses de transporte público a nivel nacional exigen el cumplimiento de la norma EURO II.

En la proyección de emisiones del sector transporte, sólo hemos considerado analizar las emisiones provenientes del transporte público urbano, dada su importancia dentro del sector. Se ha asumido que el parque existente tiene una vida útil de 25 años y que se va renovando con buses que cumplen la normativa EURO II. Se consideran los factores de emisión estimados para el parque de buses en el área de Temuco y Padre Las Casas:

Tabla N° 15. Factores de Emisión, Buses Urbanos Temuco y Padre Las Casas

	Antes 1995 (sin norma)	1995-1998 (EURO I ó EPA 91)	Después 1998 (EURO II ó EPA 94)
Factor de Emisión MP10 (g/km)	1.14	0.61	0.33

Fuente: Inventario CENMA (2001)

La cantidad promedio de kilómetros recorridos al año se estima en 36.000¹⁰ kilómetros y se asume un crecimiento del 3,5 en los kilómetros recorridos anuales (tasa crecimiento población). La Tabla N° 16 nos muestra la composición proyectada del parque de buses de transporte urbano considerando 25 años de vida útil. La información base para el año 2006 proviene de la SEREMI de Transporte de la IX Región.

¹⁰ Este valor fue estimado a partir del inventario de emisiones CENMA (2001) tratando de mantener una coherencia entre diferentes categorías de buses y respecto a los valores de emisiones de tal inventario y la actualización desarrollada por Sanhueza et al. (2004). La estimación de emisiones obtenida para el escenario base alcanza a 25 ton/año para buses de transporte urbano en Temuco.

Tabla N° 16. Composición del Parque de Buses Urbanos según Norma de Emisión, Temuco (Caso Base)

Año base	Sin Norma	EURO I	EURO II
2006	439	188	121
2007	439	188	121
2008	439	188	121
2009	439	188	121
2010	439	188	121
2011	439	188	121
2012	426	188	134
2013	388	188	172
2014	312	188	248
2015	244	188	316
2016	142	188	418
2017	89	188	471
2018	44	188	516
2019	0	161	587
2020	0	102	646
2021	0	43	705
2022	0	0	748

Fuente: Elaboración propia en base a información de SEREMI de Transporte IX Región.

Como ya se señaló con anterioridad, si se asume una antigüedad máxima de funcionamiento natural del bus en 25 años, se estima que las emisiones agregadas del sector transporte (asumiendo congelamiento en el resto de los sectores), alcanzarían los siguientes valores:

Tabla N° 17. Emisiones Proyectadas Sector Transporte

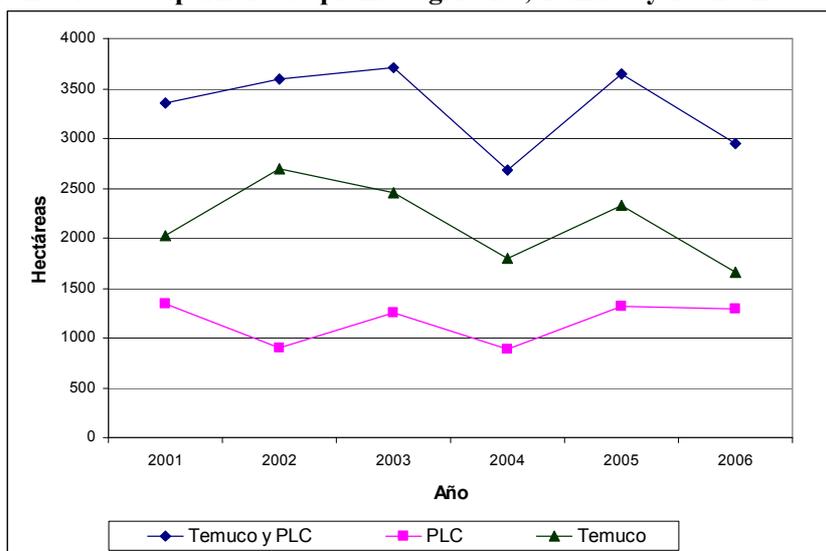
Año	Emisiones (Ton/Año)
2005	55
2006	55
2007	56
2008	57
2009	58
2010	59
2011	60
2012	61
2013	60
2014	58
2015	56
2016	53
2017	51
2018	50
2019	48
2020	47
2021	47
2022	47

Fuente: Estimación sobre la base de SEREMI Transporte, IX Región, Agosto 2006.

(d) Incendios forestales y quemas agrícolas

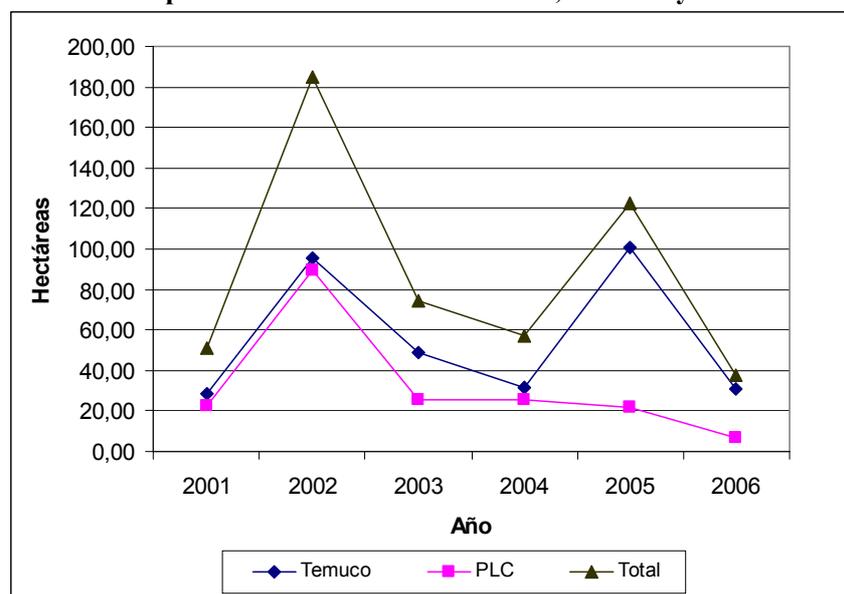
Lo siguientes gráficos resumen la información respecto a quemas agrícolas en Temuco y Padre Las Casas.

Gráfico N° 3. Superficie de quemas agrícolas, Temuco y Padre Las Casas



Fuente: Elaboración Propia en base a antecedentes de CONAF.

Gráfico N° 4. Superficie de Incendios Forestales, Temuco y Padre Las Casas



Fuente: Elaboración Propia en base información de CONAF.

Al analizar los gráficos anteriores, se puede señalar que:

- Las hectáreas de quemas agrícolas no siguen un patrón definido en el tiempo para Padre Las Casas, pero si existe una leve tendencia a la baja en el caso de Temuco y Padre Las Casas. La tendencia en las quemas agrícolas en ambas áreas geográficas en conjunto es hacia la reducción de la superficie quemada según un análisis de regresión.
- Los incendios forestales no muestran un patrón definido en el tiempo, aún cuando se puede inferir una reducción en el tiempo a través de un análisis de regresión.
- Dado que no es posible correlacionar la cantidad de hectáreas consumidas por quemas agrícolas ni incendios forestales, se ha optado por considerar la tendencia lineal en las hectáreas de quemas agrícolas, no así en el caso de incendios forestales dada su naturaleza más incierta. En este último caso, se asume una tasa constante de quemas incendios forestales que corresponde al promedio del período 2001-2006.

Para estimar las emisiones asociadas a quemas agrícolas e incendios forestales, se utilizan los factores de emisión del inventario de emisiones del año 2004 elaborado por Sanhueza et al. (2004).

Tabla N° 18. Proyección Emisiones de Quemadas Agrícolas e Incendios Forestales (Ton/Año)

Año	Quemas Agrícolas	Incendios	Total
2004	96	40	136
2005	131	87	217
2006	106	27	132
2007	109	62	171
2008	106	62	168
2009	103	62	165
2010	100	62	162
2011	97	62	159
2012	94	62	156
2013	91	62	153
2014	88	62	150
2015	85	62	147
2016	82	62	144
2017	79	62	141
2018	76	62	138
2019	73	62	135
2020	70	62	132
2021	67	62	129
2022	64	62	126

Fuente: Elaboración propia sobre base de estadísticas de quemadas agrícolas e incendios de CONAF, 2001-2006.

(d) Emisiones Totales Proyectadas

A continuación se presenta un resumen de las emisiones totales proyectadas para el escenario base (sin PDA) en el período 2008-2022, corrigiendo por aplicación de la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña.

**Tabla N° 19. Emisiones Totales Proyectadas para el Escenario Base
(Ton/año del MP10)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	Total
2004	54	3.328	259	98	82	3.821
2005	55	3.385	259	131	87	3.916
2006	55	3.454	259	106	27	3.901
2007	56	3.516	259	109	62	4.002
2008	57	3.580	259	106	62	4.064
2009	58	3.598	259	103	62	4.080
2010	59	3.621	259	100	62	4.101
2011	60	3.616	259	97	62	4.094
2012	61	3.634	259	94	62	4.110
2013	60	3.654	259	91	62	4.126
2014	58	3.628	259	88	62	4.095
2015	56	3.647	259	85	62	4.110
2016	53	3.632	259	82	62	4.087
2017	51	3.617	259	79	62	4.068
2018	50	3.628	259	76	62	4.074
2019	48	3.639	259	73	62	4.081
2020	47	3.650	259	70	62	4.088
2021	47	3.662	259	67	62	4.097
2022	47	3.614	259	64	62	4.046

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Proyección de las concentraciones para escenarios base (sin PDA) y con proyecto (PDA)

(a) Modelo Propuesto

En el análisis del impacto físico las medidas del PDA se considera una relación emisión-calidad fija, método denominado “roll-back”, para estimar la proyección de las concentraciones de MP10 en el tiempo, tanto para los escenarios sin PDA y con PDA.

Se realizan proyecciones, tanto del promedio anual y como del percentil 98 diario de MP10, como parámetros relevantes para el análisis de cumplimiento de efectos y cumplimiento de la norma de calidad. En lo referente a los efectos de las concentraciones anuales de MP10, si bien el PDA tiene como objeto el cumplimiento de la norma diaria de calidad del aire para MP10 (norma primaria), el impacto de las medidas no sólo afecta la concentración para un valor particular de MP10 diario, sino que la mayor parte de las medidas afectan la calidad del aire en todo el año. Por otro lado, el cumplimiento de la norma de calidad diaria (percentil 98) corresponde a la meta específica del PDA.

En lo referente a la evolución de las concentraciones anuales de MP10, se considera el uso de la siguiente fórmula:

$$C_i = (C_0 - B) * (E_i / E_0) + B$$

Donde:

C_i = Concentración en el período “i”.

C_0 = Concentración para año inicial “0”.

E_i = Emisión en el período “i”.

E_0 = Emisión para año inicial “0”.

B = Background o concentración de fondo, aquella ajena al control de la zona saturada.

A partir de la fórmula anterior, se puede estimar la concentración para cualquier año, con o sin PDA, contando sólo con las emisiones globales de MP10. En este contexto, la proyección de concentraciones de MP10 con PDA, evalúa las emisiones que se alcanzarían con la implementación conjunta de todas las medidas de reducción de emisiones según el calendario establecido en el PDA. Debe hacerse hincapié en que la evaluación de emisiones del PDA debe considerar la entropía en reducción de emisiones producto de dicha implementación conjunta (la suma de las reducciones individuales de MP10 es mayor a la reducción conjunta de MP10).

Los valores considerados en el análisis son los siguientes según antecedentes de CENMA¹¹ y el estudio de Sanhueza et al. (2005)¹²:

Valor concentración anual

B = 0 ug/m³

C_0 = concentración media año 2004 = 50 ug/m³

Valor concentración percentil 98

B = 0 ug/m³

C_0 = concentración media año 2004 = 172 ug/m³

Debemos hacer notar, que el análisis propuesto no evalúa explícitamente el porcentaje de reducción de emisiones necesario para el cumplimiento de la norma diaria de MP10 (120 ug/m³). No obstante, utilizando el mismo modelo roll-back ajustado con los supuestos del estudio de Sanhueza et al. (2005) se puede evaluar el percentil 98 de MP10 diario y verificar cuales son los niveles de concentraciones diarias que se alcanzarían con el PDA. Para ello, Sanhueza et al. (2005) modela la situación base de episodios y concentraciones promedio de 24 hrs. de MP10 para las estaciones Lo Encina (Temuco) y Padre Las Casas. A partir de su análisis, se estima el aporte que realiza cada fuente a las concentraciones del percentil 98 de MP10 promedio 24 hrs.

De este modo, el aporte de cada fuente al percentil 98 del año base como el producto del percentil 98 medido (172 ug/m³) con el peso relativo de cada fuente al total modelado corresponde a:

$$P98_i = P98_0 * C_{m_i} / C_{m_t}$$

¹¹ “Anuario de Calidad del Aire 2005”, Programa de Control de Monitoreo de Calidad del Aire Nacional, Centro Nacional del Medio Ambiente, Universidad de Chile.

¹² Sanhueza, Pedro (2005): “Diseño de escenarios para apoyar la gestión del aire en Temuco y Padre Las Casas”. Preparado para CONAMA IX Región.

Donde:

- P98_i : Percentil 98 debido a la fuente i
- P98_o : Percentil 98 Observado (172 µg/m³)
- Cm_i : Concentración modelada aportada por la fuente i
- Cm_t : Concentración modelada aportada por todas las fuentes

Una vez obtenido el aporte de cada fuente al percentil 98 del año base, se calcula el percentil 98, futuro de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P98_f = \sum_{I=1}^N P98_i * FRR_i$$

Donde:

- P98f : Percentil 98 futuro ó con medidas
- FRRi : Factor de reducción relativo debido a la fuente i
- N : Número de fuentes consideradas (10)

Ajustando por el factor de reducción relativo, se obtienen los aportes a las concentraciones diarias de MP10 (percentil 98 promedio 24 hrs.) para cada tipo de fuente. La proyección de los aportes para el percentil98 para cada año se obtiene proyectando linealmente las concentraciones entre períodos. Sanhueza et al. (2005) definen los períodos 2008, 2012, 2016 y 2020. Los resultados de las proyecciones, a las cuales denominaremos “Modelo 1”, pueden encontrarse en la Tabla N° 20.

**Tabla N° 20: Concentraciones y Aportes Sectoriales al Percentil 98. Modelo N° 1
(concentración MP10, ug/m³)**

Año	Edificios	Incendios Forestales	Industria	Quemas Agrícolas	Vehículos	Residencial	P98
2004	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	169	172
2005	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	168	171
2006	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	167	170
2007	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	167	170
2008	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	167	170
2009	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	168	171
2010	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	168	171
2011	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	170	173
2012	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	171	174
2013	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	172	175
2014	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	174	177
2015	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	176	179
2016	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	178	181
2017	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	181	184
2018	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	183	186
2019	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	187	190
2020	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	190	193
2021	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	194	197
2022	0,2	0,3	1,7	0,2	0,6	198	201

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sanhueza (2005).

De la Tabla N° 20 se observa la importancia de las emisiones residenciales en las condiciones de calidad del aire en eventos de episodios críticos en Temuco y Padre Las Casas, por lo que las medidas que afecten a dichas fuentes resultan de gran importancia en el cumplimiento de las normas de calidad del aire. La Tabla N° 21 muestra el aporte por tonelada emitida de cada sector al percentil 98 de MP10.

Tabla N° 21: Aporte al Percentil 98 por tonelada de MP10 por Sector y Corte Temporal (ug/m³ por tonelada anual de MP10)

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales
2005	0,011	0,052	0,007	0,002	0,002
2006	0,011	0,051	0,007	0,002	0,006
2007	0,011	0,051	0,007	0,002	0,007
2008	0,011	0,050	0,007	0,002	0,003
2009	0,010	0,050	0,007	0,002	0,011
2010	0,010	0,049	0,007	0,002	0,005
2011	0,010	0,049	0,007	0,002	0,005
2012	0,010	0,048	0,007	0,002	0,005
2013	0,010	0,048	0,007	0,002	0,005
2014	0,010	0,047	0,007	0,002	0,005
2015	0,011	0,047	0,007	0,002	0,005
2016	0,011	0,047	0,007	0,002	0,005
2017	0,012	0,046	0,007	0,003	0,005
2018	0,012	0,046	0,007	0,003	0,005
2019	0,013	0,046	0,007	0,003	0,005
2020	0,013	0,046	0,007	0,003	0,005
2021	0,013	0,046	0,007	0,003	0,005
2022	0,013	0,045	0,007	0,003	0,005

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Sanhueza (2005).

De manera alternativa al modelo anterior, se ha propuesto un segundo modelo (“Modelo 2”). Este segundo modelo:

- Utiliza la misma base del inventario de emisiones¹³ y proyecciones de MP10 en el período 2008-2022 como en el modelo anterior.
- Realiza un ejercicio simple de roll-back considerando las participaciones que tienen los diferentes sectores emisores en las diferentes estaciones del año. En el estudio de la Universidad de Chile (2005) se señala que casi el 75% del consumo de leña en Temuco y Padre Las Casas se realiza en invierno. Por otro lado, los antecedentes de CONAF muestran que la mayor parte de las quemas agrícolas se realiza en abril, mientras que los incendios forestales se concentran en el período diciembre-marzo de cada año. Para el resto de los sectores se considera una participación pareja de las emisiones a lo largo del año, y así, un similar nivel de emisiones cada día del año.
- El Modelo 2 es propuesto porque se considera que el Modelo 1 podría estar subestimando la proyección de crecimiento de las concentraciones en el escenario sin PDA. A modo de ejemplo, en el Modelo 1, la variación de las concentraciones del percentil 98 en el período 2004-2022 alcanza a sólo un 17%, en condiciones que las emisiones aumentan un 34% en el mismo período. Lo anterior también puede verse en la Tabla N° 21, donde los aportes del

¹³ Se refiere a las emisiones del escenario base sin norma de emisión de artefactos de combustión residencial.

sector residencial van consistentemente siendo menores por cada tonelada emitida. Por el contrario, el Modelo 2 ajusta linealmente este impacto.

Los resultados de las proyecciones para el “Modelo 2” pueden encontrarse en la Tabla N° 22.

**Tabla N° 22: Concentración y Aportes Sectoriales al Percentil 98, 2008-2022.
(concentración MP10, ug/m³)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	1,0	179,8	4,3	0,1	0,0	185
2009	1,0	183,1	4,3	0,1	0,0	188
2010	1,0	187,0	4,3	0,1	0,0	192
2011	1,0	190,7	4,3	0,1	0,0	196
2012	1,0	194,9	4,3	0,1	0,0	200
2013	1,0	199,2	4,3	0,1	0,0	205
2014	1,0	203,5	4,3	0,1	0,0	209
2015	0,9	208,2	4,3	0,1	0,0	214
2016	0,9	212,6	4,3	0,1	0,0	218
2017	0,9	217,8	4,3	0,1	0,0	223
2018	0,8	223,0	4,3	0,1	0,0	228
2019	0,8	228,4	4,3	0,1	0,0	234
2020	0,8	234,0	4,3	0,1	0,0	239
2021	0,8	239,8	4,3	0,1	0,0	245
2022	0,8	245,8	4,3	0,1	0,0	251

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los aportes al P98 por tonelada emitida en cada sector son presentados en la Tabla N° 23:

Tabla N° 23: Aportes Sectoriales al Percentil 98 por ton de MP10 (ug/m³/ton anual de MP10)

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales
2004	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2005	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2006	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2007	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2008	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2009	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2010	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2011	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2012	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2013	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2014	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2015	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2016	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2017	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2018	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2019	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2020	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2021	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000
2022	0,017	0,050	0,017	0,001	0,000

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas anteriores muestran la simulación de concentraciones obtenida en el escenario base donde no existe norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña y los coeficientes base emisión-concentración por sector. Dado que se asume que dicha norma de emisión estará operativa en el escenario base sin PDA, es necesario corregir la simulación de emisiones considerando las emisiones totales proyectadas con norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña.

