



UNIVERSIDAD Y TECNOLOGÍA
FUNDACIÓN PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA
CREADA POR LA UNIVERSIDAD DE CHILE

PROGRAMA DE GESTION Y ECONOMIA AMBIENTAL



Licitación ID: 608897-81-LE13

Informe Final

**“ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA CALEFACCIÓN RESIDENCIAL CON
ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES APLICABLES A LA
REALIDAD CHILENA”**

**PARA:
SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE**

Santiago, 15 de mayo de 2014



Contenidos

1.	Introducción.....	3
1.1.	Objetivos	3
1.2.	Contenidos del Informe.....	3
2.	Metodología General.....	7
3.	Demandas de Calefacción.....	9
4.	Disponibilidad de Recursos.....	14
4.1.	Metodología de Cálculo.....	14
4.2.	Resultados Obtenidos	15
4.2.1.	Recursos Integrados	17
4.2.2.	Comparación de Valores de Radiación Global entre Modelación SIG en Escala Regional y Modelación 3D en Escala Urbana	29
5.	Tecnologías ERNC Comerciales para Uso Térmico	33
5.1.	Reacondicionamiento Térmico de Viviendas	33
5.1.1.	Costos de Reacondicionamiento	33
5.1.2.	Demandas de Calefacción de Viviendas Reacondicionadas.....	36
5.2.	Tecnologías ERNC Existentes.....	40
5.2.1.	Antecedentes internacionales.....	40
5.2.2.	Tecnologías consideradas en el estudio	42
5.3.	Posibilidad de una integración a través de micro redes	44
5.4.	Costos de inversión, mantención y operación de las tecnologías seleccionadas	45
5.5.	Definición de niveles de emisión de las tecnologías con ERNC.....	47
5.5.1.	Leña	47
5.5.2.	Pellets	49
5.6.	Evaluación de Tecnologías.....	49
5.6.1.	Disponibilidad de Recursos	50
5.6.2.	Análisis de barreras de las tecnologías.....	52
5.6.3.	Factibilidad técnica de las tecnologías	52
5.6.4.	Costos por kW	53
6.	Modelación de Penetración de Tecnologías ERNC.....	54
6.1.	Proyección de Viviendas.....	54
6.1.1.	Proyección PIB Per Cápita	54
6.1.2.	Habitantes por vivienda	55
6.1.3.	Proyección de Población por ciudad	57



6.1.4.	Proyección de Casas por ciudad	58
6.2.	Participación de los distintos energéticos en la demanda de energía	62
6.2.1.	Proyección de las participaciones de energéticos/tecnologías.....	66
6.2.2.	Proyección de Consumos de Energía por ciudad	68
6.3.	Proyección de Emisiones de MP _{2,5}	76
6.3.1.	Factores de emisión	77
6.3.2.	Resultados de proyección de emisiones de MP _{2,5} para línea base.....	80
6.4.	Definición de escenarios	83
6.4.1.	Escenarios de penetración de tecnologías ERNC	84
7.	Evaluación Costo-Beneficio Escenarios de Penetración de Tecnologías ERNC	88
7.1.	Metodología de Costo Beneficio Social.....	88
7.2.	Precios Sociales definidos por Ministerio de Desarrollo Social.....	90
7.3.	Costos y Beneficios asociados a las Tecnologías de Calefacción.....	91
7.4.	Beneficios Ambientales	93
7.4.1.	Metodología de la Función de Daño	93
7.4.2.	Resumen de emisiones, concentraciones y muertes estadísticas evitadas	95
7.4.3.	Resultados de Beneficios Ambientales.....	105
7.5.	Análisis de Resultados de Costo Efectividad y Costo Beneficio	107
8.	Análisis de resultados y conclusiones finales	122
8.1.	Análisis de resultados	122
8.2.	Recomendaciones y conclusiones	123
9.	Bibliografía.....	126



1. Introducción

El presente documento corresponde al informe final desarrollado por el Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA) para la consultoría: “Alternativas tecnológicas para calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena” solicitado por el Ministerio del Medio Ambiente.

A continuación se listan los objetivos del estudio y se describen los contenidos a ser presentados en las siguientes secciones de este documento.

1.1. Objetivos

El objetivo general del estudio es contar con una modelación sobre los aportes de las energías renovables no convencionales (ERNC) a los procesos de descontaminación, que permitan apoyar la toma de decisión en medidas orientadas a descontaminar zonas saturadas prioritarias del centro sur de Chile.

Los objetivos específicos asociados al estudio son los siguientes:

- Contar con una revisión, a nivel internacional, del conjunto de tecnologías ERNC para uso de calefacción que han sido implementadas en países con condiciones geográficas y climáticas similares a la zona centro sur de Chile y que cumplan estándares nacionales/internacionales relacionados con altas eficiencias y bajas o nulas emisiones.
- Contar con una base de datos geo-referenciada, junto a un análisis en Sistema de Información Geográfica, respecto de las potencialidades de desarrollar proyectos de calefacción con ERNC, de cada zona térmica de la zona centro-sur de Chile.
- Contar con una modelación de escenarios de penetración de ERNC con usos térmicos en un horizonte de 30 años para la evaluación del mejoramiento ambiental en zonas saturadas en la zona centro-sur de Chile.
- Contar con una evaluación comparativa sobre aspectos técnicos, económicos y ambientales para las soluciones tecnológicas térmicas eficientes por seleccionar.

1.2. Contenidos del Informe

Este informe presenta el desarrollo de todas las actividades y los avances correspondientes al total del estudio en cuestión, que incluye las siguientes actividades:

- Actividad 1: Identificar, seleccionar y caracterizar tecnologías ERNC comerciales para uso térmico según zonas climáticas análogas a las zonas centro-sur de nuestro país, considerando soluciones centralizadas, distritales u otras soluciones del tipo unitarias no tradicionales y excluyendo el uso de calefactores a leña.
- Actividad 2: Establecer los costos de inversión, mantención y operación de las tecnologías a considerar.