Utilizando las emisiones proyectadas con norma de emisión de la Tabla N° 19 y la relación emisión-concentración (ug/m³ de MP10 por tonelada) de las Tablas N° 23, se obtienen las proyecciones de concentraciones para el percentil 98 diario de MP10 con el Modelo 2. Esto corresponderá al escenario base de concentraciones utilizada en este estudio. Los resultados son presentados a continuación.

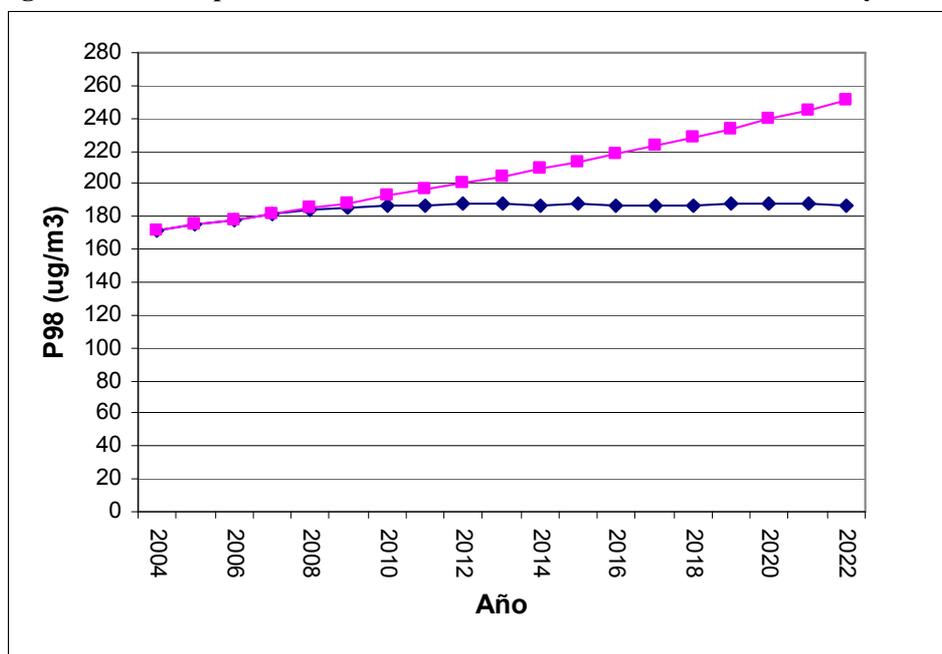
**Tabla N° 24: Proyección Percentil 98, Escenario Base con Norma de Emisión
(concentración MP10, ug/m³)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	1,0	179,2	4,3	0,1	0,0	185
2009	1,0	180,2	4,3	0,1	0,0	186
2010	1,0	181,3	4,3	0,1	0,0	187
2011	1,0	181,0	4,3	0,1	0,0	186
2012	1,0	182,0	4,3	0,1	0,0	187
2013	1,0	182,9	4,3	0,1	0,0	188
2014	1,0	181,6	4,3	0,1	0,0	187
2015	0,9	182,6	4,3	0,1	0,0	188
2016	0,9	181,8	4,3	0,1	0,0	187
2017	0,9	181,1	4,3	0,1	0,0	186
2018	0,8	181,6	4,3	0,1	0,0	187
2019	0,8	182,2	4,3	0,1	0,0	187
2020	0,8	182,8	4,3	0,1	0,0	188
2021	0,8	183,3	4,3	0,1	0,0	189
2022	0,8	181,0	4,3	0,1	0,0	186

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia en la proyección de concentraciones para el percentil 98 en los escenarios base, sin y con norma de emisión de artefactos de combustión residencial a leña es presentada en la siguiente figura:

Figura N° 5. Comparación de la Evolución de las Concentraciones Proyectadas



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Línea superior = Percentil 98 sin norma de emisión

Línea inferior = Percentil 98 con norma de emisión

Las diferencias en concentraciones ambientales entre ambos escenarios base del PDA, sin y con norma de emisión, corresponde a la ganancia ambiental generada por la norma de emisión de artefactos de combustión residencial a leña. De la figura anterior, se hace evidente la relevancia de dicha norma de emisión como instrumento de prevención en el amento de las emisiones y concentraciones ambientales en el área de influencia del PDA de Temuco y Padre Las Casas. En consecuencia, los valores de esta norma serán una de las variables clave a la hora de analizar la posibilidad de cumplimiento de las normas de calidad del aire objeto del PDA.

3.4 Proyección de emisiones con medidas: Plan de Descontaminación de Temuco y Padre Las Casas (PDA)

El anteproyecto de PDA de Temuco y Padre Las Casas contiene una serie de medidas que buscan el cumplimiento de la norma diaria de calidad del aire para MP10 (norma primaria).

Para el análisis, se ha considerado necesario diferenciar entre medidas que generan un impacto directo sobre las emisiones y aquellas que son complementarias pero cuyo impacto sobre emisiones es indirecto. Al respecto, las estimaciones de indicadores sólo estarán asociadas a medidas de impacto directo.

3.4.1 El Anteproyecto de PDA de Temuco y Padre Las Casas

El PDA establece una serie actividades para dar cumplimiento a las normas de calidad del aire en Temuco y Padre Las Casas. Estas medidas se encuentran asociadas a diferentes actividades de regulación, gestión ambiental, fiscalización, monitoreo y control, prevención de efectos en episodios críticos, y educación entre otras. En su conjunto, estas medidas buscan establecer una visión comprensiva y amplia del problema de la contaminación atmosférica en la zona saturada, en el entendimiento que:

- No sólo basta con medidas de carácter tecnológico para dar cumplimiento a las metas del PDA.
- Es necesario involucrar activamente a la población para que internalice que ella es parte de la solución al problema de la contaminación atmosférica.
- Es necesario crear una serie de habilidades e iniciativas en los sectores público y privado a objeto de cumplir a cabalidad con las tareas encomendadas en el PDA.
- El logro de las metas del PDA requiere de una importante movilización de recursos tanto privados como públicos si se pretenden alcanzar los objetivos perseguidos.

Hemos considerado pertinente agrupar las medidas del PDA en dos grandes grupos. En primer lugar, aquellas medidas de impacto directo asociadas a reducciones directas de emisiones de MP10. En segundo lugar, medidas de impacto indirecto cuyo objetivo es complementar y apoyar el logro de los objetivos del PDA. A continuación se presentan las medidas asociadas a dicha categorización:

Medidas de impacto directo

- MD1: Regulación de la humedad de la leña
- MD2: Prohibición del uso de chimeneas
- MD3: Compensación de emisiones
- MD4: Programa de aislamiento térmico
- MD5: Programa de recambio de artefactos antiguos
- MD6: Norma de emisión para calderas industriales y comerciales
- MD5: Control de las quemas agrícolas
- MD6: Control de emisiones del transporte
- MD7: Arborización urbana

Medidas de impacto indirecto

- MI1: Plan operacional de episodios críticos
- MI2: Programa de educación ambiental y participación ciudadana
- MI3: Programa de vigilancia de calidad del aire
- MI4: Estudios complementarios
- MI5: Fiscalización por parte de servicios públicos
- MI6: Programas de apoyo productivo en sector leña y equipos de combustión a leña

3.4.2 Escenarios de evaluación del PDA

Respecto a la evaluación del escenario de emisiones asociados al PDA se plantean diferentes escenarios de concentración de emisiones conforme a las posibilidades de cumplimiento de las medidas del PDA. A nuestro juicio, existe un conjunto de medidas que son fundamentales para el logro del cumplimiento de las normas primarias de calidad del aire en Temuco y Padre Las Casas:

- (i) Uso de leña seca
- (ii) Sistema de compensación de emisiones
- (iii) Subsidio a la aislación térmica de viviendas sociales priorizadas.
- (iv) Subsidio a la renovación de artefactos de combustión a leña

Estas medidas contienen la mayor parte de la reducción de emisiones de MP10 del PDA. Sin embargo, sus resultados dependen de una serie de factores institucionales:

- Fiscalización efectiva de la calidad de la leña
- Identificación de las fuentes residenciales en el área afectada
- Efectividad de la norma de emisión
- Solución de problemas de selección adversa para el programa de recambio
- Disponibilidad de recursos para subsidios en aislación térmica y recambio de artefactos de combustión residencial a leña.

En el análisis de indicadores de cada medida, abordaremos en parte estos aspectos y sus posibles consecuencias a objeto de identificar los sesgos que se generan en la estimación de resultados frente a modificaciones institucionales.

Uno de los principales aspectos del PDA es la necesidad de financiamiento público para los programas de subsidio. Como veremos más adelante, si estos programas son bien diseñados, pueden ser altamente efectivos y eficientes socialmente en el logro de los objetivos del PDA.

De lo anterior se desprende que el AGIES como herramienta de gestión ambiental puede resultar útil para señalar como las debilidades del PDA pueden afectar sus resultados. Si se asume un escenario optimista; posiblemente se cumplan las normas de calidad para MP10 y el AGIES dará cuenta de ello como un hecho positivo. De la misma manera, un escenario con debilidad institucional también debería dar cuenta de cómo limitaciones al PDA afectarían de forma negativa el cumplimiento de las normas de calidad para MP10.

En la sección de resultados daremos cuenta de las implicancias de factores institucionales y financiamiento público respecto del cumplimiento de metas del PDA.

4. Estimación de los Impactos del PDA

4.1 Evaluación de los impactos en emisiones

Para estimar los cambios en las emisiones generadas por cada una de las medidas analizadas se utilizan factores de emisión (FE) existentes en la literatura internacional y en estudios nacionales

relacionados. A partir de estos valores y considerando las emisiones unitarias antes y después de aplicarse la medida, se estimarán las reducciones unitarias atribuibles a la medida

Dentro del estudio se consideran las siguientes medidas que consideran variaciones en los factores de emisión:

- Uso de leña seca
- Prohibición de chimeneas abiertas
- Norma de emisión de MP para calderas industriales y de calefacción
- Limitación de antigüedad en la flota de buses urbanos
- Compensación de emisiones sector industrial
- Compensación de emisiones sector inmobiliario
- Programa de recambio de artefactos de combustión residencial a leña
- Programa de arborización urbana

En el caso de las compensaciones de emisión, se asume que el recambio

4.2 Estimación de los costos de cumplimiento, control y fiscalización

La estimación de costos de las medidas sobre el sector privado de emisores será realizada considerando los costos incrementales de las medidas siguiendo la metodología comúnmente utilizada en la evaluación social de proyectos. Desde el punto de vista metodológico, todos los costos serán anualizados a objeto de obtener un indicador anual del costo de las medidas por unidad física. Finalmente, se utilizará una tasa social de descuento del 10% recomendada por el Ministerio de Planificación (MIDEPLAN) para la evaluación de proyectos sociales. Esta tasa será la misma utilizada

En adición, otras variables de relevancia en la estimación son:

- 1US\$ = \$ 540
- Precio leña seca = \$ 18.000 por metro estereo.

4.3 Estimación de beneficios sociales del PDA

Se consideran 2 tipos de beneficios de la implementación del PDA sobre la población y los emisores:

- Beneficios en salud
- Beneficios en visibilidad
- Ahorros en energía

Los beneficios en salud corresponden al valor económico de la reducción en el número de casos de mortalidad y enfermedades producto de la implementación de medidas del PDA que disminuyen la contaminación del aire en Temuco y Padre Las Casas.

Los beneficios en visibilidad se refieren a los beneficios económicos en que incurre la población por tener la posibilidad de observar de manera más nítida objetos o paisajes producto de la reducción de la contaminación del aire.

Finalmente, los ahorros en costos de energía son beneficios económicos que son asumidos por los agentes emisores, sector residencial en el caso de Temuco y Padre Las Casas, producto de la adquisición de calefactores a leña que son más eficientes energéticamente. La mayor eficiencia energética de estos artefactos implica un menor consumo de leña para producir la misma cantidad de calor.

En el Anexo 1 se detallan las metodologías de evaluación para cada tipo de beneficio y las estimaciones de beneficios para el escenario base en el caso de salud y visibilidad.

4.4 Indicadores y evaluación del impacto conjunto de las medidas

(a) Indicadores

Se realizó una evaluación para cada una de las medidas señaladas anteriormente en términos de:

- Valor presente de la reducción de emisiones asociadas a cada medida por período.
- Valor presente de los beneficios = corresponden a beneficios en salud, visibilidad y ahorro de energía cuando corresponda durante el período.
- Valor presente del impacto en concentración anual de MP10 (reducción de concentraciones de MP10 anual) durante un período
- Valor presente de los costos sociales = corresponden a los costos en medidas de cumplimiento, los cuales están anualizados para hacerlos comparables con los beneficios en el período de análisis, 2008-2022.
- Valor presente de los costos privados = corresponden a los costos efectivos en inversión que deben incurrir los agentes durante el período 2008-2022.
- Indicadores de costos efectividad:
 - Costo de reducción por tonelada de MP10
 - Costo de reducción por ug/m3 de MP10
- Indicador de eficiencia = razón beneficio/costo

Se utiliza el valor presente en todos los indicadores, ya que esta medida permite incorporar el hecho que reducciones en emisión y/o concentración son más valoradas mientras más pronto ocurran en el tiempo. Del mismo modo, ello permite calcular las medidas de costos-efectividad promedio durante el período 2008-2022 de manera más simple si contamos con el valor presente de los costos, estos últimos también estimados en las tablas que se mostrarán más adelante.

Todos los indicadores estimados sólo consideran los costos tecnológicos directos (y beneficios) de las medidas, y no se incorpora costos indirectos asociados a fiscalización y diseño. Estas últimas variables se asumen que son efectivas en la mayoría, con algunos ajustes al respecto. En una sección posterior se incluyen todos los costos indirectos que debe asumir el Estado para la implementación del PDA.

Respecto a los horizontes de evaluación, se considera como ya se ha visto en todas las tablas precedentes, un plazo de 15 años entre los años 2008 y 2022.

(b) Evaluación del impacto conjunto de las medidas

La evaluación del impacto global de la implementación de las medidas del PDA debe considerar la interacción existente entre diferentes medidas. En este sentido, resulta necesario definir si las medidas del PDA pueden ser complementarias o suplementarias.

En el primer caso, cuando las medidas son complementarias, ellas se apoyan mutuamente. Por ejemplo, el cumplimiento de la norma de emisión de artefactos residenciales de combustión a leña requiere de incentivos económicos y enforcement para su aplicación.

En el segundo caso, cuando las medidas son suplementarias, dos medidas apuntando al mismo emisor pueden tener una efectividad de reducción de emisiones de 20% y 30% implementadas por separado. Sin embargo, cuando se implementan conjuntamente (por ejemplo, para el caso de norma de emisión y exigencia de leña seca) su efectividad es $< 50\%$ ($20\% + 30\%$). A eso denominamos entropía, lo contrario a sinergia, en término de reducción de emisiones.

Lo anterior se verá reflejado en el análisis de la reducción global de emisiones de todas las medidas del PDA para cada año, a partir de lo cual se calculan los beneficios del PDA.

El AGIES no debe hacerse parte de si hay cumplimiento de las normas de calidad del aire propuesto a través del PDA. Es sólo una herramienta de evaluación para determinar cuales son los efectos del PDA sobre la sociedad. El reglamento de planes y normas define claramente este aspecto. Ahora, indirectamente el AGIES puede dar cuenta del nivel de cumplimiento o no de las normas del PDA, pero como se dijo con anterioridad no es su objetivo entregar el cumplimiento del PDA.

5. Análisis de las Medidas del PDA

5.1 Regulación de la Leña

El PDA establece una serie de medidas orientadas a la formalización de la producción, distribución y comercialización de la leña.

El PDA exige el cumplimiento de la Norma Chilena Oficial N° 2907/2005 a partir de un año de su puesta en vigencia, de acuerdo a la especificación de “leña seca” establecida en dicha norma, la cual define como leña seca aquella que tiene un contenido de humedad menor o igual a 25% en base seca.

En la evaluación, se asumen los factores de emisión EPA utilizados por Sanhueza et al. (2005) para corregir el inventario de emisiones de MP10 residencial del año 2004. Estos consideran valores para artefactos de combustión residencial a leña, tanto respecto a su tipo: húmeda y seca, cuyos valores pueden ser observados en la tabla N° 8 presentada en la sección 3.2.a) del presente estudio.

Para estimar el impacto de la exigencia de comercialización de leña seca, se recurrió a los antecedentes de la encuesta VITAE (2002), la cual encuentra que un 80% de la leña utilizada en Temuco y Padre Las Casas, tenía una humedad superior al 25% en base seca y no cumplía con la Norma Chilena Oficial N° 2907/2005. Esto implica que el 20% de leña vendida es seca. De esta

manera, el costo incremental de la medida corresponde al costo incremental de proveer leña con una humedad inferior al 25% sobre base seca a los hogares que la requieran.

La efectividad de esta medida depende fuertemente de la fiscalización que se realice sobre su comercialización. Si esta no es efectiva, difícilmente podría asumirse que la totalidad de la leña comercializada y consumida en Temuco y Padre Las Casas tiene un contenido de humedad inferior al 25 sobre base seca. En nuestro análisis, se ha supuesto que hasta el año 2007, el 20% de la leña comercializada en el área de estudio corresponde a leña seca, cifra que aumenta al 40% en el año 2008, al 60% en e año 2009 y al 80% en el año 2010. A partir de este último año la participación de la leña seca en el consumo de mantiene estable. Este supuesto de gradualidad y no-cumplimiento total de la medida (100% consumo de leña seca) se considera razonables, en el entendido que la institucionalidad aún no esta desarrollada, y que en régimen siempre existe un porcentaje de incumplimiento debido a que la fiscalización no es completa. De lo anterior, se desprende que la fiscalización de la medida es un tema clave

Los costos asociados a esta medida se asocian al secado de la leña para obtener leña seca. Lobos et al. (2004a) estiman que el costo de secado, en el que se deberá incurrir para cumplir con los estándares de calidad de la leña alcanza a \$1.371 por metro estéreo (\$2.285 por metro cúbico).

Aplicando los factores de emisión a la serie de emisiones del sector residencial para el período de análisis se obtienen las siguientes reducciones en emisiones de MP10, en conjunto con beneficios sociales. Las Tablas N° 25 y 26 resumen los resultados del análisis:

Tabla N° 25. Reducción en Emisiones MP10, Beneficios y Costos de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m3 MP10 Anual Por Año	Costo (US\$/Año)
2008	202	1.969.528	3	286.996
2009	398	3.876.915	5	586.122
2010	596	5.802.597	8	900.644
2011	597	5.814.986	8	923.519
2012	600	5.838.176	8	945.617
2013	603	5.870.045	8	968.518
2014	604	5.878.907	8	994.432
2015	607	5.908.599	8	1.019.192
2016	609	5.928.625	8	1.044.795
2017	610	5.937.530	8	1.074.239
2018	612	5.962.724	8	1.101.992
2019	615	5.988.813	8	1.130.744
2020	618	6.015.794	8	1.160.511
2021	621	6.043.702	8	1.191.338
2022	622	6.052.061	8	1.227.456

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 26. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	2.393	23.302.202	31	3.642.897	1.522	116.333	6
2013-2017	3.032	29.523.705	40	5.101.176	1.682	128.574	6
2018-2022	3.088	30.063.093	40	5.812.041	1.882	143.863	5
Valor Presente Período 2008-2022	4.069	39.622.063	53	6.719.875	1.65	126.205	6

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 1.651/ton MP10 y una razón de beneficio-coste de 6.

5.2 Prohibición Uso de Chimeneas

Esta medida contempla la adquisición de equipos alternativos de calefacción, para sustituir la función de la chimenea. Se considera como sustituto una estufa doble cámara para el año de implementación de la medida, 2008. El costo del artefacto de combustión se estimó en US\$ 300 según antecedentes del AGIES de la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña. A continuación se detalla la distribución por equipo y sus valores.

Tabla N° 27. Reducción en Emisiones MP10, Beneficios y Costos de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m3 MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	52	526.054	1	48.794	456.951
2009	53	542.317	1	48.794	0
2010	55	558.579	1	48.794	0
2011	55	558.579	1	48.794	0
2012	55	558.579	1	48.794	0
2013	55	558.579	1	48.794	0
2014	55	558.579	1	48.794	0
2015	55	558.579	1	48.794	0
2016	55	558.579	1	48.794	0
2017	55	558.579	1	48.794	0
2018	55	558.579	1	48.794	0
2019	55	558.579	1	48.794	0
2020	55	558.579	1	48.794	0
2021	55	558.579	1	48.794	0
2022	55	558.579	1	48.794	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 28. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	270	2.744.108	4	243.969	456.951	903	69.006	11
2013-2017	275	2.792.896	4	243.969	0	886	67.750	11
2018-2022	275	2.792.896	4	243.969	0	886	67.750	11
Valor Presente Período 2008-2022	414	4.205.590	5	371.130	415.410	896	68.472	11

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 896/ton MP10 y una razón de beneficio-costos de 11.

5.3 Compensación de Emisiones

El PDA plantea evaluar la implementación de sistemas de compensación de emisiones para calderas industriales y de calefacción, y proyectos inmobiliarios.

En relación a las calderas industriales y de calefacción se considera que la exigencia de compensación tendría un bajo impacto sobre el subsector industrial, dada la baja entrada de calderas en el área de Temuco y Padre Las Casas. Por dicha razón, nos centraremos en la evaluación de un sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios.

La complejidad del caso de Temuco y Padre Las Casas radica en dos aspectos que lo diferencian de Santiago: (i) no existen sectores cuyas emisiones se encuentren congeladas y donde una reducción de emisiones que sea generada puede considerarse como permanente; y (ii) la escasa diversidad de métodos de compensación posibles en comparación con la Región Metropolitana, producto de las diferencias existentes en los problemas de contaminación atmosférica de cada una de dichas áreas geográficas.

En lo referente al punto (i) cabe señalar que opciones de congelamiento explícito de emisiones sólo pueden realizarse sin demasiada complejidad en el caso del transporte público y taxis así como en el sector industrial, tal como en el caso de la Región Metropolitana. En el caso del transporte público y taxis, la SEREMI Transporte podría decretar el congelamiento del parque de buses de transporte público, cuestión que actualmente rige en Temuco y Padre Las Casas. Respecto al sector industrial, el bajo número de fuentes industriales facilita el desarrollo de un registro de las fuentes y sus emisiones. No obstante, los sectores anteriormente mencionados sólo representan una parte menor de las emisiones totales dentro del PDA, por lo cual no serían susceptibles de ofrecer toda la reducción de emisiones necesaria para permitir la compensación de fuentes nuevas. En adición, como se verá más adelante, los costos de abatimiento son significativamente más altos que en el resto de los sectores, por lo cual sería una opción muy poco costo-efectiva para la realización de compensaciones de nuevos proyectos inmobiliarios.

De lo anterior, las opciones restantes corresponden a forestación urbana, recambio de artefactos de combustión a leña y aislación térmica.

En el caso de la forestación urbana, esta medida tiene dificultades en su escala de implementación, ya que se requeriría un número muy alto de árboles para realizar una compensación (ver análisis de forestación urbana más adelante), tiene costos de mantención que pueden ser relevantes, y requieren de terreno que muchas veces no está disponible.

La aislación térmica parece ser la opción menos compleja de implementación, dado que sólo requiere acordar con un tercero (o grupo de terceros), la implementación de medidas de aislamiento térmico en un hogar. No obstante, es una opción que resulta altamente costosa en comparación, por ejemplo, del recambio efectivo de estufas.

El recambio de artefactos de combustión a leña por equipos nuevos que cumplan la norma de emisión puede a simple vista ser la alternativa más costo-efectiva. Sin embargo, lo anterior es relativo, ya que en la práctica pueden no significar un congelamiento de las emisiones, que es el objetivo que se busca con la medida de compensación. Si quienes aceptan el recambio de su artefacto de combustión antiguo, hubieran renovado igualmente su artefacto en ausencia de un sistema de compensación, entonces la compensación no es efectiva. Se pueden plantear diferentes alternativas. Una opción sería realizar una compensación aleatoria sobre los artefactos de combustión residencial a leña del parque existente, ello significaría que una parte de dichas compensaciones no es efectiva y ese valor depende del porcentaje que representan en el parque aquellos que renuevan naturalmente sus artefactos de calefacción. Otra opción sería enfocarse sobre aquellos hogares que tienen una menor tendencia a la renovación de artefactos de combustión

a leña: hogares de estrato socioeconómico bajo. No obstante, en este último caso podrían generarse los incentivos a la adquisición de viejos artefactos en hogares que antes no poseían calefactores a leña¹⁴. Finalmente, la opción de compensación de emisiones a través del recambio de artefactos de combustión a leña requiere un correcto sistema de enforcement, es decir, que haga que la compensación se mantenga en el tiempo. Por ejemplo, debe asegurarse que sobre quienes se hizo el recambio de artefactos de combustión a leña no lo revendan y compren un artefacto antiguo en el mercado secundario para su uso.

Todos los elementos anteriormente señalados aumentan los costos de transacción de las compensaciones y reducen la costo-efectividad de la medida. No obstante, no serán evaluados en el análisis económico, ya que no se cuenta con el diseño del sistema. Para fines de nuestro análisis, consideramos la situación óptima en donde no existen problemas de selección adversa y donde no son considerados los costos de transacción, por lo que las estimaciones sobreestiman beneficios (si parte de la compensación no es efectiva) y subestiman costos (no son considerados los costos de transacción). Al respecto cabe señalar que en la Región Metropolitana, los costos de transacción pueden llegar a duplicar los costos de una compensación en el sector industrial, pero claramente existen economías de escala en los costos de transacción para el caso de compensaciones de proyectos inmobiliarios que reducen notablemente dichos costos.

Para estimar los costos de la medida, se utiliza información señalada en el estudio de Ambiente Consultores (2007) para el AGIES de la norma de emisión:

- US\$ 330 para artefacto de calefacción del año 2009
- US\$ 600 para artefacto de calefacción del año 2012
- US\$ 900 para artefacto de calefacción del año 2016

Para estimar la reducción de emisiones asociada a esta medida, se considera para cada año, la emisión de MP10 de un artefacto de combustión residencial que no haya sido renovado versus la emisión de MP10 de un artefacto que cumpla la norma.

- La emisión del artefacto promedio no renovado es estimada como el cociente entre el total de emisiones de cocinas, salamandras, estufas simples y estufas doble cámara no renovadas por su número total para cada año.
- La emisión del artefacto promedio que cumple norma es estimada a partir del consumo promedio ponderado de leña anual para un artefacto promedio por el factor de emisión asociado a la norma de emisión.
- La diferencia entre las emisiones estimadas anteriormente corresponde a la reducción de emisiones generadas a partir del recambio de un artefacto promedio antiguo por uno que cumpla la norma de emisión.

Se consideran como artefactos que puedan ser renovados por calefactores que cumplan la norma de emisión, tanto a las cocinas como a las salamandras, estufas simples y estufas a doble cámara (sin norma de emisión) existentes con anterioridad a la entrada en vigencia de la norma de emisión. Se

¹⁴ Este es un problema similar al enfrentado en el sistema de compensación de emisiones de calderas industriales en la Región Metropolitana dentro del D.S N° 4, donde la asignación de un derecho comerciable generó los incentivos a la sobredeclaración de calderas industriales.

consideran las cocinas dentro de este grupo, ya que como se señaló en la construcción del modelo de estimación de emisiones, aún cuando no sean utilizadas para cocinar por estratos socioeconómicos bajos, si pueden seguir siendo utilizadas como artefacto de calefacción. De ahí, que un hogar pobre que siga utilizando la cocina como calefactor pueda participar del programa de recambio.

El costo del recambio por año para cada artefacto corresponde al valor del artefacto de combustión, anualizado con una tasa del 10% anual y considerando una vida útil de 20 años.

Tabla N° 29. Reducción en Emisiones MP10, Beneficios y Costos de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m3 MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	64	620.110	1	195.099	1.827.087
2009	88	979.325	1	226.586	294.873
2010	110	1.209.505	1	256.852	283.441
2011	142	1.555.026	2	302.304	425.651
2012	155	1.845.120	2	322.594	190.016
2013	167	1.981.944	2	343.567	196.412
2014	188	2.207.345	2	378.129	323.666
2015	201	2.357.139	3	401.045	214.604
2016	212	2.679.118	3	424.289	217.680
2017	222	2.787.966	3	445.699	200.504
2018	230	2.879.497	3	463.663	168.233
2019	238	2.974.301	3	482.227	173.846
2020	247	3.072.460	3	501.400	179.561
2021	256	3.174.115	3	521.207	185.489
2022	271	3.347.409	4	554.970	316.189

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 30. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	558	6.209.087	7,3	1.303.436	3.021.068	2.337	178.578	4,8
2013-2017	990	12.013.511	12,9	1.992.728	1.390.393	2.013	153.879	6,0
2018-2022	1.241	15.447.782	16,2	2.523.467	1.419.186	2.033	155.402	6,1
Valor Presente Período 2008-2022	1.226	14.535.897	16,0	2.622.732	3.363.953	2.140	163.527	5,5

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

5.4 Aislamiento Térmica

Los impactos de una política de aislamiento de la vivienda existente generarían múltiples beneficios para los usuarios de las viviendas, el medio ambiente y la seguridad energética nacional:

- Menor demanda energética país
- Mayor durabilidad de las viviendas¹⁵
- Mayor valor comercial del parque de viviendas
- Empleo generado por implementación del programa
- Empleo indirecto generado por la innovación y desarrollo de productos
- Reducción de los niveles de contaminación intradomiciliaria

Para esta medida se ha analizado información disponible en la propuesta técnica del estudio “Programa de Inversión Pública para Fomentar el Reacondicionamiento Térmico del Parque de Construido de Viviendas” elaborada por Ambientes Consultores, quienes:

- Definen diferentes escenarios de medidas para aislamiento térmica de una vivienda modelo en Temuco.
- Establecen los requerimientos de energía producto de la implementación de diferentes medidas aplicadas a una vivienda modelo en Temuco, considerando calefacción suficiente para que la temperatura mínima sea superior a 14 °C.
- Evalúan los costos de las diferentes medidas de aislamiento térmica.

La siguiente tabla muestra las medidas de acondicionamiento térmico y ahorro energético para diferentes tipos de tratamiento.

Tabla N° 31. Medidas para Aislamiento Térmico y Consumo de Energía

Tratamientos	Sellado infiltraciones	Doble vidrio	Aislante cielo	Aislante muros	calefacción eficiente	consumo kWh/día	ahorro %
ninguno						252	0
a	X				X	186	26,2
b	X		X			178	29,3
c			X	X	X	103	59,1
d		X	X			168	33,3
e	X	X	X	X	X	83	67,1

Fuente: Ambiente Consultores (2006).

Nota: La alternativa C corresponde a la reglamentación térmica

Los costos estimados por Ambiente Consultores para las diferentes medidas de aislamiento térmico son presentados en la siguiente tabla:

¹⁵ Ambiente Consultores señala que la mala aislación de las viviendas en climas con horas de frío, provoca humedad de condensación superficial y/o intersticial en muros y cielos. Esto causa un deterioro de las pinturas, revestimientos interiores de muros y cielos e incluso daños estructurales. Se estima que dicho deterioro puede alcanzar a unos \$150.000 anuales por vivienda, cifra que se ajustará en función de cada zona y tipología de vivienda.

Tabla N° 32. Costos de Aislamiento Térmica, Vivienda Modelo-Temuco

Tratamientos	Costo UF soluciones	Cantidad	Costo total UF	consumo kWh/año	VAN ahorro 10 años UF	ahorro neto UF
Ninguno	0	0	0	45.360	0	0
A	50	1	50	33.480	86	36
B	0,8	70	56	32.040	98	42
c	2,2	70	154	18.540	197	43
d	2,0	70	140	30.240	120	-20
e	3,3	70	231	14.940	244	13

Fuente: Ambiente Consultores (2006)

Ambiente Consultores señala que desde el punto de vista de la movilización de recursos, se estima que un programa de reacondicionamiento que incorpore del orden de unas 1.800.000 a 2.000.000 de viviendas a nivel nacional implicaría inversiones por US\$ 4.000 millones. Para 38.644 viviendas estimadas en Temuco, la inversión sería de alrededor de US\$ 77 millones.

En nuestro caso, se ha estimado el impacto de la implementación de un programa de subsidios a la aislación térmica para viviendas sociales. El programa consistiría de un subsidio de \$ 1 millón por una vez y abarcaría mil hogares por año para un plazo de 10 años entre el 2008 y el 2017.

Considerando los antecedentes de Ambiente Consultores se estimó que el monto del subsidio podría permitir la aislación de muros y cielo, y con ello estimar una reducción del 35% en el consumo de leña, con el consiguiente impacto en reducción de emisiones.

Tabla N° 33. Estimación del Impacto de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m ³ MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	19	278.148	0	221.235	1.851.000
2009	36	538.790	0	442.469	1.851.000
2010	51	781.985	1	663.704	1.851.000
2011	68	1.039.902	1	884.938	1.851.000
2012	84	1.293.825	1	1.106.173	1.851.000
2013	100	1.544.668	1	1.327.407	1.851.000
2014	116	1.797.312	2	1.548.642	1.851.000
2015	132	2.043.185	2	1.769.876	1.851.000
2016	147	2.288.590	2	1.991.111	1.851.000
2017	163	2.532.109	2	2.212.345	1.851.000
2018	161	2.516.604	2	2.212.345	0
2019	160	2.500.877	2	2.212.345	0
2020	158	2.484.993	2	2.212.345	0
2021	157	2.468.992	2	2.212.345	0
2022	156	2.462.828	2	2.212.345	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 34. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m ³ MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m ³)	B/C
2008-2012	257	3.932.651	3	3.318.518	9.255.000	12.898	985.710	1,2
2013-2017	659	10.205.863	9	8.849.380	9.255.000	13.438	1.026.960	1,2
2018-2022	792	12.434.294	10	11.061.726	9.255.000	13.971	1.067.697	1,1
Valor Presente Período 2008-2022	718	11.131.973	9	9.657.115	11.373.594	13.446	1.027.605	1,2

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 13.446/ton MP10 y una razón de beneficio-costo de 1,2.

5.5 Programa de Recambio

Esta medida puede considerarse como una de las más importantes del PDA ya que define cuanto reducirán los artefactos de combustión a leña existentes que no hayan sido naturalmente renovados.

Desde una perspectiva dinámica, el hecho que la norma de emisión sea más exigente y cara en el futuro, podría afectar los incentivos a la renovación en los sectores de ingresos medios y altos. Estos sectores que están más en el margen respecto a las decisiones de cumplimiento de la norma podrían decidir anticipar la renovación a objeto de cumplir con un valor menos exigente. Esto significaría menores costos para los regulados, pero también menores beneficios sociales. Desde un punto de vista metodológico, sería necesario contar con información de elección contingente por parte de los hogares respecto a los escenarios antes mencionados. En la evaluación de la medida no se ha considerado este aspecto, y en cambio, se ha definido un programa de recambio por parte de los agentes regulados.

En el programa, entre los años 2009-2018 se considera un recambio gradual de artefactos de combustión residencial a leña que no hayan salido naturalmente en el período 2008-2022. La cantidad de equipos renovados en el período alcanzaría a 12.125 artefactos y corresponde al 50% de los calefactores (no cocinas) no renovados que existen al año 2022.

Se consideran como artefactos que puedan ser renovados por calefactores que cumplan la norma de emisión, tanto a las cocinas como a las salamandras, estufas simples y estufas a doble cámara (sin norma de emisión) existentes con anterioridad a la entrada en vigencia de la norma de emisión. Se consideran las cocinas dentro de este grupo, ya que como se señaló en la construcción del modelo de estimación de emisiones, aún cuando no sean utilizadas para cocinar por estratos socioeconómicos bajos, si pueden seguir siendo utilizadas como artefacto de calefacción. De ahí, que un hogar pobre que siga utilizando la cocina como calefactor pueda participar del programa de recambio.

Los costos utilizados en el análisis son estimativos y corresponden a los señalados en el estudio de Ambiente Consultores (2007) para el AGIES de la norma de emisión:

- US\$ 330 para artefacto de calefacción del año 2009
- US\$ 600 para artefacto de calefacción del año 2012
- US\$ 900 para artefacto de calefacción del año 2012

Para estimar la reducción de emisiones asociada a esta medida, se considera para cada año, la emisión de MP10 de un artefacto de combustión residencial que no haya sido renovado versus la emisión de MP10 de un artefacto que cumpla la norma.

- La emisión del artefacto promedio no renovado es estimada como el cociente entre el total de emisiones de cocinas, salamandras, estufas simples y estufas doble cámara no renovadas por su número total para cada año.
- La emisión del artefacto promedio que cumple norma es estimada a partir del consumo promedio ponderado de leña anual para un artefacto promedio por el factor de emisión asociado a la norma de emisión.

- La diferencia entre las emisiones estimadas anteriormente corresponde a la reducción de emisiones generadas a partir del recambio de un artefacto promedio antiguo por uno que cumpla la norma de emisión.

El costo del recambio por año para cada artefacto corresponde al valor del artefacto de combustión, anualizado con una tasa del 10% anual y considerando una vida útil de 20 años.

Tabla N° 35. Estimación del Impacto de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m3 MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	0	0	0	0	0
2009	38	401.888	1	50.494	472.876
2010	73	767.863	1	100.989	472.876
2011	110	1.151.306	1	151.483	472.876
2012	156	1.738.889	2	229.167	727.501
2013	203	2.249.863	3	306.851	727.501
2014	250	2.755.538	3	384.534	727.501
2015	297	3.270.164	4	462.218	727.501
2016	349	4.061.660	5	578.743	1.091.252
2017	402	4.658.165	5	695.269	1.091.252
2018	456	5.263.473	6	811.794	1.091.252
2019	457	5.277.248	6	811.794	0
2020	459	5.291.656	6	811.794	0
2021	460	5.306.727	6	811.794	0
2022	460	5.307.073	6	811.794	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 36. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	377	4.059.947	4,9	532.133	2.146.129	1.410	107.761	7,6
2013-2017	581	16.995.389	7,6	2.427.615	2.873.631	4.181	319.568	7,0
2018-2022	792	26.446.177	10,4	4.058.972	3.128.256	5.127	391.826	6,5
Valor Presente Período 2008-2022	1.613	18.230.164	21	2.649.477	3.910.150	1.642	125.527	6,9

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 1.642/ton MP10 y una razón de beneficio-costos de 6,9.

Cabe señalar, que estamos evaluando el diseño óptimo del programa de recambio, pero hay que hacer la salvedad que este instrumento económico sufre los mismos problemas de implementación que los presentados para el caso de la compensación de emisiones. Si quienes aceptan el recambio de su artefacto de combustión antiguo, hubieran renovado igualmente su artefacto en ausencia del programa de recambio, entonces reducción de emisiones generadas no es efectiva. En adición, se requiere de medidas de fiscalización o enforcement que hagan que las reducciones sean efectivas y evitar, por ejemplo, que quienes hicieron recambio de artefactos de combustión a leña, no re-vendan su nuevo artefacto y compren un artefacto antiguo en el mercado secundario para su uso.

Por otro lado, como analizaremos más adelante podrían existir problemas de compatibilidad de incentivos entre la autoridad ambiental y la autoridad gubernamental que provea los fondos para el programa, en relación a los grupos objetivo del programa.