- Actividad 3: Definir niveles de emisión de las tecnologías con ERNC.
- Actividad 4: Realizar, de acuerdo a la información pública disponible y a una base de datos geo-referenciada, un análisis de los potenciales que ofrecen las ERNC en las zonas del centro sur de Chile y que presentan problemas de contaminación (saturadas, latentes), considerando disponibilidad y calidad.
- Actividad 5: Identificar y caracterizar las barreras que el retrasan o limitan el uso de ERNC en las distintas zonas geográficas de interés.
- Actividad 6: Desarrollar una estimación preliminar respecto de los costos comparativos con sistemas actuales de calefacción, con una proyección en el tiempo, respecto a la reducción sostenida de precios de ciertas tecnologías ERNC que pudieran ser viables en el mediano y largo plazo, y cuando corresponda.
- Actividad 7: Diagnosticar y caracterizar el conjunto de viviendas beneficiadas por el Programa de Protección al Patrimonio Familiar (PPPF) y realizar una proyección de los futuros y potenciales proyectos habitacionales por beneficiar en un horizonte de 10 años. Se requiere una valorización en términos de los recursos que el Gobierno deberá invertir en dicho programa.
- Actividad 8: Estimar los costos unitarios que representaría el acondicionamiento térmico por vivienda.
- Actividad 9: Estimar la disminución de la demanda energética (primaria y secundaria) asociadas a costos de calefacción, definiendo un escenario base de evaluación, estableciendo las condiciones y requisitos para la definición de escenarios optimistas y pesimistas para la evaluación.
- Actividad 10: Desarrollar la modelación de penetración de las ERNC para los distintos escenarios.
- Actividad 11: Estimar e identificar qué tecnologías con ERNC son más competitivas en el horizonte de evaluación.
- Actividad 12: Desarrollar un análisis técnico, económico y ambiental de las actividades previas considerando un determinado conjunto de variables atributos.
- Actividad 13: Estimar la reducción de las concentraciones de PM_{2,5} en distintas zonas saturadas por la implementación gradual de sistemas térmicos y medidas de reacondicionamiento térmico (RT) y la combinación de ellas.

Adicionalmente, como se comprometió en la propuesta técnica, se presentan las siguientes actividades que desarrollará el consultor de manera de enriquecer los resultados del estudio.

- **Modelación solar 3D.** En algunas zonas de interés se entregará una modelación solar en tres dimensiones que permitirá estimar en mayor detalle el potencial solar de los techos de las viviendas para su aprovechamiento energético.



- **Modelo implementado en software LEAP.** Se dejará a disposición de la contraparte técnica el modelo de evaluación de escenarios de penetración de tecnologías ERNC implementado en el software LEAP y se capacitará a los usuarios que se requieran, de manera que puedan contar con una herramienta útil en la evaluación futura de nuevos requerimientos de este estilo.
- **Beneficios en salud.** Como se mencionó anteriormente en la sección de Metodología General, se calcularán los beneficios en salud producto de la disminución de las concentraciones en las localidades. La metodología a utilizar corresponde a las Funciones de Daño y los beneficios que se estimarán corresponden a los casos evitados de mortalidad, admisiones hospitalarias (para enfermedades pulmonares y cardiovasculares, neumonía, disritmia, fallas congénitas y otras) y pérdida de días laborales, entre otras. Los grupos etarios considerados corresponden a niños, adultos y adultos mayores.

Finalmente, como una solicitud adicional de la contraparte, se lleva a cabo un análisis de las metas de contaminación en el horizonte 2013 – 2043 para 6 ciudades del país en las que se disponía de información, incluidas dos de las más contaminadas de Chile (Temuco y Coihaique).

En la sección 2 del documento se presenta una descripción general de la metodología de trabajo que se ha propuesto para enfrentar este proyecto.

En la sección 3 se presentan los resultados de la demanda de calefacción para distintos períodos y tipologías de viviendas en cada ciudad, lo que es un insumo básico para determinar los requerimientos de calefacción de las casas y su proyección en el tiempo. La metodología usada para estimar la demanda de calefacción corresponde a la utilizada en el software RetScreen, la cual ha sido modificada en algunos pasos o variables con el objetivo de mejorar su aplicabilidad al caso particular de Chile.

En la sección 4 se presenta la disponibilidad de los distintos recursos factibles de utilizar para fines térmicos, a través de mapas construidos con datos. En anexos se presenta la metodología de cálculo para cada recurso y se muestra la disponibilidad de los mismos en cada ciudad georeferenciados.

En la sección 5 se presentan las tecnologías ERNC comerciales para uso térmico, las cuales han sido revisadas en base a las soluciones tecnológicas disponibles en el extranjero. Se incluyen los resultados relacionados al reacondicionamiento térmico de las actuales viviendas en cada ciudad, considerando para ello las distintas tipologías y exigencias térmicas dependiendo del año de construcción. Para cada tecnología se ha elaborado una ficha con datos técnicos y prácticos referentes a las mismas, las que se presentan en los anexos. Adicionalmente, se presentan los costos de inversión, mantención y operación de las tecnologías, además de la definición de niveles de emisión de éstas. En anexo 1 se presentan los cálculos relacionados al reacondicionamiento térmico. Además, se caracterizan las viviendas beneficiadas con el actual subsidio térmico del



Programa de Protección al Patrimonio Familiar (PPPF) y se cuantifican las potenciales viviendas a reacondicionar. Por último, se estiman los costos unitarios de reacondicionamiento para las distintas tipologías y los recursos que se debiese invertir en el PPPF para cada ciudad.

En la sección 6 se presenta la modelación de los escenarios de penetración de las tecnologías ERNC, definiendo para ello escenarios basados en una tecnología principal y tecnologías complementarias que permitan satisfacer la demanda total de calor en las casas. Para ello se identifican las tecnologías ERNC que son más competitivas y poseen menores barreras en el horizonte de evaluación.

En la sección 7 se lleva a cabo el análisis técnico, económico y ambiental para cada escenario; caracterizándolos a partir de las concentraciones de MP 2,5, los beneficios en salud, entre otros indicadores.

Finalmente, en la sección 8 se presenta el análisis de resultados y conclusiones finales. En esta sección se incluye el ejercicio prospectivo para estimar las metas de contaminación de MP 2,5 en el horizonte 2013 – 2043.



2. Metodología General

A continuación se presenta la metodología general de trabajo utilizada para el cumplimiento de los objetivos considerados en el presente estudio. En líneas generales, el estudio contempla cuatro actividades que se desarrollan de manera consecutiva en un plazo máximo de 5 meses. Las etapas definidas se detallan en la figura siguiente.

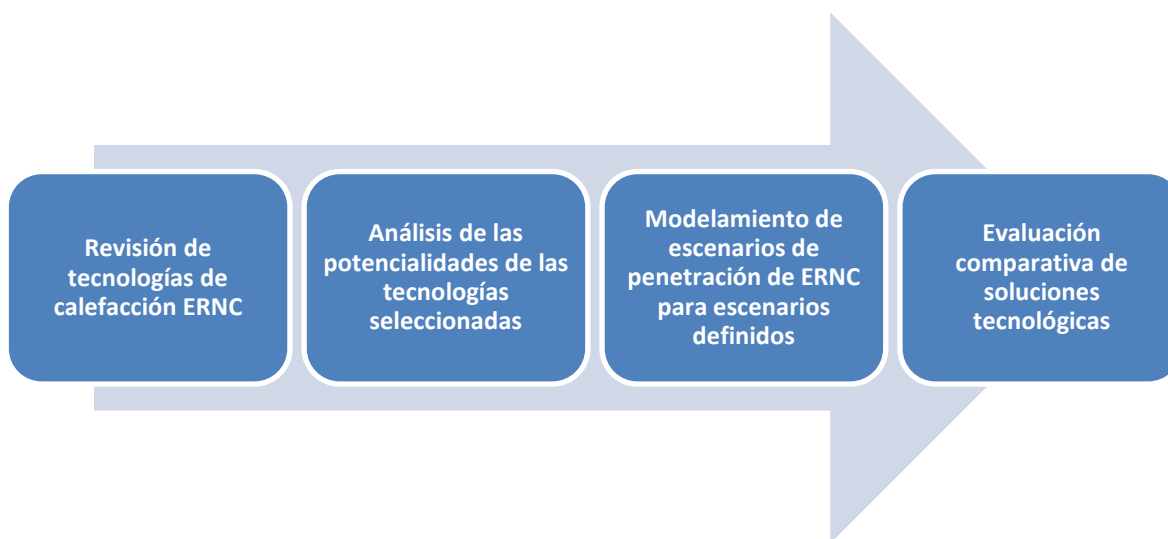


Figura 1: Diagrama del desarrollo metodológico

Una de las actividades clave para el desarrollo del estudio y paso inicial en el desarrollo metodológico es la selección de las ciudades sobre las cuales se llevarán a cabo los análisis.

La selección de las ciudades se hizo en conjunto con la contraparte, priorizando aquellas que ya han sido declaradas zonas saturadas o latentes y para las cuales se cuenta con suficiente información disponible. Del listado inicial de 16 ciudades propuesto por la contraparte, finalmente se seleccionaron 10:

- Rancagua
- Rengo
- San Fernando
- Talca
- Chillán
- Concepción
- Temuco
- Osorno
- Puerto Montt
- Coyhaique



En la selección se descartó la mayoría de las ciudades que no habían sido declaradas saturadas o latentes, a excepción de la comuna de Puerto Montt. Esto debido a que para la contraparte del MINVU representaba un caso interesante de estudio por la zona geográfica y las condiciones climáticas que presenta al ser una ciudad costera.

En el caso de Concepción, inicialmente se propuso tomar el Gran Concepción en conjunto, sin embargo, dada la cercanía entre comunas que no aportan mayor riqueza al análisis, se optó por descartar las aledañas y considerar sólo la ciudad de Concepción.

Es importante mencionar que para estimar los efectos en salud en cada ciudad es indispensable contar con Factores Emisión-Concentración, los cuales no están disponibles para las 16 ciudades y dado que el fin último de este estudio es analizar estos efectos, la disponibilidad de esta variable también fue considerada un criterio relevante al momento de realizar la selección.



3. Demandas de Calefacción

En esta sección se presentan los resultados de las estimaciones de la demanda de calefacción en cada ciudad.

La metodología utilizada corresponde a la desarrollada en el software RetScreen, el cual tiene como inputs la cantidad de grados hora de calefacción, el volumen, área y coeficientes volumétricos de transferencia de las viviendas, las potencias máximas de calefacción y otros parámetros que serán explicados más adelante. A continuación se detalla el cálculo de cada uno de estos inputs y finalmente la metodología de uso de ellos para la determinación de la demanda de calefacción en las ciudades.

Si bien la metodología de cálculo de las demandas de calefacción se basa en la metodología del RetScreen, se han hecho modificaciones con el objetivo de mejorar algunos aspectos. Estas mejoras incluyen la incorporación de las ganancias solares, de las ganancias internas (producto de la existencia de electrodomésticos y personas en el interior de las viviendas) y de la modificación de la temperatura base por un valor de 19°C.

Para estimar las demandas de calefacción se siguen los siguientes pasos metodológicos, los que son detallados en el anexo 1.

- Definición de Tipologías de viviendas
- Aplicación del método Grados Hora
- Determinación de Ganancias Internas y Solares
- Estimación de Potencia Máxima
- Cuantificación de Tipologías de Viviendas
- Cálculo de Demanda mediante Metodología RETScreen
- Cálculo de Demanda de Calefacción
- Cálculo de Demanda Agregada

Las tipologías utilizadas para las ciudades corresponden a las presentadas en la tabla siguiente.



Tabla 1: Tipologías Utilizadas

Tipologías	Dimensiones	Materialidad	Sistema de Agrupamiento	Pisos	Superficie ¹ [m ²]
Tip1	(CDT, 2011)	Tipología 5 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Aislada	1 piso	57
Tip2	(CDT, 2011)	Tipología 8 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Aislada	1 piso	221
Tip3	(CDT, 2011)	Tipología 8 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Aislada	2 pisos	103
Tip 4	(CDT, 2011)	Tipología 7 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Fila	2 pisos	52
Tip5	(CDT, 2011)	Tipología 1 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Pareada	1 piso	68
Tip 6	(CDT, 2011)	Tipología 8 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Pareada	2 pisos	85
Tip 7	(Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Tipología 1 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Pareada	1 piso	33
Tip 8	(Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Tipología 2 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Pareada	2 pisos	40
Tip 9	(Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Tipología 3 (Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile, 2007)	Casa Aislada, piso pilote	1 piso	40

Fuente: Elaboración Propia

Es importante mencionar que anterior al año 2000 no existía ningún tipo de exigencia térmica a las viviendas, no así para los períodos 2000-2007 y post 2007, en los cuales se establecieron límites de transmitancia para los distintos complejos.² Dado lo anterior, si bien se consideran las mismas dimensiones y materialidades para todos los períodos, las exigencias y por tanto la aplicación de aislante en los distintos complejos varía en los años mencionados³.

Además, debido a que las actuales exigencias térmicas no permiten lograr niveles de confort en muchas zonas del país, actualmente se evalúa la posibilidad de realizar modificaciones a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Esto último conllevaría a un aumento de las exigencias en los complejos techumbre, muros y pisos⁴.