5.6 Regulación de Emisiones del Sector Industrial

La actividad industrial emplazada en el área decretada como saturada se caracteriza por 2 aspectos fundamentales:

- 1) Utilización de manera intensiva de biomasa como combustible en sus actividades productivas. Producto de la combustión de esta, el rango de las concentraciones de PM10 en el efluente son del orden de los 300-800 mg/m3 N, inclusive en calderas nuevas de biomasa se han registrado valores por sobre los 500 mg/m3 N⁽¹⁶⁾.
- 2) La utilización de biomasa como combustible posee grandes ventajas desde el punto de vista de la disminución de costos operacionales para el sector industrial, considerando que el valor de una tonelada de vapor generada a partir de esta, es del orden de 2 a 3 veces más

¹⁶ Según conversación con profesional de CONAMA VIII Región, Cristian Urrutia.

barata, que la generada con FO6 o gas. Adicionalmente existe en la zona una gran cantidad de industrias asociadas a la manufactura de productos derivados de la madera, lo que conlleva a que se genere una cantidad importante de aserrín y viruta, que es utilizada como combustibles en sus instalaciones o comercializada a terceros, generándose un mercado secundario asociado a estos residuos de proceso.

La normativa propuesta para fuentes puntuales y grupales tiene como objetivo permitir la reducción de las emisiones del sector, considerando un criterio de gradualidad en la aplicación de las restricciones impuestas y de equidad al considerar su baja participación respecto al total de las emisiones de PM10.

Tabla N° 37. Propuesta de Normativa en el Sector Industrial

	Categorías de Fuentes Existentes		
	Fuentes Puntuales	Fuentes Grupales	Calderas de Calefacción Grupal
Año de cumplimiento	Concentración MP (mg/m ³ N)		
3 ^{er}	112	112	112
8 ^{vo}	112	56	56
	Categorías de Fuentes Nuevas		
	Fuentes Puntuales	Fuentes Grupales	Calderas de Calefacción Grupal
Año de cumplimiento	Concentración MP (mg/m ³ N)		
1 ^{ero}	112	56	56

Inicialmente, durante un período de tiempo de 3 años, la normativa facultaría a los industriales a seguir operando con la tecnología y combustible actual, permitiendo a los regulados contar con un plazo razonable para la optimización de sus procesos de combustión, la búsqueda de tecnologías de equipos de control acordes a su realidad, su evaluación y puesta en marcha. Del mismo modo, permitiría la evaluación de la factibilidad de operar con combustibles alternativos menos contaminantes en industrias donde sea posible realizar el reemplazo.

A partir de los tres años de entrada en vigencia del PDA, la implementación de sistemas de control de PM10 de bajo costo de inversión y operación (ciclones, multiciclones, etc), y otros de costo medio de operación (como scruber, lavadores venturi, filtros de mangas, etc.), permitirían el cumplimiento de los valores propuestos (112 mg/m³ N) lo que representa una importante reducción de las emisiones, del orden del 50% o más, respecto de la condición actual.

Para las calderas de calefacción se estableció la necesidad de efectuar una regulación inicial de las concentraciones con un valor de 112 mg/m³ a partir del tercer año (2011), lo anterior enfocado en las fuentes que utilizan leña como combustible, considerando disminuir las emisiones del sector mediante el mejoramiento del proceso de combustión al utilizar leña seca. Cabe señalar que las

fuentes de esta categoría que utilizan combustibles líquidos y gaseosos (FO6, FO5, FO2 y gas) no presentarían inconvenientes para el cumplimiento de este nivel de exigencia. Del mismo modo, a los ocho (8) años de entrada en vigencia el PDA se exigirá el cumplimiento de 56 mg/m³, lo que obliga a realizar un recambio de los artefactos a leña, aserrín o viruta por calderas de combustible líquido o gaseoso, ó la implementación de medidas de abatimiento.

Para la evaluación de esta medida se ha optado por considerar en ambos casos, calderas industriales y de calefacción, la incorporación de tecnología de abatimiento para el cumplimiento de las normas de emisión propuestas. Para el caso de calderas industriales se utiliza el costo de multiciclones y para calderas de calefacción el costo de precipitadores electrostáticos.

Los costos estimados y reducción asociada al sector son mostrados en la siguiente Tabla.

Tabla N° 38: Efectos de la Medida

Año	Reducción	Beneficio	Impacto	Costo Social	Costo Privado
2001	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0
2003	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0
2008	0,0	0	0,0	0	0
2009	0,0	0	0,0	0	0
2010	0,0	0	0,0	0	0
2011	29,7	289.186	0,4	159.446	0
2012	29,7	289.186	0,4	159.446	0
2013	29,7	289.186	0,4	159.446	0
2014	29,7	289.186	0,4	159.446	0
2015	29,7	289.186	0,4	159.446	0
2016	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2017	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2018	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2019	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2020	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2021	38,2	371.950	0,5	329.024	0
2022	38,2	371.950	0,5	329.024	0

Fuente: Elaboración propia sobre la base de antecedentes de CONAMA IX Región (2007)

Tabla N° 39. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	59	578.372	1	318.893	318.893	5.369	410.290	1,8
2013-2017	166	1.611.457	2	1.136.387	1.136.387	6.866	524.760	1,4
2018-2022	191	1.859.748	2	1.645.120	1.645.120	8.613	658.259	1,1
Valor Presente Período 2008-2022	171	1.668.378	2	1.201.379	1.201.379	7.011	535.845	1,4

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 7.011/ton MP10 y una razón de beneficio-costos de 1,0. Cabe señalar que al hacer el análisis desagregado de la medida, entre calderas industriales y calderas de calefacción, los beneficios son mayores que los costos sólo en el caso de la caldera industrial. Para el caso de las calderas de calefacción, la rentabilidad social de la medida es entonces negativa.

5.7 Prohibición Quemados Agrícolas

Los cultivos pueden llegar a generar una cantidad importante de masa residual. Por ello, el uso del fuego en actividades agrícolas y forestales o quemados agrícolas y forestales se ha transformado en la forma más común de eliminar los desechos vegetales. Lobos et al. (2004b) señala que las ventajas del fuego como instrumento de eliminación de desechos agrícolas y madereros se sustenta en:

- No existen alternativas económicas que permitan realizar una utilización de este material para algún otro fin.
- No existe una demanda para uso energético.
- Los desechos tienen un nivel nutricional que es bajo, lo que impide su uso como forraje de ganado.
- Existe la imposibilidad económica para modificar y mejorar la actual forma de cultivo de la tierra, debido a que posteriormente es necesario adicionar al suelo altas cantidades de fertilizante nitrogenados para descomponer este material el suelo.

Para estimar el volumen de desechos a retirar se consideran las cantidades promedio por cultivo en cereales, las cuales se estiman en 6 toneladas de materia seca por hectárea y 25 toneladas de materia seca por hectárea en el caso de los desechos forestales.

Las quemados autorizadas se desarrollan preferentemente en el mes de marzo, tal como lo muestra el siguiente análisis de las estadísticas históricas de quemados agrícolas de CONAF:

Tabla N° 40. Superficie de Quemadas Agrícolas y Forestales por Mes, Temuco y Padre Las Casas, 2001-2006

Mes	Quemas Agrícolas	Quemas Forestales
Enero	0,2%	0,0%
Febrero	0,0%	0,0%
Marzo	75,7%	18,0%
Abril	21,6%	45,4%
Mayo	1,0%	4,6%
Junio	0,1%	4,9%
Julio	0,4%	0,1%
Agosto	0,5%	2,1%
Septiembre	0,1%	4,2%
Octubre	0,1%	4,9%
Noviembre	0,1%	0,5%
Diciembre	0,2%	15,1%
Total	100,0%	100,0%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos CONAF 2001-2006.

La medida establece la restricción de quemadas agrícolas entre el 1° de abril y 30 de septiembre de cada año. Se observa que en dicho período se concentra el 23,6% de las quemadas agrícolas y el 61,3% de las quemadas forestales durante los últimos 6 años. Se ha considerado esta información para estimar la reducción en emisiones asociada a la medida.

En relación al costo de la medida, Lobos et al. (2004b) estima que el costo de recolección y venta de residuos de las actividades agrícolas y forestales alcanza a \$ 31.000/ton ó US\$ 57/ton de desecho. Lo anterior es un gasto relevante para los agricultores, por lo cual, racionalmente ellos preferirían evitar dicho costo y adelantar las quemadas agrícolas para antes del 1° de abril. Por ello, no se estima costos para la medida. Los resultados de las medidas se presentan a continuación.

Tabla N° 41. Reducción en Emisiones MP10, Beneficios y Costos de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m ³ MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	25,0	240.745	0,3	0	0
2009	24,3	233.978	0,3	0	0
2010	23,6	227.210	0,3	0	0
2011	22,9	220.443	0,3	0	0
2012	22,2	213.676	0,3	0	0
2013	21,5	206.909	0,3	0	0
2014	20,8	200.141	0,3	0	0
2015	20,1	193.374	0,3	0	0
2016	19,4	186.607	0,3	0	0
2017	18,7	179.839	0,2	0	0
2018	18,0	173.072	0,2	0	0
2019	17,3	166.305	0,2	0	0
2020	16,6	159.537	0,2	0	0
2021	15,9	152.770	0,2	0	0
2022	15,2	146.003	0,2	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 42. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Periodo)	Beneficio (US\$/Periodo)	Reducción ug/m ³ MP10 valor anual por periodo	Costo Social (US\$/Periodo)	Costo Privado (US\$/Periodo)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m ³)	B/C
2008-2012	118	1.150.936	2	0	0	0	0	N.D
2013-2017	101	979.537	1	0	0	0	0	N.D
2018-2022	83	808.138	1	0	0	0	0	N.D
Valor Presente Período 2008-2022	162	1.579.836	2	0	0	0	0	N.D

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 0/ton MP10 y una razón de beneficio-costo de 0.

5.8 Arborización Urbana

La arborización urbana puede afectar la contaminación atmosférica a través de la remoción directa de contaminantes; las emisión de químicos atmosféricos por medio de la vegetación o prácticas de manejo vegetal; alterando los microclimas urbanos; y alterando el uso de la energía (Nowak, 1998).

Algunas partículas pueden ser absorbidas por los árboles, si bien la mayor parte de las partículas interceptadas son retenidas en la superficie de la planta. La vegetación pasa a ser un retenedor temporal de las partículas, como estas pueden ser resuspendidas a la atmósfera, limpiadas por la lluvia, ó depositadas en el suelo con la caída de las hojas. Factores que afectan la remoción de contaminantes por los árboles incluyen la superficie de hojas saludables, concentraciones de contaminantes locales y condiciones meteorológicas locales.

- El análisis de la cubierta de árboles en Santiago revela que la cobertura herbácea es la superficie más común de la ciudad.
- La cobertura promedio de árboles para la ciudad fue de un 15%, concentrándose en espacios urbanos de altos ingresos.
- La vegetación cubre el 16,5 por ciento de la superficie del Gran Santiago y está compuesta por 160 especies diferentes, aunque sólo el 12 por ciento corresponde a árboles nativos. Gran parte del resto fueron importados desde Estados Unidos (30 por ciento) y Australia (18 por ciento).
- El número estimado de árboles alcanzaba a 6.245.000 árboles.
- La densidad promedio de árboles es 64.5 árboles/hectárea, con la mayor parte siendo árboles de diámetro pequeño¹⁷.
- Dentro del período julio 1997 a junio 1998, se estimó que los árboles removieron 2.249 toneladas de material particulado (una tasa de 15.1 g/m²).
- Un árbol grande remueve 3.6 kg. de material particulado al año, 30 veces más que un árbol pequeño.
- Las tasas de remoción de contaminantes difieren entre ciudades debido a la cantidad de contaminación atmosférica, duración de la temporada de cobertura de hojas en los árboles, precipitaciones y otros factores meteorológicos.

Para estimar la efectividad de la medida de arborización urbana se ha considerado un programa de arborización, es decir, la plantación de 3.000 árboles al año. Dado que los árboles plantados en programas de arborización son inicialmente pequeños, se asume el factor de remoción de material particulado para un árbol pequeño; 0,12 kg/árbol.

¹⁷ Un árbol de gran tamaño puede remover hasta 30 veces más contaminación que un árbol pequeño.

Tabla N° 43. Reducción en Emisiones MP10, Beneficios y Costos de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m3 MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	0,4	3.505	0,0	4.746	44.444
2009	0,7	7.011	0,0	9.492	44.444
2010	1,1	10.516	0,0	14.238	44.444
2011	1,4	14.021	0,0	18.983	44.444
2012	1,8	17.526	0,0	23.729	44.444
2013	2,2	21.032	0,0	28.475	44.444
2014	2,5	24.537	0,0	33.221	44.444
2015	2,9	28.042	0,0	37.967	44.444
2016	3,2	31.548	0,0	42.713	44.444
2017	3,6	35.053	0,0	47.458	44.444
2018	4,0	38.558	0,1	52.204	44.444
2019	4,3	42.063	0,1	56.950	44.444
2020	4,7	45.569	0,1	61.696	44.444
2021	5,0	49.074	0,1	66.442	44.444
2022	5,4	52.579	0,1	71.188	44.444

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 44. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Periodo)	Beneficio (US\$/Periodo)	Reducción ug/m3 MP10 valor anual por periodo	Costo Social (US\$/Periodo)	Costo Privado (US\$/Periodo)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m3)	B/C
2008-2012	5	52.579	0,1	71.188	222.222	13.183	1.007.497	0,7
2013-2017	14	140.211	0,2	189.834	222.222	13.183	1.007.497	0,7
2018-2022	23	227.844	0,3	308.480	222.222	13.183	1.007.497	0,7
Valor Presente Periodo 2008-2022	17	167.406	0,2	226.652	338.048	13.183	1.007.497	0,7

Nota: valores acumulados en cada periodo para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida tiene una costo-efectividad de US\$ 13.183/ton MP10 y una razón de beneficio-costos de 0,7.

5. 9 Plan Maestro de Transporte

En el caso de las fuentes móviles, no existe ninguna definición del Plan Maestro de Transporte. En general, la regulación del sector transporte ha sido uno de los problemas más complejos de manejar técnica y políticamente en Chile.

En el caso del PDA, se ha propuesto a la contraparte técnica un análisis de la aplicabilidad de un límite a la antigüedad de los buses de transporte público en Temuco de 15 años. Nos centramos en el transporte público, ya que es el subsector que aporta en mayor medida a las emisiones de MP y es el único potencialmente congelable en número dentro de la zona de estudio. Cualquier medida en otros tipos de fuentes móviles será mucho menos efectiva y eficiente (vehículos particulares) ó políticamente menos deseable (camiones). La experiencia de la RM refleja dichos aspectos: el transporte público fue el primer sector regulado y es el más avanzado en términos tecnológicos mientras que el transporte de carga ha sido el más complejo y de difícil inclusión.

Se asume que los buses existentes tienen una vida útil de 25 años, por lo que establecer una antigüedad máxima de 15 años acelera la renovación del parque de buses existentes. En este contexto, el escenario con medida asume existirán costos incrementales: adelantamiento de inversión, el cual es anualizado para un período de 10 años (la diferencia entre la vida útil asumida y la medida) con una tasa de descuento del 10% anual.

La siguiente tabla muestra las emisiones del parque de buses urbanos para diferentes categorías según categoría: buses con fecha de fabricación anterior a 1995 y que no cumplen norma; buses fabricados entre 1995 y 1998 que cumplen la norma de emisión EURO I y buses fabricados a partir de 1999 que cumplen la norma EURO II.

**Tabla N° 45. Emisiones del Parque de Buses Urbanos según Norma de Emisión, Temuco
Situación sin y con PDA
(Ton/año)**

Año base	Escenario Base				Escenario con Medida			
	Sin Norma	EURO I	EURO II	Total Escenario Base	Sin Norma	EURO I	EURO II	Total con Medida
2006	18	4	1	25	18	4	1	25
2007	18	4	1	26	18	4	1	26
2008	18	4	1	27	18	4	1	27
2009	18	4	1	28	2	4	6	14
2010	18	4	1	29	0	4	7	13
2011	18	4	1	30	0	4	7	13
2012	17	4	2	31	0	2	8	13
2013	16	4	2	30	0	1	8	13
2014	13	4	3	28	0	0	9	13
2015	10	4	4	26	0	0	9	13
2016	6	4	5	23	0	0	9	13
2017	4	4	6	21	0	0	9	14
2018	2	4	6	20	0	0	9	14
2019	0	4	7	18	0	0	9	15
2020	0	2	8	17	0	0	9	15
2021	0	1	8	17	0	0	9	16
2022	0	0	9	17	0	0	9	17

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de la SEREMI Transporte.

Para estimar los costos de esta medida se ha considerado el hecho que la medida de limitar la antigüedad máxima de un bus de transporte urbano en Temuco y Padre Las Casas implica un adelantamiento de la inversión en 10 años. Si se considera que un bus EURO II tiene un costo de inversión de aproximadamente US\$ 80.000, ello implica un costo anual de US\$ 4.990 por bus. En adición, dado que existe una renovación natural del parque, la reducción de emisiones será decreciente a partir de algún año (en este caso el año 2014), por lo que los mayores costos de la medida se ven contrastados con los menores beneficios por renovación. La Tabla N° 46 resume el impacto de la medida:

Tabla N° 46. Impacto de la Medida

Año	Reducción (Ton/Año)	Beneficio (US\$/Año)	Impacto ug/m ³ MP10 Anual Por Año	Costo Social (US\$/Año)	Costo Privado (US\$/Año)
2008	0,0	0	0	0	0
2009	13,7	131.478	0,2	2.320.731	19.416.832
2010	15,7	151.238	0,2	2.579.243	2.162.888
2011	16,6	159.860	0,2	2.737.875	1.327.226
2012	17,5	168.184	0,2	3.084.516	2.900.236
2013	17,4	167.346	0,2	3.431.157	2.900.236
2014	15,5	149.034	0,2	3.683.793	2.113.731
2015	13,2	126.427	0,2	3.683.793	0
2016	9,1	87.656	0,1	3.683.793	0
2017	7,0	67.494	0,1	3.683.793	0
2018	5,1	49.442	0,1	3.683.793	0
2019	2,7	26.131	0,0	3.683.793	0
2020	1,8	17.135	0,0	3.683.793	0
2021	0,8	7.476	0,0	3.683.793	0
2022	0,0	0	0,0	3.683.793	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 47. Resumen de Indicadores para la Medida

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m ³ MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m ³)	B/C
2008-2012	64	618.762	0,8	10.722.365	25.807.182	168.728	12.894.971	0,06
2013-2017	62	605.792	0,8	18.166.331	5.013.967	291.988	22.315.014	0,03
2018-2022	10	101.497	0,1	18.418.967	0	1.766.989	135.041.247	0,01
Valor Presente Período 2008-2022	72	701.441	0,9	19.593.795	21.000.996	271.987	20.786.486	0,04

Nota: valores acumulados en cada período para las variables: reducción, beneficio, impacto y costo.

La medida es poco efectiva y eficiente, ya que tiene una costo-efectividad de US\$ 271.987/ton MP10 y una razón de beneficio-costos de 0,04. Esta opción de medida resulta ser la menos costo-efectiva hasta ahora y no resultaría recomendable su implementación.

- **Resumen de Indicadores**

A continuación se presenta una tabla resumen con los indicadores para cada una de las medidas directas del PDA que han sido evaluadas. No se incorpora la propuesta de limitar la antigüedad del parque de buses de transporte urbano en Temuco, pero se hace una discusión sobre posibles alternativas de implementación.

**Tabla N° 48. Resumen de Indicadores para Medidas del PDA
(Todas las cifras en Valor Presente para el Período 2008-2022)**

Año	Reducción (Ton/Período)	Beneficio (US\$/Período)	Reducción ug/m ³ MP10 valor anual por período	Costo Social (US\$/Período)	Costo Privado (US\$/Período)	C/R (US\$/Ton)	C/I (US\$/ug/m ³)	B/C
Programa de Arborización Urbana	17	167.406	0,2	226.652	338.048	13.183	1.007.497	0,7
Norma de Emisión Fuentes Estacionarias	171	1.668.378	2	1.201.379	1.201.379	7.011	535.845	1,4
Prohibición Quemadas Agrícolas	162	1.579.836	2	0	0	0	0	N.D
Uso de Leña Seca	4.069	39.622.063	53	6.719.875	6.719.875	1.651	126.205	6
Prohibición Chimeneas	414	4.205.590	5	371.130	415.410	896	68.472	11
Compensación de emisiones	1.226	14.535.897	16	2.622.732	3.363.953	2.140	163.527	6
Programa de Aislación Térmica	718	11.131.973	9	9.657.115	11.373.594	13.446	1.027.605	1
Programa de recambio de artefactos	1.613	18.230.164	21	2.649.477	3.910.150	1.642	125.527	7

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se desprende que a excepción de la arborización urbana, todas las medidas son eficientes (razón beneficio/costo > 1). Destaca la prohibición de chimeneas como una medida eficiente pero que no genera una reducción significativa de las emisiones dentro del período en comparación con las otras medidas asociadas a combustión residencial a leña.