Para el cálculo de la demanda agregada, se consideran las distribuciones de viviendas y las demandas de las distintas tipologías. Los resultados agregados por ciudad se indican en la siguiente tabla.

¹ Superficie Útil Interior.

² Para el período 2000-2007 se establecieron exigencias para las nuevas construcciones en el complejo techumbre, mientras que para el período Post2007 se agregaron exigencias a los complejos muro, ventanas y piso.

³ En el anexo 2.7 se detallan las dimensiones y materialidades de las tipologías para los distintos períodos.

⁴ Las actuales y futuras exigencias térmicas se muestran en el anexo 2.7.



Tabla 2: Demanda y Potencia agregada para el Año 2013

Ciudades	Tipologías	<2000	2000-2007	2008-2013	Total [Mwh]	Mwh	Potencia [MW]
Rancagua	T1	141.323	9.129	6.885	157.336	608.219	522,0
	T2	55.924	5.603	3.692	65.218		
	T3	33.348	3.287	2.654	39.289		
	T4	5.733	629	539	6.902		
	T5	161.976	10.540	7.831	180.347		
	T6	72.870	7.080	5.789	85.740		
	T7	9.190	683	487	10.360		
	T8	21.319	2.632	2.256	26.208		
	T9	32.887	2.142	1.789	36.819		
	Total	534.571	41.725	31.923	608.219		
Rengo	T1	38.938	4.577	3.923	47.438	182.770	122,3
	T2	16.119	2.829	2.425	21.373		
	T3	9.708	1.691	1.450	12.849		
	T4	1.595	315	270	2.181		
	T5	43.323	5.001	4.286	52.610		
	T6	20.117	3.536	3.031	26.683		
	T7	6.690	901	772	8.363		
	T8	3.383	740	634	4.756		
	T9	5.332	638	547	6.516		
	Total	145.206	20.227	17.337	182.770		
San Fernando	T1	41.371	4.664	3.542	49.577	232.994	118,6
	T2	17.487	2.895	1.985	22.367		
	T3	10.602	1.733	1.413	13.748		
	T4	1.691	312	268	2.271		
	T5	45.045	4.851	3.650	53.546		
	T6	21.329	3.525	2.895	27.748		
	T7	3.662	462	338	4.463		
	T8	17.894	3.636	3.116	24.646		
	T9	28.642	3.256	2.729	34.627		
	Total	187.724	25.334	19.936	232.994		
Talca	T1	221.059	6.743	3.787	231.589	863.126	564,5
	T2	90.753	4.180	2.600	97.533		
	T3	54.512	2.493	1.872	58.877		
	T4	8.961	466	400	9.827		
	T5	248.852	7.298	5.076	261.226		
	T6	113.742	5.228	3.942	122.912		
	T7	48.619	1.681	1.110	51.410		
	T8	10.753	621	532	11.906		
	T9	16.991	517	338	17.846		
	Total	814.243	29.228	19.655	863.126		
Chillán	T1	248.052	14.816	8.491	271.360	1.008.247	194,7
	T2	104.541	9.291	5.818	119.650		
	T3	63.322	5.556	4.181	73.059		
	T4	10.175	998	855	12.028		



Ciudades	Tipologías	<2000	2000-2007	2008-2013	Total [Mwh]	Mwh	Potencia [MW]
	T5	272.714	15.116	10.636	298.465		
	T6	128.099	11.140	8.491	147.730		
	T7	18.267	1.202	811	20.279		
	T8	22.244	2.397	2.055	26.696		
	T9	35.441	2.131	1.409	38.980		
	Total	902.853	62.647	42.747	1.008.247		
Concepción	T1	187.384	2.615	1.389	191.387	686.527	436,9
	T2	71.443	1.578	951	73.972		
	T3	42.392	930	688	44.010		
	T4	7.442	187	160	7.789		
	T5	225.884	3.159	2.120	231.163		
	T6	96.082	2.101	1.572	99.756		
	T7	10.993	175	113	11.282		
	T8	10.482	294	252	11.027		
	T9	15.783	220	139	16.142		
	Total	667.886	11.258	7.383	686.527		
Temuco	T1	266.273	22.283	12.106	300.661	1.198.140	628,3
	T2	109.973	13.958	8.435	132.366		
	T3	66.529	8.370	5.004	79.902		
	T4	10.864	1.527	1.308	13.699		
	T5	299.918	23.331	15.645	338.894		
	T6	137.348	17.030	12.418	166.796		
	T7	27.030	2.496	1.599	31.125		
	T8	43.699	6.772	5.633	56.104		
	T9	68.919	5.823	3.852	78.593		
	Total	1.030.552	101.588	66.001	1.198.140		
Osorno	T1	151.004	17.179	9.692	177.875	868.364	334,8
	T2	64.593	10.917	6.760	82.270		
	T3	39.397	6.608	4.079	50.084		
	T4	6.217	1.135	973	8.325		
	T5	162.879	16.705	11.390	190.975		
	T6	78.043	12.658	9.364	100.065		
	T7	55.072	6.738	4.418	66.228		
	T8	58.672	11.712	9.766	80.149		
	T9	94.082	10.922	7.387	112.392		
	Total	709.959	94.575	63.830	868.364		
Puerto Montt	T1	120.228	27.204	10.430	157.862	731.756	348,9
	T2	49.034	17.048	7.812	73.894		
	T3	29.592	10.134	4.441	44.166		
	T4	4.841	1.863	1.587	8.291		
	T5	134.286	28.556	15.271	178.113		
	T6	61.740	20.966	9.878	92.584		
	T7	26.261	6.551	3.170	35.982		
	T8	37.086	15.738	10.053	62.877		
	T9	58.208	13.068	6.711	77.987		
	Total	521.276	141.127	69.353	731.756		



Ciudades	Tipologías	<2000	2000-2007	2008-2013	Total [Mwh]	Mwh	Potencia [MW]
Coyhaique	T1	164.194	23.941	7.879	196.015	525.962	212,2
	T2	72.538	15.438	6.334	94.310		
	T3	72.650	15.360	5.882	93.892		
	T4	887	205	124	1.216		
	T5	38.080	4.940	2.307	45.326		
	T6	30.946	6.371	2.539	39.856		
	T7	16.966	2.663	928	20.556		
	T8	10.424	2.622	1.330	14.376		
	T9	16.849	2.501	1.066	20.416		
	Total	423.533	74.040	28.390	525.962		

Fuente: Elaboración Propia

El cálculo de las demandas y potencias por tipología de vivienda permiten dimensionar más adelante los equipos de las tecnologías alternativas que se usarán en la evaluación de los escenarios de penetración de ERNC para calefacción.



4. Disponibilidad de Recursos

En esta sección se presenta la evaluación de 9 recursos energéticos renovables posibles de utilizar para sistemas de calefacción en las distintas ciudades. Los recursos evaluados corresponden a energía solar para uso fotovoltaico, energía solar para uso térmico con agua, energía solar para uso térmico con aire, energía eólica, energía geotérmica de baja y alta entalpía, biomasa forestal (leña, pellets) y calor residual.

Para la evaluación de la disponibilidad de recursos, se usaron las siguientes referencias:

Tabla 3: Recursos e información disponible

Solar	Mapa solar desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, por encargo del Ministerio de Energía. http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/
Eólico	Mapa eólico desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, por encargo del Ministerio de Energía. http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/
Biomasa Forestal	Información de disponibilidad de biomasa tratada (pellets) y otro tipo. Explorador de biomasa del Ministerio de Energía. http://sit.conaf.cl
Geotérmico	Herramientas de simulación como RETScreen para sistemas de geotermia de baja entalpía. Para el caso de sistemas de alta entalpía, se implementó el SIG del Ministerio de Energía. http://sig.minenergia.cl .
Recuperación de Calor	Encuesta Industrial 2009.

Fuente: Elaboración Propia

En las secciones siguientes se explicita la metodología de cálculo de cada recurso y los resultados obtenidos. Más adelante, en la sección 5 se explican las tecnologías ERNC asociadas al uso de los recursos mencionados.

4.1. Metodología de Cálculo

Para determinar el recurso disponible en cada ciudad se recurrió a la información secundaria disponible en la web, la cual fue ingresada al software ArcGis 9.2.

Para todas las ciudades se ha utilizado como fuente de información las bases de datos de la Biblioteca del Congreso de Chile (www.BCN.cl), seleccionando desde este sitio datos territoriales para la división político administrativa a nivel regional y comunal, la cobertura de la red hidrográfica, la red vial y las plantas urbanas de todo el país. Además, se ha utilizado la información disponible del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para los recursos



solar y eólico y del Explorador de Bioenergía Forestal (Universidad Austral de Chile, 2013) para el recurso biomasa forestal (leña).

Con la información de la BCN se construyó la carta base en sistema coordenado UTM WGS84 en uso 19 para todas las comunas (Rancagua, Rengo, San Fernando, Talca, Chillán, Concepción, Temuco, Osorno, Puerto Montt y Coyhaique). En el área comprendida por cada comuna, se construyó una retícula cuadrada de 500 por 500 metros, asignando un identificador único para un punto central de cada cuadrícula.

Con las comunas seleccionadas se extrajeron las cuadrículas que espacialmente se intersectan total o parcialmente con la retícula, traspasando el código identificador único, generando una base de comunas cuadrículada la cual se utilizará para evaluar los diferentes ofertas de energías.

Los diferentes archivos obtenidos desde la página web se transformaron desde geotif a .img, convirtiendo el sistema angular a uno métrico mediante el sistema coordenado UTM WGS84 zona 19. De esta manera, fue posible efectuar las diferentes operaciones para cada una de las cuadrículas.

En el anexo 2 se explica con mayor detalle las fuentes de información y las metodologías de cálculo utilizadas para cada recurso. A continuación se presentan los resultados obtenidos de forma detallada.

4.2. Resultados Obtenidos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos respecto a la disponibilidad de los distintos recursos en las 10 ciudades evaluadas. A modo de resumen, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se indican los valores máximos y mínimos de energía por vivienda [kWh/vivienda] para los recursos.

Para el caso del recurso solar se han elaborado además mapas para el mes de julio. La elección de este mes se debe a que es en julio cuando se presentan las temperaturas más bajas y por tanto es mayor la demanda de calefacción.

Adicionalmente, se presentan a nivel regional las diferentes comunas seleccionadas con los puntos geotérmicos más cercanos.



Tabla 4: Disponibilidad Máxima y Mínima de los Recursos por Ciudad [kWh/vivienda]

Sector	Mín/ Máx	Solar PV	Solar Térmico (Agua)	Solar Térmico (Aire)	Eólico	Geotermia Alta Entalpía	Geotermia Baja Entalpía	Biomasa (Leña)		Pellets		Calor Residual	
		Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano/ Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Rancagua	Mín	5.925	22.570	6.838	17	0	10.829	114	120	7	0	2.202	0
	Máx	6.529	24.870	7.535	1.678	0	10.829	114	120	7	0	2.202	0
Rengo	Mín	5.734	21.844	6.618	6	0	13.020	318	329	0	0	2.203	0
	Máx	7.402	28.196	8.542	7.952	0	13.020	318	329	0	0	2.203	0
San Fernando	Mín	4.626	17.623	5.339	8	0	12.827	5.106	4.527	0	0	2.024	0
	Máx	6.154	23.443	7.102	10.779	0	12.827	5.106	4.527	0	0	2.024	0
Talca	Mín	5.956	22.689	6.874	41	0	14.762	2	2	14	0	2.909	0
	Máx	6.247	23.799	7.210	565	0	14.762	2	2	14	0	2.909	0
Chillán	Mín	5.716	21.776	6.597	131	0	20.451	26	6	6	0	6.730	0
	Máx	6.110	23.274	7.051	1.241	0	20.451	26	6	6	0	6.730	0
Concepción	Mín	5.774	21.995	6.663	81	0	14.883	1.155	4.281	36	0	19.207	0
	Máx	6.159	23.461	7.108	2.021	0	14.883	1.155	4.281	36	0	19.207	0
T-PLC	Mín	4.574	17.424	5.279	135	0	16.230	209	195	59	0	232	0
	Máx	4.863	18.527	5.613	1.386	0	16.230	209	195	59	0	232	0
Osorno	Mín	3.372	12.846	3.892	118	0	18.470	2.808	2.271	2	0	705	0
	Máx	3.711	14.136	4.282	1.359	0	18.470	2.808	2.271	2	0	705	0
Pto. Montt	Mín	3.191	12.156	3.683	49	0	10.367	10.438	8.285	8	0	717	0
	Máx	4.741	18.059	5.471	4.722	0	10.367	10.438	8.285	8	0	717	0
Coyhaique	Mín	2.861	10.898	3.302	78	0	28.183	126.452	77.158	0	0	68	0
	Máx	5.208	19.839	6.010	12.000	0	28.183	126.452	77.158	0	0	68	0

Fuente: Elaboración Propia



4.2.1. Recursos Integrados

A continuación se presentan los mapas geo-referenciados que muestran la disponibilidad agregada de los recursos en las 10 ciudades en estudio.