En general, las medidas asociadas al sector de combustión residencial a leña son las que presentan un mayor potencial de reducción de emisiones. Estas medidas deberían ser consideradas como indispensables para el cumplimiento de las metas del PDA.

Se destaca la exigencia de comercialización de leña seca, la cual genera la mayor reducción de emisiones posibles en el período 2008-2022, con casi un 50%. Después se observan como

esenciales para el cumplimiento de las metas del PDA a las medidas de compensación de emisiones y el programa de subsidio para recambio de artefactos antiguos de combustión a leña.

En relación al Plan Maestro de Transporte, se evaluó que la medida de limitación de la antigüedad para el parque existente es una medida para nada costo-efectiva. Por lo tanto, surge a inquietud a la luz de la experiencia de la Región Metropolitana, visualizar opciones para el congelamiento o reducción de las emisiones en el sector transporte. No obstante, como ya se analizó con anterioridad, debemos partir de la premisa que el único subsector que es regulable en términos efectivos corresponde al sistema de buses de transporte público¹⁸.

Una opción inicial podría ser congelar el número de buses dentro del sistema, algo que de hecho, ha ocurrido implícitamente durante los últimos años al comparar los datos del inventario de emisiones del año 2000 preparado por CENMA y las cifras actuales del parque de buses de la SEREMI de Transporte. Ello prácticamente replicaría el escenario base simulado en la evaluación de la medida de limitación de la antigüedad de los buses.

Una segunda opción sería el retiro de buses muy antiguos mediante un sistema del tipo scrapping o de reemplazo por bus nuevo. Esta opción requeriría que el Estado debiera desembolsar recursos para el retiro o reemplazo de buses antiguos, lo cual no resultaría atractivo en términos de costo-efectividad en comparación con un programa de recambio de artefactos de combustión residencial a leña. Por esta razón, sería más rentable socialmente invertir recursos públicos en el recambio de artefactos de combustión a residencial a leña que en renovación del parque de buses.

Una tercera opción sería ordenar el sistema de transporte público tal como se ha estado realizando en la Región Metropolitana desde principios de los años ochenta. Esto significaría la generación de competencia entre operadores, a través de un sistema de licitación o concesión, en donde la tecnología del bus podría ser uno de los parámetros con puntuación. El ordenamiento del sistema de transporte público también debería evaluar el número óptimo de buses que sería necesario para satisfacer la demanda local de transporte. Lo anterior resulta muy importante en términos de aporte en reducción de emisiones. Como es común en sistemas de transporte donde opera el libre acceso de operadores, el número de operadores es mayor que el óptimo y la sobre-inversión lleva a una disipación de las rentas económicas del negocio. Lo anterior es parcialmente cierto en sistemas donde no existe libre acceso, pero el número de operadores es superior al óptimo. Es necesario hacer los estudios pertinentes, pero es posible que el número de operadores (buses) en el sistema de transporte público sea mayor al óptimo, y un sistema de licitación que tendiera al número óptimo de buses podría ser una política win-win: mejor servicios, menor número de buses y más limpios, y rentas económicas para los operadores. A nuestro juicio, esta pareciera ser la mejor opción para regular las emisiones del transporte público.

• **Costos de las Medidas Indirectas para el Sector Público**

El PDA de Temuco y Padre Las Casas requiere de un soporte institucional por parte del estado y de medidas complementarias no tecnológicas que apoyen el logro del cumplimiento de las metas de calidad del aire.

¹⁸ Ya señalamos que el transporte privados con vehículos livianos genera una proporción menor de las emisiones de sector, corresponde a un número elevado de fuentes lo que dificulta su fiscalización, y cualquier opción de restricción o tecnológica sería poco costo-efectiva por lo tanto.

Los costos anualizados por programa público e institución responsable son mostrados en la siguiente Tabla:

**Tabla N° 49. Costos de Medidas Indirectas y Programas Públicos
(US\$/Año)**

Medida Indirecta	Institución	Costo Anualizado
Diseño Instrumentos Económicos	CONAMA	2.655
Modelo de Pronóstico	SEREMI SALUD	38.201
Estudios Complementarios	CONAMA	16.151
Plan Maestro	SEREMI TRANSPORTE	22.645
Regulación Estufas	CONAMA	13.545
Fiscalización	SEREMI SALUD	125.968
Monitoreo	SEREMI SALUD	78.875
Campaña	SERMIE SALUD	46.929
Regulación humedad leña	CONAMA	8.889
Fiscalización Quemadas	CONAF	37.037
Estudio BPA Quemadas	CONAF	9.259
Quemadas Aire Libre	SEREMI SALUD	31.111
Programa de Apoyo Leña Seca	CONAF	38.889
Proyectos INNOVA Eficiencia Energética	CORFO	20.370
Programa de Mejoramiento Estufas	CORFO	120.370
Campaña Sensibilización Aislación Térmica	MINVU	14.815
Capacitación Construcción Sustentable	MINVU	2.778
Campaña Sensibilización Educación	MINEDUC	9.259
Incorporación Temática Contaminación	MINEDUC	11.111
Capacitación Profesores	MINEDUC	6.481
Campaña Preventiva Otoño-Invierno	CONAMA	13.889
Estrategia Comunicacional	CONAMA	11.111
Total		680.340

Se observa que los mayores costes corresponden al programa de Fiscalización de la SEREMI de Salud, lo cual considera la fiscalización de fuentes fijas, residenciales y aspectos relacionados al control de la leña húmeda. Otro gasto importante corresponde al Programa de Mejoramiento de Estufas de CORFO, el cual apoyaría a los productores de estufas o calefactores a leña para el desarrollo de artefactos que cumplan los límites de emisión más exigentes que podrían ser exigidos por la norma de emisión en etapa de implementación. Finalmente, destaca el Programa de Monitoreo de las concentraciones ambientales en Temuco y Padre Las Casas, dentro del cual se considera la implementación de un sistema de monitoreo para la fracción fina del material particulado, lo cual podría apoyar una gestión más efectiva, en términos de impacto sobre la población, de la contaminación del aire en la zona.

6. Evaluación de Escenarios del PDA

A continuación se presenta la evaluación económica de los escenarios integrados de medidas, es decir, la evaluación del PDA.

Se consideran dos escenarios, uno con implementación completa de las medidas antes evaluadas en el PDA y otro sin financiamiento público, lo que significaría la no implementación de las medidas de programas de subsidio para aislación térmica en viviendas sociales y el recambio de artefactos de combustión residencial a leña antiguos.

6.1 Escenario 1, Cumplimiento Total PDA

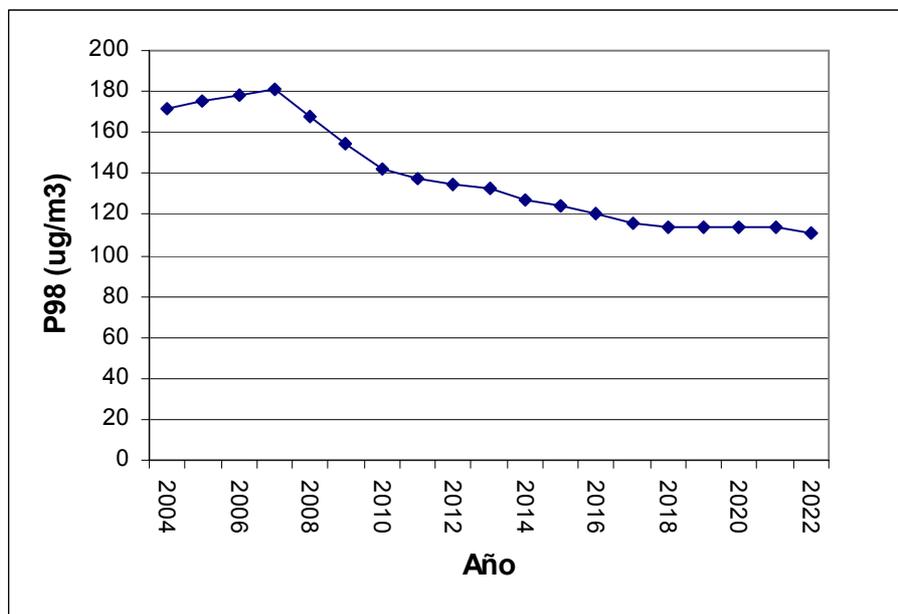
A continuación se presentan los resultados del escenario de cumplimiento total de las medidas del PDA.

Tabla N° 50. Proyección de Emisiones Escenario PDA
(cifras en ug/m³)

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	162,4	3,4	0,1	0,0	167
2009	0,9	149,6	3,4	0,1	0,0	154
2010	0,9	137,3	3,4	0,1	0,0	142
2011	0,9	132,8	3,4	0,1	0,0	137
2012	0,9	130,2	3,4	0,1	0,0	135
2013	0,9	127,5	3,4	0,1	0,0	132
2014	0,9	122,4	3,4	0,1	0,0	127
2015	0,9	119,8	3,4	0,1	0,0	124
2016	0,9	115,5	3,4	0,1	0,0	120
2017	0,9	111,4	3,4	0,1	0,0	116
2018	0,9	109,2	3,4	0,1	0,0	114
2019	0,9	109,3	3,4	0,1	0,0	114
2020	0,9	109,3	3,4	0,0	0,0	114
2021	0,9	109,4	3,4	0,0	0,0	114
2022	0,9	106,4	3,4	0,0	0,0	111

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico N° 6. Evolución Concentraciones de MP10, Percentil 98



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 51. Resultados, Escenario 1 de Cumplimiento Total PDA

Año	Conc. Anual (ug/m3 MP10)	Reducción MP10 (Ton MP/Año)	% Reducción Año Base	BENEFICIOS (Millones de US\$/Año)				COSTOS (Millones de US\$/Año)		BSN (MMUS\$/Año)
				Salud	Visibilidad	Ahorro Energía	Total	Costos Sector Privado	Costos Estado	
2004	50	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2005	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2006	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2007	52	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2008	47	390	3,85%	3,6	0,2	0,1	3,9	0,5	1,3	2,1
2009	44	664	10,59%	6,2	0,3	0,3	6,8	0,9	1,2	4,7
2010	41	932	17,07%	8,7	0,4	0,4	9,5	1,2	1,6	6,7
2011	40	1044	20,19%	9,7	0,5	0,5	10,7	1,4	1,7	7,5
2012	39	1115	21,63%	10,4	0,5	0,8	11,7	1,5	2,1	8,1
2013	38	1186	23,06%	11,0	0,5	1,0	12,5	1,5	2,4	8,6
2014	37	1258	25,76%	11,7	0,6	1,1	13,3	1,6	2,7	9,1
2015	36	1326	27,15%	12,3	0,6	1,2	14,1	1,6	3,0	9,6
2016	35	1400	29,68%	13,0	0,6	1,7	15,3	1,8	3,3	10,2
2017	34	1465	31,87%	13,6	0,7	1,8	16,1	1,9	3,6	10,6
2018	33	1516	33,05%	14,1	0,7	1,9	16,7	1,9	3,8	11,0
2019	33	1523	33,07%	14,1	0,7	2,0	16,8	2,0	3,8	11,0
2020	33	1531	33,08%	14,2	0,7	2,3	17,2	2,0	3,8	11,4
2021	33	1540	33,09%	14,3	0,7	2,4	17,4	2,1	3,8	11,5
2022	33	1551	34,70%	14,4	0,7	2,5	17,6	2,2	3,8	11,6
Valor Presente (tasa de descuento del 10%)				77,4	3,7	7,8	89,0	10,9	18,2	59,9

Fuente: Elaboración propia.

- El escenario considera las siguientes medidas:
 - Uso de leña seca en un 80% a partir del 2010.
 - Prohibición del uso de chimeneas.
 - Sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios.
 - Programa de subsidio al recambio de artefactos de combustión residencial para renovar el parque existente.
 - Programa de aislación térmica para viviendas sociales existentes.
 - Norma de emisión para calderas industriales y calderas de calefacción.
 - Programa de Arborización
 - Prohibición de quemas agrícolas entre abril y septiembre de cada año.

De la tabla y gráfico anterior se puede deducir:

- Los beneficios del PDA, en términos de mejora en visibilidad y mejor salud para la población, superan sus costos de implementación, con un valor presente de los beneficios sociales netos de US\$ 59,9 millones en un período de 15 años (2008-2022). La razón beneficio/costo alcanza un valor de 3.1, lo que reflejaría que el PDA en su conjunto es un instrumento eficiente en el logro de los objetivos de mejora en la calidad del aire.
- La concentración anual promedio se ve reducida significativamente dentro del período: desde 50 ug/m³ en el año 2004 hasta 33 ug/m³ en el año 2022.
- El cumplimiento de la norma diaria de calidad del aire podría lograrse en un plazo de 9 años.
- La situación presentada corresponde al escenario óptimo, donde no existe problemas en el cumplimiento de las medidas. La medida de prohibición de uso de leña húmeda aparece como la más efectiva en lograr una reducción de las emisiones y es implementada con gradualidad hasta alcanzar una cobertura del 80% en el año 2010. En adición, se considera la correcta implementación de un sistema de compensación de emisiones y el programa de subsidio al recambio de artefactos de combustión residencial a leña. Al respecto, como ya se señaló anteriormente, la efectividad de estas dos últimas medidas dependen crucialmente del diseño del instrumento. Un mal diseño de los instrumentos podría generar problemas de selección adversa y riesgo moral que afectarían los objetivos de congelamiento o reducción de emisiones de MP10.

El problema de selección adversa vendría dado por la aplicación de las medidas de compensación y recambio sobre hogares con artefactos antiguos que en ausencia de tales medidas igual hubieran realizado a renovación del artefacto. Frente a esto, se podría optar por enfocar estos instrumentos sobre agentes económicos que señalicen una menor disposición a la renovación del artefacto de combustión residencial: hogares de menores ingresos, los cuales si bien realizan un menor consumo de leña tienen artefactos más antiguos y peores en términos de emisión. Comparativamente, al enfocarnos en dicho sector, se lograrían compensaciones menos costosas y recambios con mayores reducciones de emisión en el óptimo. Sin embargo, podrían generarse problemas de riesgo moral que afectasen la efectividad de los instrumentos, lo que a continuación analizamos.

El problema de riesgo moral, en el caso de los instrumentos analizados, vendría dado por el hecho que expost (a posterior) la compensación ó recambio de artefactos de calefacción, los hogares de estrato socioeconómico bajo pudieran realizar la reventa del artefacto nuevo y recomprar un artefacto antiguo, no reduciendo las emisiones y generando un gasto inefectivo para el Estado. Sería necesario estudiar alternativas de arreglos contractuales que permitieran solucionar estos problemas de incentivos, lo cual sin duda podría encarecer la aplicación de ambos instrumentos. No obstante, dada la alta relación beneficio/costo que presentan en el óptimo tales medidas, los mayores costos de transacción difícilmente podrían incrementar el costo de estos instrumentos de una manera que pudiesen hacerlos ineficientes.

- En adición a los beneficios y costos cuantificados, existen beneficios y costos no cuantificados que son necesarios de señalar:
 - Beneficios por reducción de las tasas de incendios por mejor regulación de la leña y los artefactos de combustión.
 - Costos de transacción relacionados a la implementación del sistema de compensación de emisiones y el programa subsidios para el recambio de artefactos antiguos de combustión residencial a leña.
 - Beneficios por menor presión y conservación del bosque nativo producto del menor consumo de leña para calefacción.
 - Beneficios por mayor durabilidad de las viviendas asociado al programa de subsidios a la aislación térmica.
 - Beneficios por mayor valor comercial de las viviendas del programa de aislación térmica.
 - Beneficios por reducción de los niveles de contaminación intradomiciliaria. Este último es un factor relevante que en conjunto con la contaminación atmosférica potencian la generación de casos de morbilidad y mortalidad.
- Finalmente, es necesario precisar que la evaluación económica desarrollada depende de supuestos, algunos de los cuales pueden ser muy importantes respecto al cumplimiento de las metas del PDA. Existen variables donde existe incertidumbre y que pueden afectar de diferente manera el cumplimiento de las metas y la evaluación económica del PDA. Dentro de estas variables podemos señalar las siguientes:
 - La tasa de recambio de cocinas con objetivo de calefacción. Una mayor tasa de recambio aumenta los beneficios del PDA y acelera el cumplimiento de las metas de calidad del aire.
 - La efectividad de la fiscalización para la comercialización de leña seca. Una menor efectividad de la fiscalización reduce el potencial de reducción de emisiones de la medida que aporta más al proceso de descontaminación del aire en Temuco y Padre Las Casas.

- La implementación de la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña y los límites de emisión para artefactos que finalmente se aplicarán. Esta norma de emisión, que no forma parte del PDA sino que de su escenario base, tiene una vital importancia para el logro de las metas del PDA y lo afecta directamente a través de diferentes efectos:
 - Fija el nivel base de emisiones del PDA. Una norma de emisión menos estricta aumentaría el nivel basal de emisiones en el escenario sin PDA y haría más difícil el cumplimiento de las metas de calidad del aire.
 - Establece el potencial de reducción de emisiones de un artefacto nuevo respecto a uno antiguo en un sistema de compensación de emisiones o en un programa de subsidio al recambio de artefactos de combustión residencial a leña. Mientras mayores sean las emisiones permitidas por la norma para artefactos nuevos, mayor será la compensación exigida, menor será el potencial de reducción de emisiones, y más cara será la compensación. Por otro lado, en el mismo contexto, menor sería la efectividad de un programa de recambio de artefactos de combustión residencial a leña (un artefacto nuevo más limpio reduce más emisiones en un programa de recambio), aún cuando menores sean los costos.
- Diseño final del sistema de compensación de emisiones y el programa de subsidios para el recambio de artefactos de combustión residencial a leña. Como ya se ha analizado con anterioridad, es necesario solucionar problemas de selección adversa y riesgo moral presentes en la implementación de un sistema de compensación de emisiones y un programa de recambio de artefactos de combustión a leña. Si dichos problemas persisten en mayor o menor magnitud, menor será la efectividad real de los instrumentos económicos antes mencionados.

6.1 Escenario 2, Sin Financiamiento

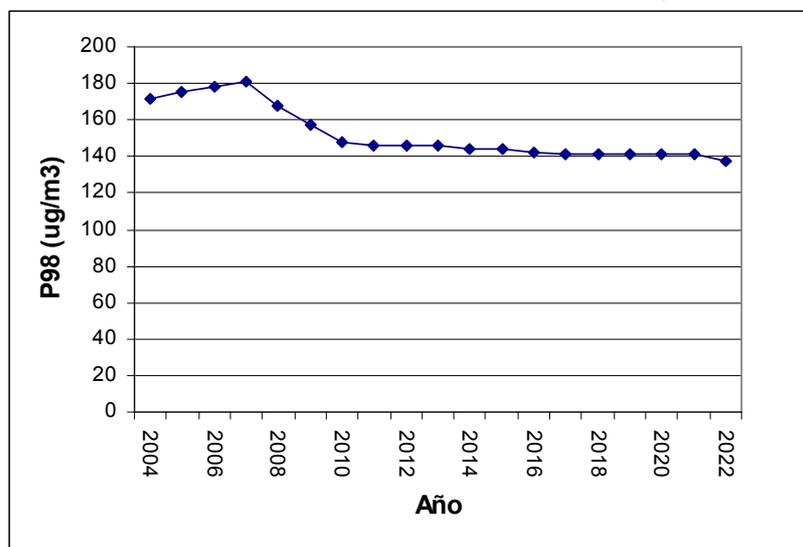
A continuación se presentan los resultados del escenario sin financiamiento de las medidas asociadas a los programas de aislación térmica y subsidios para el recambio del PDA.