Todos los mapas presentados a continuación consideran la disponibilidad de los recursos solar térmico con fluido agua, eólico, geotérmico de baja entalpía, biomasa forestal (leña y pellets) y calor residual. No se consideran los valores del recurso solar fotovoltaico ni solar térmico con aire debido a que los recursos solares son excluyentes. Además, la disponibilidad del recurso solar térmico con agua es alrededor de 3 veces mayor que los otros dos, por lo que es más relevante de mostrar.

De igual modo se excluye la geotermia de alta entalpía debido a que, como se explica en la sección 2.3 en anexos, su disponibilidad es nula al estar las fuentes a más de 10 km de distancia de los centros urbanos.

En la Tabla 5 se presentan las disponibilidades promedio (ponderadas) de los recursos incluidos en los mapas y la participación de estos en el total de la comuna.

Tabla 5: Disponibilidad Promedio de los Recursos y Participación de estos en el Total de la Comuna [Kwh/vivienda]

Ciudades	Disponibilidad	Solar Térmico Agua	Eólico	Geotermia Baja Entalpía	Biomasa (Leña)	Pellet	Calor Residual	Total
Rancagua	Promedio	23.673,9	209,4	10.829,0	115,1	1,0	327,6	35.156,0
	Participación	67,3%	0,6%	30,8%	0,3%	0,0%	0,9%	100,0%
Rengo	Promedio	20.993,7	770,7	13.019,8	328,3	0,0	35,6	35.148,1
	Participación	59,7%	2,2%	37,0%	0,9%	0,0%	0,1%	100,0%
San Fernando	Promedio	13.561,9	2.205,8	12.826,8	4.531,1	0,0	13,4	33.138,9
	Participación	40,9%	6,7%	38,7%	13,7%	0,0%	0,0%	100,0%
Talca	Promedio	23.077,0	282,1	14.761,5	1,9	2,2	441,3	38.566,0
	Participación	59,8%	0,7%	38,3%	0,0%	0,0%	1,1%	100,0%
Chillán	Promedio	22.552,4	620,0	20.450,7	6,7	0,4	377,1	44.007,2
	Participación	51,2%	1,4%	46,5%	0,0%	0,0%	0,9%	100,0%
Concepción	Promedio	22.426,5	366,8	14.883,1	3.716,5	6,5	3.466,3	44.865,7
	Participación	50,0%	0,8%	33,2%	8,3%	0,0%	7,7%	100,0%
T-PLC	Promedio	18.034,6	644,8	16.230,4	196,6	6,8	26,4	35.139,6
	Participación	51,3%	1,8%	46,2%	0,6%	0,0%	0,1%	100,0%
Osorno	Promedio	13.389,0	504,4	18.469,6	2.290,4	0,1	26,3	34.679,7
	Participación	38,6%	1,5%	53,3%	6,6%	0,0%	0,1%	100,0%
Pto. Montt	Promedio	12.898,2	710,0	10.367,0	8.322,1	0,1	12,4	32.310,1
	Participación	39,9%	0,0%	2,2%	25,8%	0,0%	32,1%	100,0%
Coyhaique	Promedio	16.484,1	3.179,0	28.183,4	77.235,0	0,0	0,1	125.081,6
	Participación	13,2%	2,5%	22,5%	61,7%	0,0%	0,0%	100,0%

Fuente: Elaboración Propia

La malla cuadrículada de los planos generados se ha evaluado en diez rangos de igual tamaño, asignando el color rojo al valor más alto y el azul al valor más bajo. Las cuadrículas que no



presentan información válida han sido eliminadas. Los mapas obtenidos se presentan a continuación. El detalle de los mapas para cada recurso y ciudad, visualizable en una herramienta SIG se incluye en los anexos digitales adicionales a este documento.