Tabla N° 52. Evolución Concentraciones de MP10, Percentil 98

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	162,4	3,4	0,1	0,0	167
2009	0,9	151,4	3,4	0,1	0,0	156
2010	0,9	140,7	3,4	0,1	0,0	145
2011	0,9	137,9	3,4	0,1	0,0	142
2012	0,9	137,2	3,4	0,1	0,0	142
2013	0,9	136,6	3,4	0,1	0,0	141
2014	0,9	133,4	3,4	0,1	0,0	138
2015	0,9	132,8	3,4	0,1	0,0	137
2016	0,9	130,6	3,4	0,1	0,0	135
2017	0,9	128,6	3,4	0,1	0,0	133
2018	0,9	128,6	3,4	0,1	0,0	133
2019	0,9	128,7	3,4	0,1	0,0	133
2020	0,9	128,8	3,4	0,0	0,0	133
2021	0,9	128,9	3,4	0,0	0,0	133
2022	0,9	125,7	3,4	0,0	0,0	130

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 7. Evolución Concentraciones de MP10, Percentil 98



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 53. Resultados, Escenario 2 Sin Financiamiento Medidas de Aislación Térmica y Programa de Recambio en el PDA

Año	Conc. Anual (ug/m3 MP10)	Reducción MP10 (Ton MP/Año)	% Reducción Año Base	BENEFICIOS (Millones US\$/Año)				COSTOS (Millones US\$/Año)		BSN (MM US\$/Año)
				Salud	Visibilidad	Ahorro Energía	Total	Costos Privados	Costos Estado	
2004	50	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2005	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2006	51	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2007	52	0	0,00%	0	0	0,0	0	0,0	0,0	0
2008	48	371	3,35%	3,4	0,2	0,0	3,6	0,5	1,1	2,0
2009	46	592	8,71%	5,5	0,3	0,1	5,9	0,9	0,7	4,3
2010	43	813	13,96%	7,5	0,4	0,1	8,1	1,2	0,8	6,0
2011	42	876	15,80%	8,1	0,4	0,2	8,7	1,4	0,7	6,6
2012	42	890	15,74%	8,3	0,4	0,3	9,0	1,5	0,8	6,8
2013	42	904	15,69%	8,4	0,4	0,4	9,2	1,5	0,7	6,9
2014	42	922	16,96%	8,6	0,4	0,4	9,4	1,6	0,7	7,1
2015	42	935	16,93%	8,7	0,4	0,4	9,5	1,6	0,7	7,1
2016	41	951	17,94%	8,8	0,4	0,6	9,9	1,8	0,7	7,3
2017	41	959	18,63%	8,9	0,4	0,6	10,0	1,9	0,7	7,3
2018	41	967	18,67%	9,0	0,4	0,6	10,1	1,9	0,7	7,4
2019	41	975	18,72%	9,1	0,4	0,7	10,1	2,0	0,7	7,4
2020	41	984	18,76%	9,1	0,4	0,7	10,3	2,0	0,8	7,5
2021	41	994	18,81%	9,2	0,4	0,7	10,4	2,1	0,8	7,5
2022	40	1009	20,51%	9,4	0,5	0,7	10,5	2,2	0,8	7,6
Valor Presente (tasa de descuento del 10%)				57,8	2,8	2,6	63,2	10,9	5,9	46,3

Fuente: Elaboración propia.

- El escenario considera las siguientes medidas:
 - Uso de leña seca en un 80% a partir del año 2010
 - Prohibición del uso de chimeneas
 - Sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios
 - Norma de emisión para calderas industriales y calderas de calefacción.
 - Programa de Arborización
 - Prohibición de quemas agrícolas entre el período abril-septiembre.
- Los beneficios del PDA, en términos de mejora en visibilidad y mejor salud para la población, superan a sus costos tecnológicos de implementación, con un valor presente de los beneficios sociales netos de US\$ 46,3 millones en un período de 15 años (2008-2022).
- La concentración anual promedio se ve reducida significativamente dentro del período: desde 50 ug/m3 en el año 2005 hasta 40 ug/m3 en el año 2022.
- Se hace notar que bajo este escenario, no hay cumplimiento de la norma de calidad del aire diaria para MP10. Simulaciones considerando una tasa de recambio natural de cocinas como calefactor para el estrato socioeconómico bajo que sea mayor a las utilizadas en nuestro modelo permiten mejorar el escenario bases sin PDA y la proyección de concentraciones de las medidas. En particular, si el número de cocinas en el estrato bajo se redujera en un 31% en el año 2022 respecto al 2004, podría lograrse el cumplimiento del percentil 98 en el año 2022 sin las medidas de aislación térmica y el programa de recambio de artefactos de combustión residencial a leña.

Resulta preciso señalar que la proyección realizada presenta las mismas limitaciones que las señaladas en la sub-sección anterior: existen variables donde existe incertidumbre y que pueden afectar de diferente manera el cumplimiento de las metas y la evaluación económica del PDA. En particular los límites establecidos en la norma de emisión para artefactos de combustión residencial a leña y el diseño óptimo de un sistema de compensación de emisiones. Estas dos variables van en sentido contrario respecto a la tasa de recambio natural de cocinas como artefactos de calefacción y serían un obstáculo en el logro de las metas de calidad del aire si no existe financiamiento para los programas de subsidios a la aislación térmica y recambio de artefactos de combustión residencial.

7. Evaluación del Impacto Social del PDA

Los impactos sociales del PDA se encuentran estrechamente ligados a las consecuencias de cada una de sus medidas generales sobre precios, empleo, competitividad y efectos distributivos asociados a los costos y beneficios del PDA.

El análisis del impacto social de las medidas del PDA se realiza implementando los siguientes componentes de análisis:

- Realizar una matriz de impacto, para cada medida, de los posibles efectos en variables sociales tales como empleo, precios, competitividad y distribución del ingreso.
- Concentrar el análisis respecto a los potenciales impactos en medidas de alto impacto distributivo.
- Identificar la distribución de beneficios y costos para la población, emisores y Estado de las medidas del PDA.

7.1 Matriz de Impacto Social del PDA

A continuación se presenta una matriz donde se evalúan cualitativamente los principales impactos sociales del PDA de Temuco y Padre Las Casas.

Tabla N° 54: Matriz de Impacto, medidas PDA

Medida	Empleo	Precio	Competitividad	Distribución del Ingreso
Restricción a la comercialización de leña húmeda.	Impacto negativo sobre el empleo informal.	Aumento del precio promedio de la leña para consumo residencial.	Leña se hace relativamente menos competitiva respecto a combustibles alternativos. No obstante, sigue siendo el combustible más económico para calefacción residencial.	Aumento de la carga tributaria media para sectores de la población de menores ingresos por concepto del IVA.
Subsidio a la renovación de artefactos de combustión de uso residencial	Empleo generado por implementación del programa. Empleo indirecto generado por la innovación y desarrollo de productos.	Posibles economías de escala en la producción tenderían a hacer bajar el precio.	Fomento competitivo a fabricantes o importadores de artefactos de calefacción de menor emisión.	Dependiendo del diseño del subsidio, este puede apoyar a sectores de ingreso medio o ingreso bajo. (ver análisis más adelante)

Medida	Empleo	Precio	Competitividad	Distribución del Ingreso
Programa de aislamiento térmico a viviendas existentes	No existe impacto identificable	No existe impacto identificable	No existe impacto identificable	Subsidio SERVIU restringe impacto de mayor costo de la vivienda en sectores de menores ingresos.
Prohibición del uso de chimeneas	No existe impacto identificable	Aumento de la demanda por otros mecanismos de calefacción incide en mayor precio de los mismos dependiendo del magnitud de aumento en la demanda. Impacto es sólo por una vez (un año).	No existe impacto identificable	Medida afecta mayormente a estratos de ingresos medio-alto debido a la necesidad de cambiar calefacción hacia estufas a leña.
Norma de emisión para calderas industriales y comerciales	Si los costos de inversión son altos, es posible que la empresa reduzca el empleo del factor trabajo (sustitución capital-trabajo).	Mayores costos marginales de abatimiento aumentan el precio del producto, pero depende de la magnitud de los costos de abatimiento respecto al resto de los costos de la empresa.	Reduce la competitividad de las empresas del área Temuco y Padre Las Casas respecto a otras empresas del mismo rubro en la región y resto del país (e excepción de zonas con planes de descontaminación)	No se percibe un mayor impacto distributivo a través de precios, si el mercado de bienes y servicios en Temuco y Padre Las Casas es competitivo.
Compensación de emisiones para calderas industriales y comerciales	Mayor costo de entrada en el área de Temuco y Padre Las Casas podría inhibir la instalación de	Al igual que en el caso de la norma de emisión, el costos de la compensación	El área de Temuco y Padre Las Casas se hace comparativamente menos atractiva para la instalación	No se percibe un mayor impacto distributivo a través de precios, si el

Medida	Empleo	Precio	Competitividad	Distribución del Ingreso
	industrias y afectar al empleo proyectado. El impacto depende de la magnitud de los costos de compensación relativo al proyecto de inversión.	puede eventualmente incrementar el precio del producto, pero depende de la magnitud de los costos de abatimiento respecto al resto de los costos de la empresa.	de industrias.	mercado de bienes y servicios en Temuco y Padre Las Casas es competitivo
Control de las quemadas agrícolas	No existe impacto identificable	No existe impacto identificable. Si el mercado de cereales y provisión de leña es competitivo,	No existe impacto identificable.	No existe impacto identificable.
Regulación sector transporte	Costos de regulación podrían racionalizar la cantidad de buses en Temuco y Padre Las Casas, afectando el empleo en el sector.	Mejoras tecnológica o restricción en el número de buses de transporte público de Temuco y Padre Las Casas podría incidir en un alza del valor del boleto.	Transporte público es un monopolio concesionado, por lo cual no enfrenta competencia directa.	Alza en valor del boleto de transporte público incide negativamente en sectores de menores ingresos.
Arborización urbana	Planes de arborización podrían aumentar el empleo temporal.	Arborización urbana es un bien público cuyo costo de provisión es asumido por el estado y municipios.	Extensión de áreas verdes y arborización aumentan el atractivo de barrios intervenidos. Áreas verdes son atributos que hedónicamente aumentan la disposición a	Aumento en calidad de vida si proyectos de arborización son realizados en sectores de menores ingresos.

Medida	Empleo	Precio	Competitividad	Distribución del Ingreso
			pagar por el arriendo y venta de viviendas existentes.	
Compensación de emisiones de proyectos de desarrollo inmobiliario	No existe impacto identificable	Aumento del costo de la vivienda.	Incentivos a reducir el tamaño de los proyectos a objeto de evitar compensación de emisiones.	Efecto negativo sobre nuevas viviendas sociales SERVIU. Posible efecto positivo sobre viviendas sociales SERVIU existentes si compensación financia renovación de artefactos de combustión a leña en escenario de inexistencia de subsidio.

Fuente: Elaboración propia.

7.2 Análisis del Subsidio al Recambio de Artefactos de Combustión a Leña

Cualquier subsidio debe ser implementado a través de un programa sectorial que debe ser aprobado por el Ministerio de Hacienda, con la excepción de cuando los fondos provengan de fondos regionales. En este análisis nos centraremos en el subsidio a recambio de artefactos de combustión residencial a leña. En relación al subsidio a la aislación térmica de viviendas existentes, la propuesta del PDA establece la focalización sobre viviendas sociales priorizadas a través del programa de mejoramiento de la vivienda. Los beneficios sociales para este sector social son evidentes, tal como se puede revisar en el análisis de la medida en el capítulo 5 de este estudio. En adición, no se presentarían problemas de selección adversa y riesgo moral, por lo cual las complejidades del diseño del subsidio son mucho menores que en el caso del recambio de calefactores a leña.

Como señalamos anteriormente, pueden existir problemas de incentivos entre autoridades respecto a la implementación de un subsidio. Por un lado, la autoridad fiscal buscaría minimizar los costos de

implementación del programa sujeto a una meta definida. Por otro lado, la autoridad ambiental podría buscar un diseño que maximice la capacidad de reducción de emisiones.

Desde la perspectiva de la autoridad fiscal, el diseño del instrumento puede ser variado pero debe cumplir con ser costo-efectivo. En este sentido, inicialmente resultaría más apropiado implementar un subsidio sobre sectores que tuvieran menores costos de renovación de artefactos de combustión a leña, tales como aquellos con ingresos medios. De ello, se deduce que un subsidio a la renovación de artefactos de combustión a leña para sectores de menor ingreso podría no ser costo-efectivo dado que debería ser un subsidio por casi la totalidad del artefacto (se podría recuperar ciertos recursos monetarios con la reventa del artefacto antiguo en zonas sin problema de contaminación). En este sentido, sería más efectivo utilizar recursos en incentivar la adopción de tecnología para aquellos hogares que están indiferentes entre utilizar el artefacto de combustión existente o uno nuevo con menores emisiones (y mayor eficiencia energética). En otras palabras, el impacto en las emisiones por peso gastado en el programa será mayor si estos recursos están destinados a este grupo 'marginal'. No obstante, resulta difícil hacer la selección del grupo marginal, ya que para el recambio de artefactos de combustión a leña pueda reducir emisiones, ese grupo marginal no debe ser parte de los hogares que naturalmente renovarían su calefactor.

De lo anterior, a primera vista pareciera no ser recomendable que la elegibilidad a un subsidio al recambio esté determinada por las condiciones socioeconómicas de los hogares, pero existen problemas de selección adversa.

Como contrapartida, existen argumentos que podrían sustentar la implementación de un subsidio a sectores de menores ingresos. Si bien el objetivo principal del subsidio debería ser reducir las emisiones y no proporcionar una asistencia social a hogares de escasos recursos, es posible que ambos objetivos sean complementarios. Si los hogares de escasos recursos usan artefactos con mayores factores de emisiones (como, por ejemplo, las salamandras simples o cocinas a leña), entonces para reducir las emisiones puede ser conveniente dirigir el subsidio hacia este grupo social. Además, ellos son los hogares que tendrían un menor incentivo a la renovación natural de calefactores, por lo cual se podría evitar el problema de selección adversa. No obstante, un punto a solucionar sería el problema de riesgo moral, la posible reventa de los artefactos nuevos.

Asimismo, un mecanismo de crédito blando a los productores no es aplicable en este caso ya que, al subsidiar la oferta, es posible que no se traspase a los consumidores el beneficio del subsidio, quedando como utilidades de las empresas de la cadena de distribución. Los créditos son aplicables generalmente en el caso de inversiones tales como equipamiento que reduzca las emisiones de MP en el usuario final.

7.3 Resumen de Distribución de Beneficios y Costos del PDA

Para la distribución de los beneficios y costos entre los diferentes agentes: emisores, población y Estado, se ha realizado el siguiente procedimiento:

- Se asignan los beneficios en salud entre el Estado y la Población.
 - Para ello se considera que todo el componente de des-utilidad asociado al valor económico total de la mortalidad o una patología de morbilidad corresponde a un beneficio del usuario del sistema de salud.

- Respecto al resto de los beneficios directos por menores costos en productividad y de tratamiento, estos fueron asignados al Estado según la participación de FONASA en el número total de afiliados en el sistema de salud (cerca del 80% en Temuco y Padre Las Casas). El resto fue asignado a la población.
- De lo anterior se obtuvo que el 23% de los beneficios en salud son asumidos por el Estado y el restante 77% ciento a la población.
- Los beneficios para los emisores corresponden a los ahorros en consumo de leña producto de la adquisición de artefactos de combustión más eficientes energéticamente.
- La totalidad de los beneficio en visibilidad son asignados a la población.
- Se realiza una asignación de costos considerando si las medidas estaban contenidas dentro de los sectores señalados.

A continuación se presenta el resumen de distribución de beneficios y costos del PDA:

**Tabla N° 55. Distribución de Beneficios y Costos del PDA
Temuco y Padre Las Casas, 2008-2022
(Valor Presente en Millones de US\$, con una tasa de descuento del 10%)**

Sector-Beneficios	Emisores	Estado	Población	Total
Industria y comercio	0,0	0,4	1,3	1,7
Agricultura	0,0	0,4	1,2	1,6
Hogares	7,8	16,4	61,6	85,8
Transporte	0,0	0,0	0,0	0,0
Total Beneficios	7,8	17,1	64,1	89,0
Sector-Costos	Emisores	Estado	Población	Total
Industria y comercio	1,2	1,9	0,0	3,1
Agricultura	0,0	1,1	0,0	1,1
Hogares	9,7	14,7	0,0	24,4
Transporte	0,0	0,5	0,0	0,5
Total Costos	10,9	18,2	0,0	29,1
Beneficio Social Neto	-3,1	-1,1	64,1	59,9

Nota: el redondeo de los valores genera que las sumas no sean exactas
Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte de los beneficios son asumidos por parte de la población (71%), seguido por el Estado (20,5%) y los emisores (8,5%). Respecto a los costos, el Estado debe asumir el 59% del total de costos producto de la implementación de medidas indirectas de gestión ambiental (fiscalización, monitoreo, programas sectoriales, etc.) y de subsidios en los programas de aislación térmica y recambio de artefactos antiguos de combustión residencial a leña. Los beneficios sociales estimados son mayores a los costos para el caso del Estado y la población (beneficio social neto > 0), no así para el caso de los emisores.

Los hogares son el sector que asume la mayor proporción de beneficios sociales y costos. Es así como este sector concentra el 95% de lo beneficios y el 83% de los costos incurridos en el PDA,

con una relación rentabilidad social claramente positiva. Por el contrario, en el resto de los sectores (industria y comercio, agricultura, hogares y transporte), los beneficios son menores que los costos estimados.

Referencias

Alberini, A., Harrington, W., y V. McConnell: “Determinants of participation in accelerated vehicle-retirement programs”, *RAND Journal of Economics*, Vol. 26, N° 1.

Calfucura, E. (2001): Análisis General del Impacto Económico y Social del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana. CONAMA Región Metropolitana.

Cifuentes, L. (1999): Evaluación de beneficios en salud de la revisión de la Resolución N° 1215 del Ministerio de Salud. Trabajo realizado para CONAMA.

Cifuentes, L. (2000): Beneficios en Salud producto del Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana. Informe elaborado para CONAMA Región Metropolitana.

Cifuentes, L. y J.P Montero (2000): “Generación de Instrumentos de Mitigación y Compensación de Emisiones Orientados al Control del Impacto Ambiental de Nuevas Actividades en la Región Metropolitana de Santiago”, estudio realizado para CONAMA Región Metropolitana.

Cifuentes, L. y J.P Montero (2001): “Diseño de Instrumentos Económicos Aplicados para el Control de la Contaminación Atmosférica en la Región Metropolitana”, estudio realizado para CONAMA Región Metropolitana.

CENMA ”Mediciones meteorológicas y de calidad de aire en Temuco y Rancagua para la obtención de antecedentes técnico científico para la generación de la norma de calidad primaria para material particulado fino MP2.5”, 2001

CONAMA, “Inventarios de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Regiones V, VI y IX de Chile“, CENMA-CONAMA, 2000

CONAMA, (1997): Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana.

CONAMA, (2003): Reformulación del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana.

Figuroa, E., y E. Calfucura (2002): “Mercados para la regulación ambiental de países en desarrollo: el caso de Chile”, Trabajo de Investigación, Departamento de Economía, Universidad de Chile.

Hahn, R. (1989). “Economic prescriptions for environmental problems: How the patient followed the doctor's orders.” *Journal of Economic Perspectives* 3: 94-114.

Lobos, M. et al. (2004a): “Generación de Antecedentes para la Implementación de un Sistema Nacional de Certificación de Leña”. Informe preparado para CONAMA Región de la Araucanía.

Lobos, M. (2004b): "Consultoría de Apoyo para el Mejoramiento de la Calidad de la Leña y la Implementación de Medidas del Plan de Gestión del Aire de Temuco y Padre Las Casas". Informe preparado para CONAMA: Región de la Araucanía.

Sanhueza, Pedro et al. (2004): "Diseño de escenarios para apoyar la gestión del aire en Temuco y Padre Las Casas". Preparado para CONAMA IX Región.

Sanhueza, Pedro et al.(2005): "Identificación de una relación entre las emisiones de material particulado y la concentraciones de material particulado en las comunas de Temuco y Padre Las Casas". Preparado para CONAMA IX Región.

Universidad de Chile (2004): "Desarrollo de un Sistema de Gestión de la Vegetación Urbana con Fines de Descontaminación Atmosférica y de Apoyo a la Toma de Decisiones a Nivel Municipal". Proyecto FONDEF D00I 1078.

Universidad de Chile (2006): "Diagnóstico del Mercado de la Leña". Preparado para la Comisión Nacional de Energía.

Tietenberg, T. (1998): "Ethical Influences on the Evolution of the US Tradable Permit Approach to Air Pollution Control", *Ecological Economics*, Vol.24, N° 2 y 3.

VITAE, "Encuesta del uso de la leña en Temuco y Padre las Casas." CONAMA IX 2001.

Anexo 1. Metodologías de Evaluación de Beneficios

(a) Beneficios en salud

Para estimar los beneficios sociales de los menores efectos en salud se utiliza el método de la función de daño, el cual se basa en:

- Estimación del cambio de emisiones de contaminantes.
- Estimación del cambio de concentraciones ambientales de los contaminantes que producen efectos en la salud.
- Estimación del cambio en el número de efectos en exceso debido a los cambios en concentraciones ambientales utilizando funciones dosis-respuesta.
- Valoración social del cambio en los efectos en exceso, basado en la disposición a pagar de la sociedad por reducir cada uno de los efectos.

La aplicación del método de la función de daño requiere datos locales de población, tasas de incidencia de efectos y cambio en concentraciones atmosféricas. Todos los datos locales se encuentran disponibles de diversas fuentes tales como el Ministerio de Salud, CONAMA IX Región, y el Instituto Nacional de Estadísticas.

Por otro lado, es necesario incorporar las relaciones dosis–respuesta, que son el resultado de estudios epidemiológicos, cuyo análisis proporciona el valor de la pendiente de la curva dosis-respuesta ó el riesgo relativo para una variación de la concentración del contaminante; conjuntamente con otra serie de características tales como la existencia o no existencia de un umbral, la forma funcional de la relación, y las poblaciones afectadas. Las funciones dosis-respuesta serán seleccionadas de estudios actualmente disponibles, tanto nacionales como extranjeros.

La valorización de los efectos en la población está basada en el concepto de la disposición a pagar del consumidor, la que muestra para este caso, cuanto es la cantidad de dinero que el individuo estaría dispuesto a pagar por percibir la mejora en salud, es decir, el monto de dinero frente al cual está indiferente entre poseer el dinero o experimentar la mejora.

Esta disposición a pagar, es separada en tres componentes:

- El costo del tratamiento del efecto adverso (que corresponde a los gastos médicos).
- La productividad perdida debido a la ocurrencia del efecto (representan las pérdidas de ingresos de las personas afectadas)
- La disutilidad que experimenta la persona debido a la ocurrencia del efecto (muestra la disminución en el bienestar de la persona).

Para evaluar los efectos sobre la salud humana se considera la información de población y tasas bases del estudio Universidad de Chile (2006). Las tasas bases de las admisiones hospitalarias corresponden a una actualización de la información de los Egresos Hospitalarios del Ministerio de Salud del 2003, por lo que en el estudio de la Universidad de Chile (2005) se realiza una actualización de dichas tasas al año 2005.

Para calcular los beneficios del PDA, estimamos el daño en salud provocado por una ton/año de material particulado respirable (MP10). Para ello, desarrollamos el siguiente procedimiento:

- Se utilizan funciones dosis-respuesta provenientes del estudio “Urban Air Quality and Human Health in Latin America and the Caribbean” elaborado por Luis Cifuentes, Alan Krupnick, Raúl O’Ryan y Michael Toman. En dicho documento se resumen estimaciones de incremento en mortalidad y morbilidad por aumentos de 10 ug/m³ en las concentraciones de MP10.
- Con dicha información y las tasas base, se determina el número de casos en mortalidad y morbilidad generados por la contaminación, es decir, se utiliza la concentración del año 2004 (50 ug/m³) y se estima el número de casos que se producirían si la contaminación fuera cero. Los casos en exceso producto de la contaminación son valorados utilizando la información de Calfucura (2006) corregida por diferencial de ingresos entre la Región Metropolitana y Temuco según antecedentes del estudio señalado en el párrafo anterior.
- Con ello se estima el daño en salud producto de la contaminación para el año 2005. Considerando las estimaciones de emisiones de MP10 para dicho año realizadas en el estudio, se determina el costo medio en salud por tonelada de MP10 que luego se utiliza en el estudio

Los resultados del proceso anterior son presentados en las tablas siguientes:

Tabla N° A1.1: Estimación de efectos en salud

Tipo Caso	Porcentaje de aumento en casos por aumento en 10 ug/m ³ de MP10	Tasas Base	Valor Unitario (US\$/caso)
Mortalidad	0,43%	1.288	697.889
Bronquitis crónica en adultos	10,00%	378	51.979
Ataques de asma en adultos	1,50%	989.890	6
Admisiones al hospital por enfermedades cardiovasculares	1,70%	560	3.248
Admisiones al hospital por enfermedades respiratorias	1,25%	982	1.504
Días de actividad restringida	2,60%	646.000	30
Días de pérdida trabajo	5,20%	400.906	30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° A1.2: Estimación de efectos en salud

Tipo Caso	Casos debido a contaminación	Daño en Salud (Millones US\$/Año)
Mortalidad	27	18,6
Bronquitis crónica en adultos	181	9,1
Ataques de asma en adultos	71.272	0,4
Admisiones al hospital por enfermedades cardiovasculares	46	0,1
Admisiones al hospital por enfermedades respiratorias	59	0,1
Días de actividad restringida	80.621	2,4
Días de pérdida trabajo	100.066	3,0
Total		US\$ 34,1

Fuente: Elaboración propia.

Si se considera el daño anual provocado por la contaminación para un nivel de concentración de 50 ug/m³ de MP10 y las toneladas de material particulado respirable estimadas para el año 2004, se puede estimar un daño medio de US\$ 709.776 por ug/m³ de MP10 y US\$ 9.287 por tonelada de MP10 emitida.

(b) Beneficios en Visibilidad

Las reducciones de visibilidad se deben al efecto de ‘scattering’ de la luz producido por partículas de diámetros entre los 0.1 y 1 micrones, por lo que el componente responsable de la disminución de visibilidad corresponde a la fracción fina PM2.5. En Sánchez et al. (1998) se realiza una evaluación de los beneficios por mejoras en visibilidad producto del PPDA de la Región Metropolitana. El experimento realizado simula el impacto de una reducción del 50% de las emisiones al año 1997 para cumplir con la meta de calidad del aire. Esta reducción corresponde a 42 ug/m³ de MP10.

El estudio de valoración contingente realizado encuentra que la disposición media a pagar por tal mejora en la visibilidad alcanza a US\$ 0,73 mensuales (dólares del año 1998). Para transferir dicho valor a Temuco y Padre Las Casas se considerará: (i) la diferencia en concentraciones de MP10; y (ii) la diferencial de ingreso per-cápita entre la Región Metropolitana y la IX Región. La elasticidad ingreso asumida corresponde a un valor unitario, consistente con supuestos de transferencias de beneficios realizados en estudios de contaminación atmosférica (Cifuentes, 1999).

El daño medio en visibilidad por ug/m³ de MP10 es estimado en US\$ 525.000 y corresponde a la valorización de una cantidad de hogares equivalente a 5,1 millones de habitantes. Se obtiene el daño marginal en visibilidad por ug/m³ de MP10 por habitante en Santiago. Si se multiplica dicho valor por la cantidad de concentración de MP10 en el año 2004 para Temuco (50 ug/m³) se obtiene el daño en visibilidad por habitante en Temuco y Padre Las Casas en dicho año. Dicho valor se multiplica por el número de hogares en el área en estudio y se obtiene un valor de US\$ 1.718.097 en el año 2005. Dividiendo dicho valor por las toneladas estimadas, se obtiene un daño medio en visibilidad de US\$ 450 por tonelada de MP10 en Temuco y Padre Las Casas.

Anexo 2.

El Sistema de compensación de emisiones de la Región Metropolitana

A2.1 Compensación de emisiones del SEIA en la Región Metropolitana

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana de 1997 (PPDA), incorporó dentro del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) un programa de compensación de emisiones para nuevas actividades. Esta regulación ambiental establece que cualquier nuevo proyecto que ingrese a la Región Metropolitana de Santiago y que deba someterse al SEIA, compensará el 150% del total de sus emisiones para aquellos contaminantes donde se superen ciertos límites de emisión establecidos por el PPDA¹⁹. Las emisiones corresponden tanto a descargas directas del proceso productivo como a descargas indirectas asociadas a fuentes ligadas al funcionamiento de cada proyecto²⁰.

De esta manera, desde entonces las nuevas actividades que ingresan al SEIA y cuyas emisiones superen los límites permitidos de emisiones de material particulado respirable (PM10), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) que establece el PPDA, deben compensar en 150% sus emisiones²¹.

En la Tabla 13 se muestra los niveles máximos de emisión permitidos para los distintos contaminantes para los proyectos que ingresan al SEIA en la región Metropolitana.

Tabla N° A2.1
Niveles máximos permitidos para proyectos que ingresan al SEIA
en la Región Metropolitana

Contaminante	Nivel Máximo Permitido
	(ton/año)
MP10	10
CO	100
NOx	50
COV	100
SOx	150

Fuente; PPDA Región Metropolitana (1998).

El procedimiento de aplicación de las compensaciones de emisión tiene varias etapas. En una primera etapa, los proyectos presentan una estimación de sus emisiones directas e indirectas ante la

¹⁹ Los contaminantes considerados son material particulado respirable (MP10), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), monóxido de carbono (CO), y compuestos orgánicos volátiles (COV).

²⁰ Las emisiones indirectas corresponden al aumento global de los kilómetros recorridos producto de la mayor longitud de los viajes hacia y desde los proyectos inmobiliarios hacia las zonas comerciales y el centro de la ciudad.

²¹ En un inicio la exigencia de compensación de emisiones era 120%, no obstante la modificación del PPDA realizada en el año 2000 aumentó dicho monto a 150%.

Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana. Este organismo público es quién coordina el proceso de evaluación de impacto ambiental y certifica que las estimaciones de emisión se rijan por las metodologías de generación de inventarios de emisión reconocida por la autoridad. CONAMA Región Metropolitana ha establecido una serie de criterios para estimar las emisiones directas e indirectas asociadas a los proyectos que ingresan al SEIA:

- Las emisiones asociadas al proceso de construcción de proyectos inmobiliarios deben ser mitigadas, no compensada. No se exige la compensación de emisiones asociadas a las actividades residenciales y comerciales dentro del área geográfica del proyecto, pues la exigencia se aplica solamente a las emisiones ocasionadas por el transporte.
- Se contabilizan las emisiones asociadas al aumento de la cantidad de kilómetros recorridos por el sistema de transporte público y privado asociado a proyectos ubicados fuera del casco urbano de Santiago (Anillo Américo Vespucio).

En una segunda etapa, cuando las estimaciones de emisión han sido certificadas por la autoridad ambiental, se exige que el proyecto presente un plan de compensación de emisiones para aquellos contaminantes donde se superen los límites de emisión (ver Tabla A2.1).

En adición, se aplica una serie de criterios para la materialización de las compensaciones. Primero, cuando deba compensarse más de un contaminante, deberá considerarse el efecto neto de los distintos programas de compensación sobre los otros contaminantes que requieren ser compensados. Segundo, las reducciones de emisión para contaminantes no obligados a compensar no pueden ser ahorradas para su posterior venta o uso. Tercero, el cumplimiento de los compromisos de compensación son responsabilidad de cada proyecto, el cual debe realizar toda la tramitación necesaria ante los organismos públicos a objeto de demostrar que las compensaciones son efectivas.

El programa de compensación implementado es equivalente a uno, donde los derechos de propiedad están asignados implícitamente a las fuentes existentes. Por lo mismo, a excepción del caso de calderas industriales, la línea base de emisión sobre la cual se estiman las ofertas de reducción de emisiones no se encuentran claramente definidas y en muchas ocasiones no se considera el efecto de otras regulaciones ambientales ó la vida útil de la fuente que ofrece emisiones en la estimación dinámica de las emisiones compensadas. Esto dificulta la aplicación del concepto de créditos de emisión como usualmente se utiliza en la literatura: un flujo permanente de reducción de emisiones en el tiempo.

Finalmente, el programa de compensación de emisiones funciona mediante créditos de reducción de emisión, y permite intertemporalidad en el caso de proyectos cuyas emisiones tengan forma de U-invertida en el tiempo, y las compensaciones son calculadas sobre el promedio de las emisiones dentro del período de vida útil del proyecto. Esto contrasta con los diseños norteamericanos de sistemas de compensación de emisiones, como los descritos por Tietenberg (1998), donde los créditos se definen en términos de un flujo permanente de derechos de emisión por unidad de tiempo, tanto en la asignación como en la transacción de derechos. Esto es, la asignación es permanente y cualquier transacción involucra intercambios de derechos permanentes en el tiempo, que deben ser certificados previamente ante la autoridad ambiental, por lo que no permite intercambios intertemporales y estacionalidades en la explotación de los recursos naturales dentro de un período determinado.

A excepción de la compensación de emisiones realizada por el proyecto eléctrico, el programa de compensación de emisiones sólo resulta en compensaciones temporales de las emisiones asociadas a los proyectos. En el caso de las compensaciones realizadas con taxis sin convertidor catalítico, no se considera como la línea base la menor vida útil del vehículo. Respecto a la renovación de buses no se considera que la licitación exige tecnologías menos contaminantes, por lo que el potencial real de reducción de emisiones debe considerar este factor. Esto contrasta con la experiencia de EE.UU, donde los diferentes programas de retiro de vehículos para compensar emisiones sólo consideran una duración limitada para los créditos de reducción de emisión, por lo que es necesario volver a compensar emisiones después que los créditos expiran (Alberini et al., 1995). Por ejemplo, en el caso del programa de RECLAIM en el Distrito Sur de California, la metodología para el cálculo de créditos generados por la eliminación de vehículos considera que éstos estarían en circulación solamente durante 3 años.

(a) Eficiencia Económica del Instrumento

Los distintos contaminantes generan daños diferentes sobre la salud de las personas, que están asociados a los niveles de toxicidad de los contaminantes y los grados de exposición de la población a los mismos. Recientes estudios han provisto antecedentes sobre los impactos diferenciados de los distintos tipos de contaminantes atmosféricos sobre la población para el caso de Chile (Cifuentes, 2000; Calfucura, 2001). En la Tabla 13 se muestra los valores de daños en salud y los rangos de costos de compensación por tipo de contaminante, expresados en US\$/Ton año.

Tabla N° A2.2
Daños causados por contaminantes y costos de compensación de sus emisiones

Contaminante	Daño Unitario (US\$/ton)	Costo de Compensación (US\$/ton)
MP10	62.517	1.200
NO _x	3.275	4.500
SO _x	13.680	1.030
Polvo	797	3.500
COV	Sin información	Sin información
CO	Cercano a cero ^a	1.500

Fuente: Elaboración propia con datos de Cifuentes (2000), Calfucura (2001).

Valores anualizados a una tasa del 10% para el caso de los costos.

a: el valor es muy poco significativo

En la Tabla N° A2.2 se aprecia gran disparidad en los daños en la salud de la población causados por cada tipo de contaminante; el daño causado por una tonelada de MP10 proveniente de procesos de combustión supera en casi 5 veces el daño causado por una tonelada de óxidos de azufre (SO_x), y en mucho mayor medida aún el daño por una tonelada de los otros contaminantes.

Se observa que para el caso de los óxidos de nitrógeno y el polvo resuspendido, los costos de compensación superan largamente los beneficios asociados en salud, lo que indicaría que exigir compensaciones para estos contaminantes resulta en un beneficio social neto negativo. No obstante es preciso considerar que existen alternativas de reducción de emisión de polvo levantado que pueden ser más baratas, tal como el aspirado y lavado de calles, y la pavimentación de calles, con costos por tonelada abatida entre los US\$ 700 y US\$ 2.000. No obstante, es claro que difícilmente la relación beneficio-costos podría ser mayor que la unidad, por lo que la exigencia de compensación para este contaminante seguiría siendo poco eficiente desde un punto de vista social.

(b) Costos de Transacción

Cualquier proceso de intercambio tiene asociado costos de transacción. Estos pueden corresponder a los costos de búsqueda, los costos de negociación, los costos administrativos y los costos de enforcement de los contratos realizados (Figueroa y Calfucura, 2002). El actual sistema de compensación de emisiones del SEIA ha presentado una serie de limitaciones que han generado costos de transacción no despreciables.

Primero, la inexistencia de metodologías de estimación de emisiones y de programas de compensación bien definidos ha creado un costo en tiempo de tramitación producto de las negociaciones que han debido realizar los proponentes de proyectos con la CONAMA-Región Metropolitana para determinar las emisiones "más cercanas a la realidad" y cual es la compensación "óptima". Esto llevó en la práctica, a que en muchos proyectos la autoridad ambiental influyera de manera discrecional en la determinación de los programas de compensación, lo que ha originado costos de compensación por tonelada de contaminante reducido que han sido muy distintos para proyectos con diferencias no tan notorias, con las consiguientes distorsiones en el mercado inmobiliario, y especialmente en el mercado de tratamiento de los residuos sólidos domiciliarios donde los costos de compensación representan un porcentaje importante de la inversión. Protocolos de estimación de emisiones al estilo del Programa RECLAIM de California ó el Sistema de Permisos Transables de SO₂ para Lluvia Acida sólo han sido desarrollados en los últimos años, pero ellos no son oficiales no de fácil acceso a los proponentes de proyectos.

Segundo, los procesos de aprobación de compensación de emisiones se han visto atrasados producto de la superposición de regulaciones y responsabilidades administrativas entre agentes reguladores. En particular, algunas exigencias de compensación de emisiones del SEIA han sido objetadas por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente sobre la base de los criterios del sistema de compensación de emisiones de material particulado para calderas industriales que existe desde 1992.

Tercero, deben ser los proponentes de los proyectos quienes identifiquen a los potenciales oferentes de emisiones o quienes deseen aceptar la aplicación de los programas de compensación establecidos por los programas. La experiencia con el retiro de taxis sin convertidor catalítico ha mostrado que el proceso de búsqueda es lento y más dificultoso mientras menor es la cantidad de taxis antiguos que permanece en circulación y menos concentrado es el número de agentes con

quienes compensar. La autoridad ambiental ha jugado un papel casi pasivo en facilitar el encuentro entre oferentes y demandantes.

Finalmente, los costos administrativos y de enforcement han sido elevados. Al consultar a algunos proyectos inmobiliarios que han debido compensar emisiones, ellos señalan que el proceso más engorroso y que le significa un mayor costos en términos de tiempo y recursos humanos corresponde al asociado a realizar el papeleo administrativo para adquirir los taxis y sus cupos de circulación, y posteriormente certificar la eliminación del vehículo y demostrar aquello a la autoridad²². En adición, cada titular que haya sido estimado de compensar emisiones debe proponer un Plan de Seguimiento de las emisiones asociadas a su proyecto.

© Problemas de Equidad

El actual sistema de compensación de emisiones del SEIA plantea una serie de cuestiones relativas a la equidad en su aplicación que es necesario analizar a objeto de hacerlo más equitativo.

En primer lugar, los límites establecidos por la autoridad sólo afectan a aquellos proyectos cuyas emisiones marginalmente los superan, pero no generan ningún costo a los proyectos con emisiones marginalmente menores a dichos límites, aún cuando estén puedan ser relevantes. El incentivo a la subdivisión de proyectos para efectos de no compensar sus emisiones ha sido un tema de interés permanente por parte de la autoridad ambiental. El punto esencial es comparar los costos de regulación asociados a menores límites de emisión, y la mayor cantidad de proyectos sometidos a la exigencia de compensación. No obstante, la cuestión de equidad también tiene relación con los límites establecidos en las regulaciones existentes y propuestas en otras áreas: el sistema de compensación de emisiones en la industria (DS N° 4). En este último, los límites de compensación para MP10 y NOx son mucho menores a los establecidos en el PPDA para los nuevos proyectos del SEIA, y produce confusión en las empresas y las autoridades ambientales a la hora de aplicar ambos instrumentos de compensación.