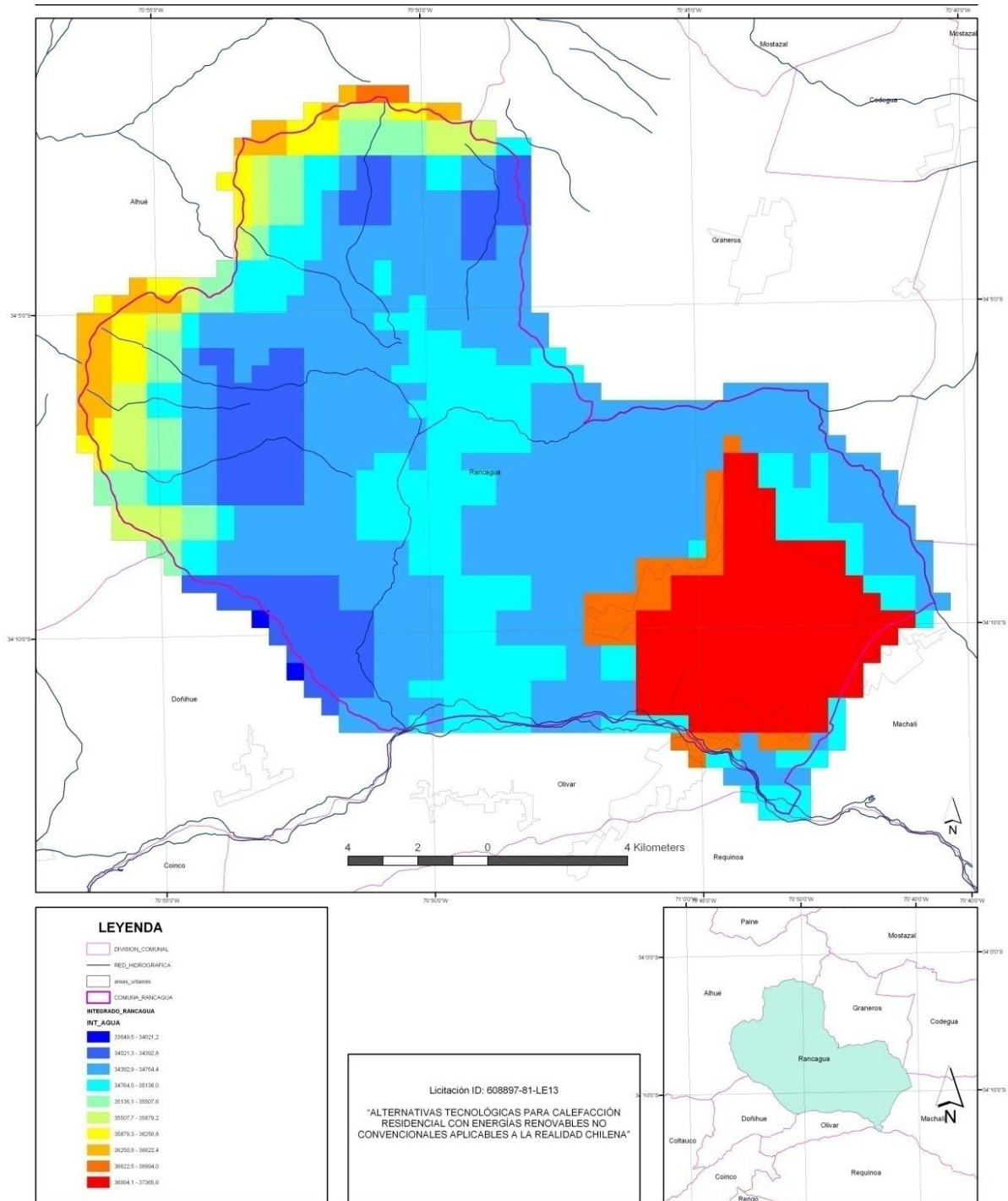


Figura 2: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Rancagua [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

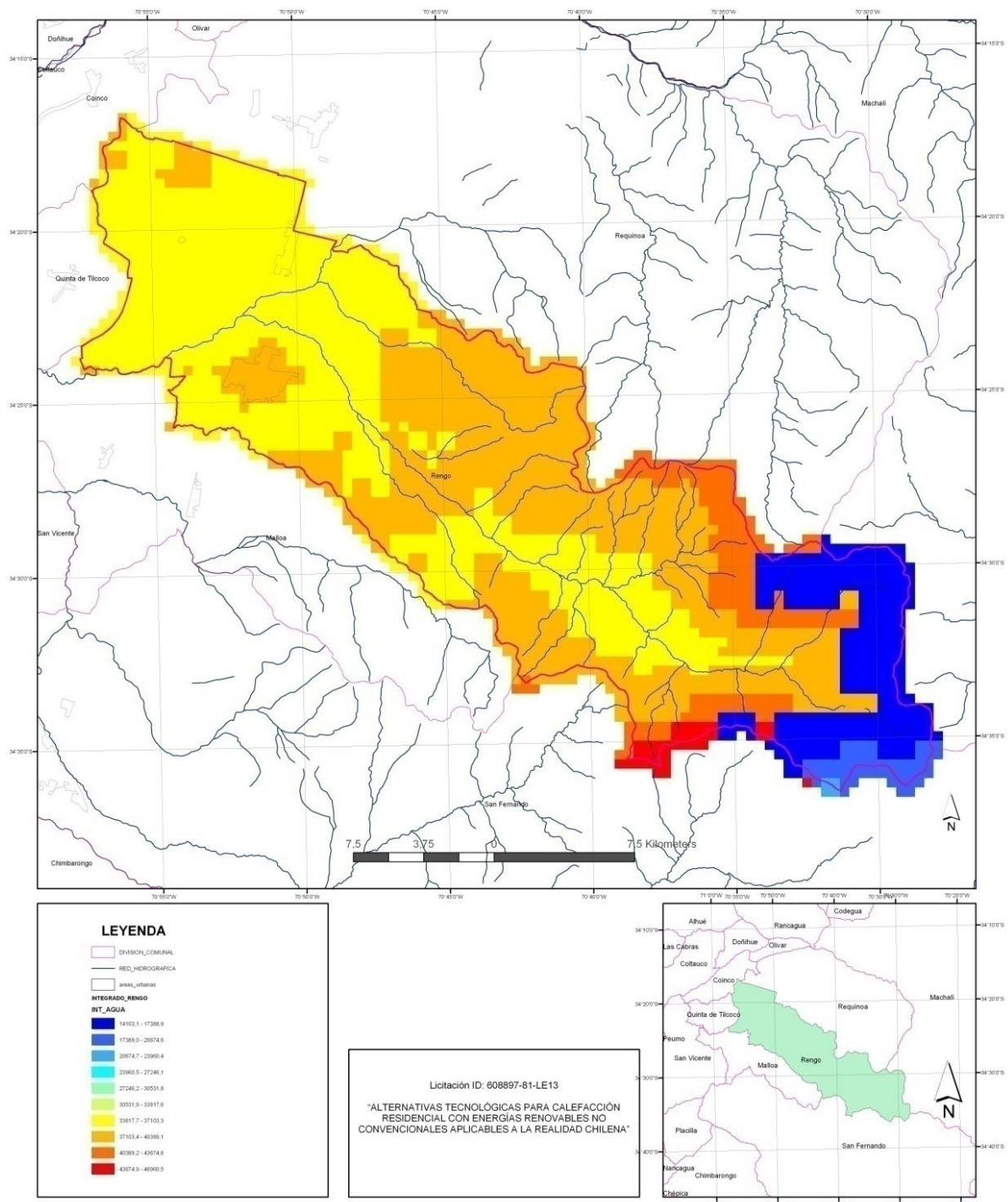


Figura 3: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Rengo [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