En segundo lugar, está la exigencia de compensar las emisiones en un 150%. Según la autoridad ambiental, este porcentaje se sustenta en la necesidad que el sistema de compensaciones permita no sólo mantener las emisiones de la ciudad, sino que además reducirlas. No obstante, esta visión de corto plazo choca contra las implicancias de largo plazo de tal valor. Desde el punto de vista de la demanda, si bien puede argumentarse que una mayor exigencia de compensación genera incentivos a la entrada de tecnologías más limpias, no es menos cierto que también el costo de renovación por unidad de tonelada emitida se incrementa, creando incentivos para alargar la vida útil de las inversiones. Con ello, se genera un sesgo contra la entrada de nuevas fuentes.

(d) Escasez de oferta de emisiones

En la actualidad se ha constatado una escasez de oferta de emisiones para realizar la compensación de proyectos con obligación de compensar. En particular, proyectos que debían compensar

²² Respecto del proceso de anulación de la inscripción legal de los taxis no catalíticos, el proceso debería seguir los siguientes pasos: (i) Realizar los trámites para obtener el certificado de anotaciones del registro civil, donde se estipule la transferencia de propiedad de los taxis hacia la inmobiliaria; (ii) Acudir a la Secretaria Regional Ministerial de Transporte con dicho antecedente y el cartón antiguo, solicitando la cancelación indefinida de la inscripción de cada uno de los taxis no catalíticos; (iii) La SEREMI de Transporte cancela la inscripción como taxi de cada uno de los vehículos, y le entrega una patente y/o placa de vehículo particular a cambio; y (iii) Estas últimas deberán ser devueltas al registro civil.

emisiones de CO han visto como el mercado de taxis sin convertidor catalítico ha desaparecido, lo cual ha aumentado sus costos de cumplimiento por un factor cercano a 8.

A2.2 Cuestiones de Diseño en un Sistema de Compensación de Emisiones

A continuación se abordan diferentes tópicos relacionados con el diseño de un sistema de compensación de emisiones.

(a) Compensación de Emisiones en Situaciones de Incumplimiento

Un primer elemento a considerar, es que si un proyecto de reducción de emisiones se hubiera realizado igual en el futuro, se habría generado una ganancia ambiental permanente que no se produce cuando se trazan dichas reducciones en el presente. Esto es relevante cuando se quiere utilizar un sistema de compensación de emisiones que congele emisiones respecto al año donde se realizó la compensación y que permita adelantamiento de cumplimiento de metas hacia el presente, lo cual es analizado más adelante.

Un siguiente elemento es determinar quién es el titular de la reducción generada. Se puede asumir que el titular del proyecto debiera ser además el titular de la reducción, en cuanto ésta permanezca. La cuestión en este punto es quién debe responsabilizarse por garantizar que la reducción permanezca y determinar cuanto de la reducción inicial y que generó el crédito de emisión, permanece en el tiempo.

De manera general, se puede señalar que existen dos tipos de sectores de donde puede provenir la reducción efectiva de las emisiones: sectores que estén en cumplimiento de las metas que les establece el PDA, y sectores que en ese instante se encuentren incumpliendo sus metas. Para el primer caso la situación es sencilla, toda la reducción realizada puede ser reconocida como tal y transformada en créditos de reducción de emisiones susceptibles de ser transados. Esto debido a que al encontrarse el sector en cumplimiento de sus metas, el excedente generado permite la incorporación de otras actividades sin afectar los objetivos que establece el PDA. En el segundo caso, la situación es relativa debido a la responsabilidad por el incumplimiento y las garantías que exige un sistema de compensaciones. Si existe un sector que incrementa sus emisiones sin control, cualquier crédito que se genere por la reducción de emisiones en dicho sector es una forma de validar dicho incumplimiento, ya que en el agregado existirán más emisiones que en el global de emisiones que es meta del PDA.

De acuerdo a lo discutido, se puede plantear entonces que no se debiera reconocer ninguna reducción de emisiones que provenga de un sector en incumplimiento, o mejor dicho, en el monto que se esté incumpliendo. Alternativamente, el otro extremo consiste en reconocerle al titular del proyecto la totalidad de la reducción acontecida, con lo que de alguna forma no se responsabiliza a éste por que dicho sector se encuentre incumpliendo. Bajo este esquema subsiste el problema que alguien debe responsabilizarse por el incumplimiento ya que de otra forma se entrega una señal complicada al permitirse que existan actividades que podrían emitir sin ser controladas. También se puede pensar en un esquema intermedio donde, por ejemplo, se reconozca una fracción de la reducción que considera el monto incumplido.

(b) Estimación de costos

El análisis de reducción de emisiones, beneficios y costos de la implementación de un sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios en el área de Temuco y Padre Las Casas dependerá de los supuestos de diseño del sistema.

La factibilidad de implementación y costos de transacciones realizadas dependerá fundamentalmente de la línea base sobre la cual se realiza la compensación de emisiones.

Una primera aproximación sería considerar como línea base el año de ingreso del proyecto. Bajo este esquema, por ejemplo, un proyecto inmobiliario ingresa al área de Temuco y Padre Las Casas y compensa reduciendo emisiones que son reconocidas a perpetuidad sin importar que en períodos futuros el sector de donde provino la reducción de emisiones debe obligatoriamente reducir emisiones producto de alguna regulación ambiental. Bajo este esquema, una exigencia de compensación del 100% reduce emisiones respecto al año de ingreso, pero no respecto a los períodos futuros y la compensación sólo adelante cumplimiento en el sector existente donde ocurre la reducción de emisiones. La compensación se diluye en el tiempo y no es efectiva, y los costos de cumplimiento son los menores alcanzables en un sistema de compensación cerrado (sin compensación entre diferentes contaminantes).

Una segunda aproximación sería considerar como línea base las emisiones del PDA. Bajo este esquema, por ejemplo, un proyecto inmobiliario ingresa al área de Temuco y Padre Las Casas y compensa reduciendo emisiones que son reconocidas sólo temporalmente respecto al año de ingreso o permanentemente si estas son por debajo de la línea de emisiones del PDA si el sector de donde provino la reducción de emisiones debe obligatoriamente reducir emisiones producto del pda. Bajo este esquema, una exigencia de compensación del 100% debería reducir emisiones por debajo de la meta de largo plazo del PDA en la frente existente. La compensación debe ser permanente, no se diluye en el tiempo y es efectiva. En este caso, los costos de cumplimiento pueden ser altos si no existe oferta de reducción de emisiones (producto de una línea base PDA muy estricta) y el proyecto debiera asegurarse una emisión cercana a cero.

Una tercera aproximación es realizar una mezcla de ambos enfoques, en donde la compensación de emisiones sea mayor al 100% y se entregue cierta flexibilidad respecto a la temporabilidad de la compensación o cuanta reducción puede considerarse como permanente a perpetuidad.

(c) Compensaciones Periódicas versus Permanentes

Uno de los problemas prácticos en el diseño de programa de compensación de emisiones es la definición de la periodicidad con que las fuentes nuevas deben compensar sus emisiones. Para entender el problema, pensemos en una fuente nueva del tipo industrial con una vida útil de 15 años y que se estima va a emitir 10 toneladas de MP10 cada año. De acuerdo a los criterios de tamaño definidos en el respectivo programa de compensaciones, esta fuente cae dentro de las fuentes afectadas, por lo tanto, debe compensar el 150% de sus emisiones para cumplir con el objetivo de la autoridad de mantener congelado el nivel agregado de emisiones.

En general, uno puede pensar en dos formas en que esta fuente puede compensar el total de sus emisiones.

La primera forma es a través de una compensación periódica, donde la fuente debe compensar cada año (o cada período según corresponda) sus emisiones comprando créditos de reducción a fuentes existentes. En el ejemplo anterior, la fuente industrial debe compensar 10 ton de MP10 (o algo distinto si así lo indica el monitoreo) cada año durante 15 años dependiendo si la fuente reduce o extiende su vida útil. Esta forma de compensar es bastante similar a un sistema de permisos transables de emisión en la cual las fuentes nuevas reciben una cuota inicial de permisos igual a cero, pero deben cubrir sus emisiones de cada año (o período) con permisos comprados a otras fuentes. Bajo la compensación periódica, sin embargo, la autoridad debe realizar una inspección/monitoreo anual para comprobar que las fuentes nuevas están efectivamente cubriendo sus emisiones con permisos o créditos de reducción provenientes de fuentes nuevas.

La segunda forma de compensación es una compensación definitiva. Las fuentes compensan una vez sus emisiones y para siempre. En este sentido, la compensación viene a constituir un permiso para establecerse y comenzar a operar. Desde el punto de vista de la empresa, las actividades de compensación son equivalentes a las actividades realizadas para conectarse a sistema de alcantarillado, por ejemplo. Se realiza una vez y para siempre. En nuestro ejemplo, la fuente industrial nueva debiera compensar el total de sus emisiones de MP10, estimadas en 10 unidades anuales durante los próximos 15 años, lo que entrega un total de 150 unidades. La compensación se puede realizar con fuentes existentes de distinto tipo y de distintas vidas útiles remanentes. Tanto las emisiones como las reducciones que generan créditos se descuentan con una tasa igual a cero. En régimen estacionario con un continuo de fuentes nuevas entrando se obtiene estabilidad en el nivel agregado de emisiones en el tiempo. Las ventajas de un sistema de compensación definitiva son básicamente dos. En primer lugar, permite realizar la compensación por una sola vez y evitar la incertidumbre asociada a la obtención de créditos o permisos en el futuro. Esto puede ser particularmente importante en proyectos inmobiliarios donde resulta poco factible exigirle al dueño del proyecto compensar cada año por el total de emisiones. La otra ventaja de la compensación definitiva es el ahorro en costos de fiscalización (inspección y monitoreo). Las fuentes son evaluadas una sola vez al momento de comenzar a operar.

Un esquema de compensación definitiva también puede presentar algunas desventajas. Por ejemplo, las empresas deben incurrir en un alto costo inicial al tener que compensar todas sus emisiones estimadas. Sin embargo, estos costos iniciales debieran entenderse como parte de la inversión inicial que realiza la empresa o fuente emisora cuando decide instalarse en una zona geográfica donde existe un programa de compensaciones. Al igual que con el resto de la inversión inicial, la empresa o fuente emisora puede distribuir estos costos en el tiempo con créditos.

La forma de solucionar la transición hacia el régimen estacionario donde todos compensan el total de sus emisiones estimadas es a través de sistema de compensación parcial. Durante el periodo de transición y dependiendo del momento de entrada durante dicho periodo, una fuente nueva solo compensa una parte de sus emisiones.

(d) Compensación con Línea Base Actual versus Emisión con PDA

- **Línea base de compensación: emisión actual**

En un sistema de compensación de emisiones donde la línea base de la compensación corresponde a la emisión actual, un nuevo proyecto que deba compensar, reduce emisiones de una fuente existente considerando la emisión actual de esta última. Esto implica que:

- La compensación no considera las exigencias ambientales futuras de la fuente existente.
- La compensación sólo congela las emisiones respecto al año actual, pero no respecto al hipotético escenario futuro sin proyecto nuevo.
- De lo anterior, las emisiones netas producto de la implementación del sistema son mayores a las emisiones que se lograrían bajo un sistema de compensación de emisiones cuya línea base son las emisiones con PDA. No obstante lo anterior, las emisiones igualmente serían menores que en el caso donde no existiera un sistema de compensación de emisiones de ningún tipo.

El sistema de compensación donde la línea base de la compensación basado en la emisión actual permite la máxima generación de oferta de reducciones de emisión para los nuevos proyectos que ingresarían al área definida del PDA. Del mismo modo, corresponde al sistema donde los costos de compensación por unidad son menores.

Un efecto directo de la implementación de un sistema de compensación de emisiones basado en la emisión actual es que:

- En el futuro las exigencias ambientales sobre las fuentes existentes pueden significar una menor oferta y mayores costos de abatimiento
- Lo anterior implica que será bastante más caro compensar

Entonces, el sistema de compensación en base a emisión actual incentiva el adelantamiento en la entrada de proyectos nuevos. La magnitud del adelantamiento dependerá del aumento de los costos de compensación en el tiempo. En el extremo, una situación futura con límite tecnológico sobre las fuentes existentes podría generar un escenario de nula entrada de nuevos proyectos.

• **Línea base de compensación: emisión con PDA**

En un sistema de compensación de emisiones donde la línea base de la compensación corresponde a la emisión con PDA, un nuevo proyecto que deba compensar, reduce emisiones de una fuente existente considerando la emisión que tendría si en el futuro se le aplican las medidas establecidas en el PDA. Esto implica que:

- La compensación considera las exigencias ambientales futuras de la fuente existente.
- La compensación congela las emisiones respecto al año al hipotético escenario futuro con regulaciones ambientales sobre las fuentes existentes.
- De lo anterior, las emisiones netas producto de la implementación del sistema son menores a las emisiones que se lograrían bajo un sistema de compensación de emisiones cuya línea base son las emisiones sin PDA.

El sistema de compensación donde la línea base de la compensación basado en la emisión con PDA permite la menor generación de oferta de reducciones de emisión para los nuevos proyectos que ingresarían al área definida del PDA. Del mismo modo, corresponde al sistema donde los costos de compensación por unidad son más altos.

Anexo 3. Proyecciones del Percentil 98 MP10 para Diferentes Medidas

**Tabla A3.1. Percentil 98, Medida Leña Seca
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	169,1	3,4	0,1	0,0	174
2009	0,9	160,2	3,4	0,1	0,0	165
2010	0,9	151,4	3,4	0,1	0,0	156
2011	0,9	151,1	3,4	0,1	0,0	156
2012	0,9	151,9	3,4	0,1	0,0	156
2013	0,9	152,7	3,4	0,1	0,0	157
2014	0,9	151,4	3,4	0,1	0,0	156
2015	0,9	152,2	3,4	0,1	0,0	157
2016	0,9	151,3	3,4	0,1	0,0	156
2017	0,9	150,6	3,4	0,1	0,0	155
2018	0,9	151,0	3,4	0,1	0,0	155
2019	0,9	151,4	3,4	0,1	0,0	156
2020	0,9	151,8	3,4	0,0	0,0	156
2021	0,9	152,3	3,4	0,0	0,0	157
2022	0,9	149,8	3,4	0,0	0,0	154

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla A3.2. Percentil 98, Medida Anterior + Prohibición Chimeneas
(ug/m³)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	166,5	3,4	0,1	0,0	171
2009	0,9	157,6	3,4	0,1	0,0	162
2010	0,9	148,7	3,4	0,1	0,0	153
2011	0,9	148,4	3,4	0,1	0,0	153
2012	0,9	149,2	3,4	0,1	0,0	154
2013	0,9	150,0	3,4	0,1	0,0	154
2014	0,9	148,7	3,4	0,1	0,0	153
2015	0,9	149,5	3,4	0,1	0,0	154
2016	0,9	148,6	3,4	0,1	0,0	153
2017	0,9	147,8	3,4	0,1	0,0	152
2018	0,9	148,2	3,4	0,1	0,0	153
2019	0,9	148,6	3,4	0,1	0,0	153
2020	0,9	149,1	3,4	0,0	0,0	153
2021	0,9	149,5	3,4	0,0	0,0	154
2022	0,9	147,1	3,4	0,0	0,0	151

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla A3.3. Percentil 98, Medidas Anteriores + Compensación de Emisiones
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	163,3	3,4	0,1	0,0	168
2009	0,9	153,2	3,4	0,1	0,0	158
2010	0,9	143,2	3,4	0,1	0,0	148
2011	0,9	141,2	3,4	0,1	0,0	146
2012	0,9	141,4	3,4	0,1	0,0	146
2013	0,9	141,6	3,4	0,1	0,0	146
2014	0,9	139,3	3,4	0,1	0,0	144
2015	0,9	139,4	3,4	0,1	0,0	144
2016	0,9	138,0	3,4	0,1	0,0	142
2017	0,9	136,7	3,4	0,1	0,0	141
2018	0,9	136,7	3,4	0,1	0,0	141
2019	0,9	136,7	3,4	0,1	0,0	141
2020	0,9	136,7	3,4	0,0	0,0	141
2021	0,9	136,7	3,4	0,0	0,0	141
2022	0,9	133,5	3,4	0,0	0,0	138

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3.4. Percentil 98, Medidas Anteriores + Programa de Aislación Térmica (ug/m³)

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	162,4	3,4	0,1	0,0	167
2009	0,9	151,4	3,4	0,1	0,0	156
2010	0,9	140,7	3,4	0,1	0,0	145
2011	0,9	137,9	3,4	0,1	0,0	142
2012	0,9	137,2	3,4	0,1	0,0	142
2013	0,9	136,6	3,4	0,1	0,0	141
2014	0,9	133,4	3,4	0,1	0,0	138
2015	0,9	132,8	3,4	0,1	0,0	137
2016	0,9	130,6	3,4	0,1	0,0	135
2017	0,9	128,6	3,4	0,1	0,0	133
2018	0,9	128,6	3,4	0,1	0,0	133
2019	0,9	128,7	3,4	0,1	0,0	133
2020	0,9	128,8	3,4	0,0	0,0	133
2021	0,9	128,9	3,4	0,0	0,0	133
2022	0,9	125,7	3,4	0,0	0,0	130

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla A3.5. Percentil 98, Medidas Anteriores + Recambio de Artefactos a Leña
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)**

Año	Transporte	Residencial	Estacionarias	Quemas Agrícolas	Incendios Forestales	P98
2004	0,9	166,6	4,3	0,1	0,0	172
2005	0,9	169,5	4,3	0,2	0,0	175
2006	0,9	173,0	4,3	0,1	0,0	178
2007	0,9	176,0	4,3	0,1	0,0	181
2008	0,9	162,4	3,4	0,1	0,0	167
2009	0,9	149,6	3,4	0,1	0,0	154
2010	0,9	137,3	3,4	0,1	0,0	142
2011	0,9	132,8	3,4	0,1	0,0	137
2012	0,9	130,2	3,4	0,1	0,0	135
2013	0,9	127,5	3,4	0,1	0,0	132
2014	0,9	122,4	3,4	0,1	0,0	127
2015	0,9	119,8	3,4	0,1	0,0	124
2016	0,9	115,5	3,4	0,1	0,0	120
2017	0,9	111,4	3,4	0,1	0,0	116
2018	0,9	109,2	3,4	0,1	0,0	114
2019	0,9	109,3	3,4	0,1	0,0	114
2020	0,9	109,3	3,4	0,0	0,0	114
2021	0,9	109,4	3,4	0,0	0,0	114
2022	0,9	106,4	3,4	0,0	0,0	111

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Cronograma de Implementación de Medidas

Medidas	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Regulación uso de leña															
Prohibición leña húmeda															
Exigencia de xilohigrómetro															
Regularización comercializadores															
Certificación de la leña seca															
Regulación del uso de artefactos de combustión a leña															
Comercialización de artefactos que cumplan norma															
Instrumentos económicos de fomento de recambio															
Prohibición del uso de chimeneas															
Mejoramiento térmico de la vivienda															
Línea de subsidios para mejoramiento térmico en viviendas SERVIU															
Subsidio mejoramiento térmico para viviendas fuera del SERVIU															
Control de emisiones asociadas a sector industrial y comercial															
Implementación de norma de emisión a fuentes industriales															
Control de emisiones asociadas al transporte público y de carga															
Plan maestro de transporte															
Arborización urbana															
Programa de creación de áreas verdes en Temuco y Padre Las Casas															
Instrumentos complementarios															
Sistema de compensación de emisiones en la industria															
Sistema de compensación de emisiones para proyectos inmobiliarios															