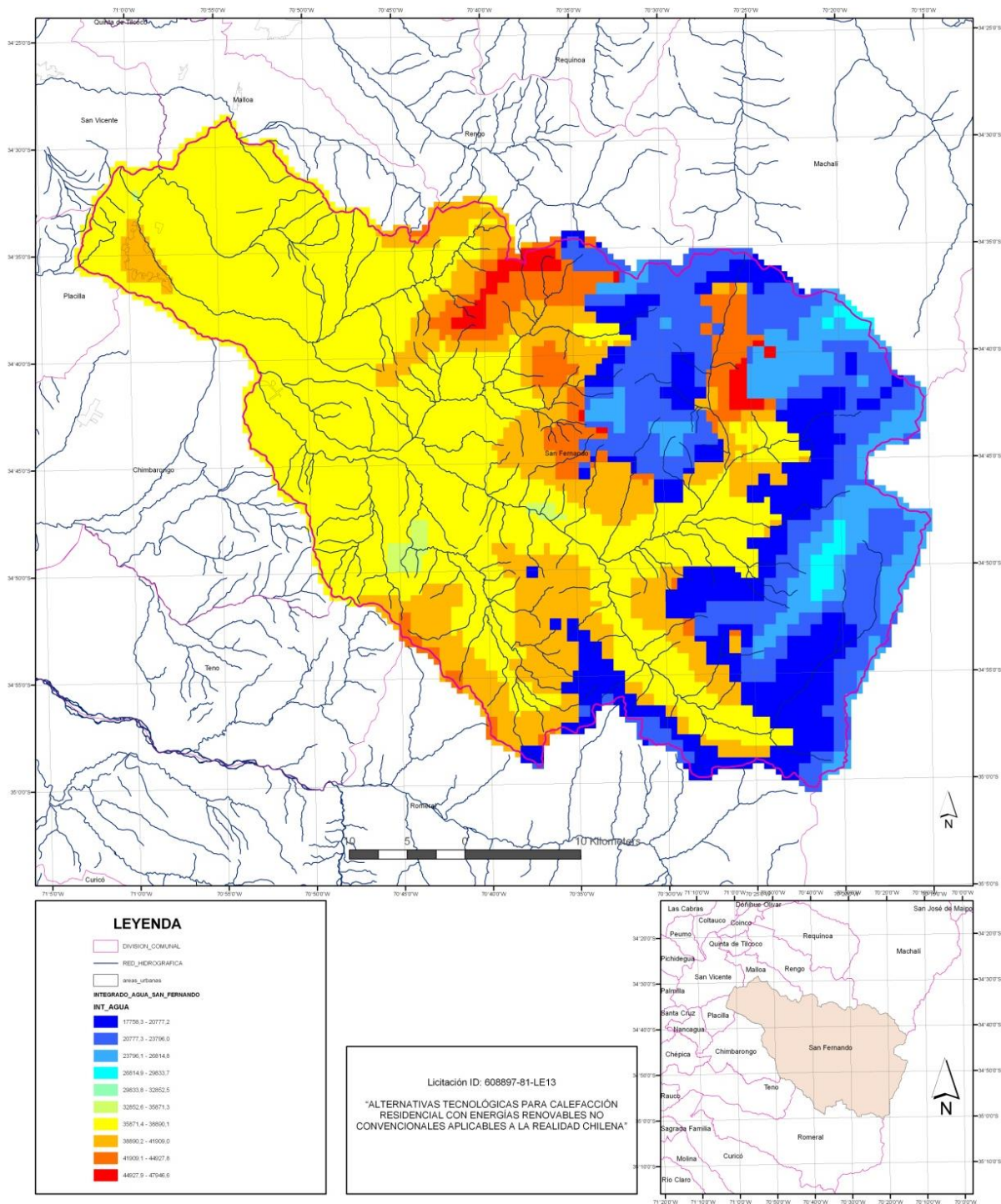


Figura 4: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en San Fernando [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

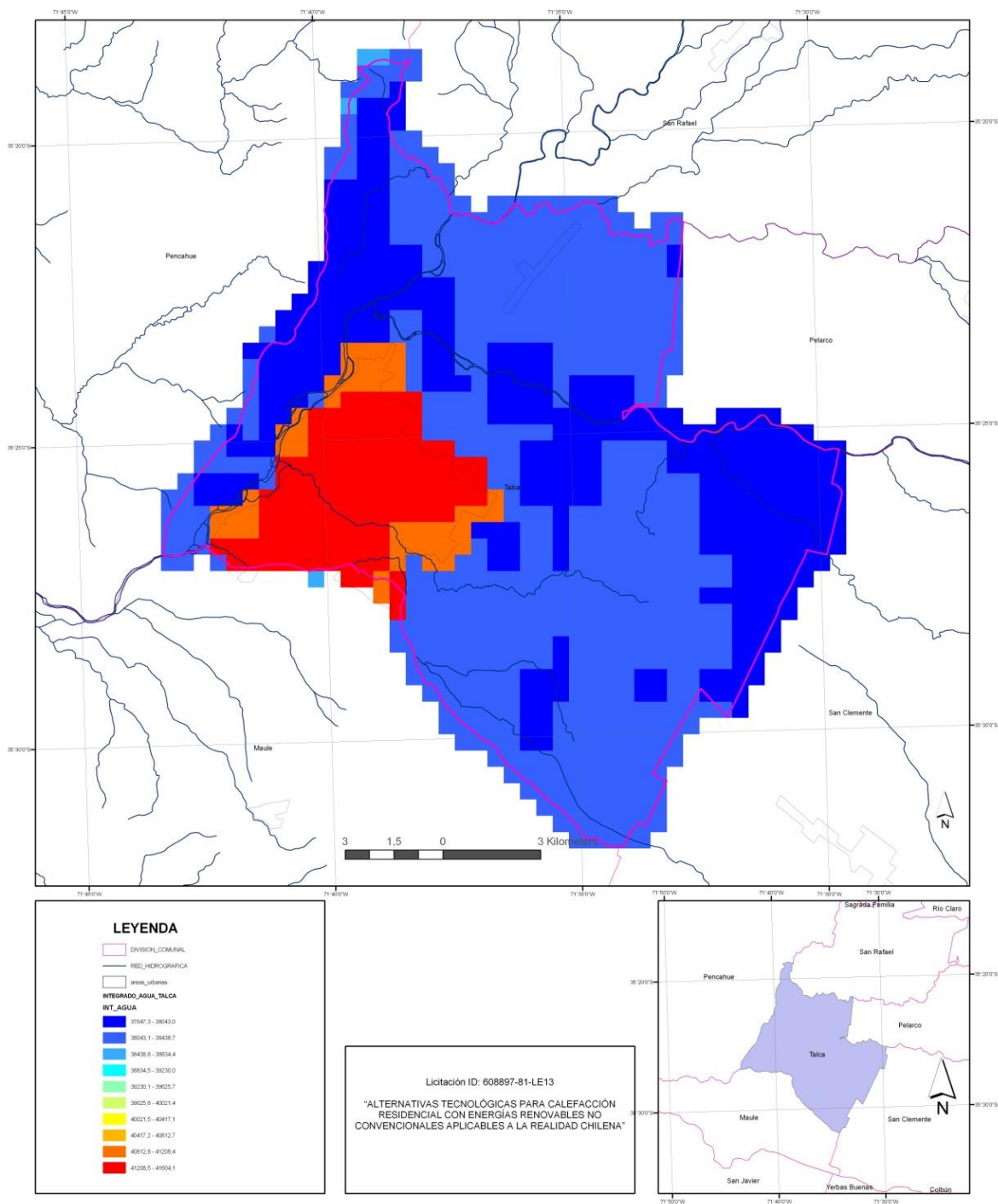


Figura 5: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Talca [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

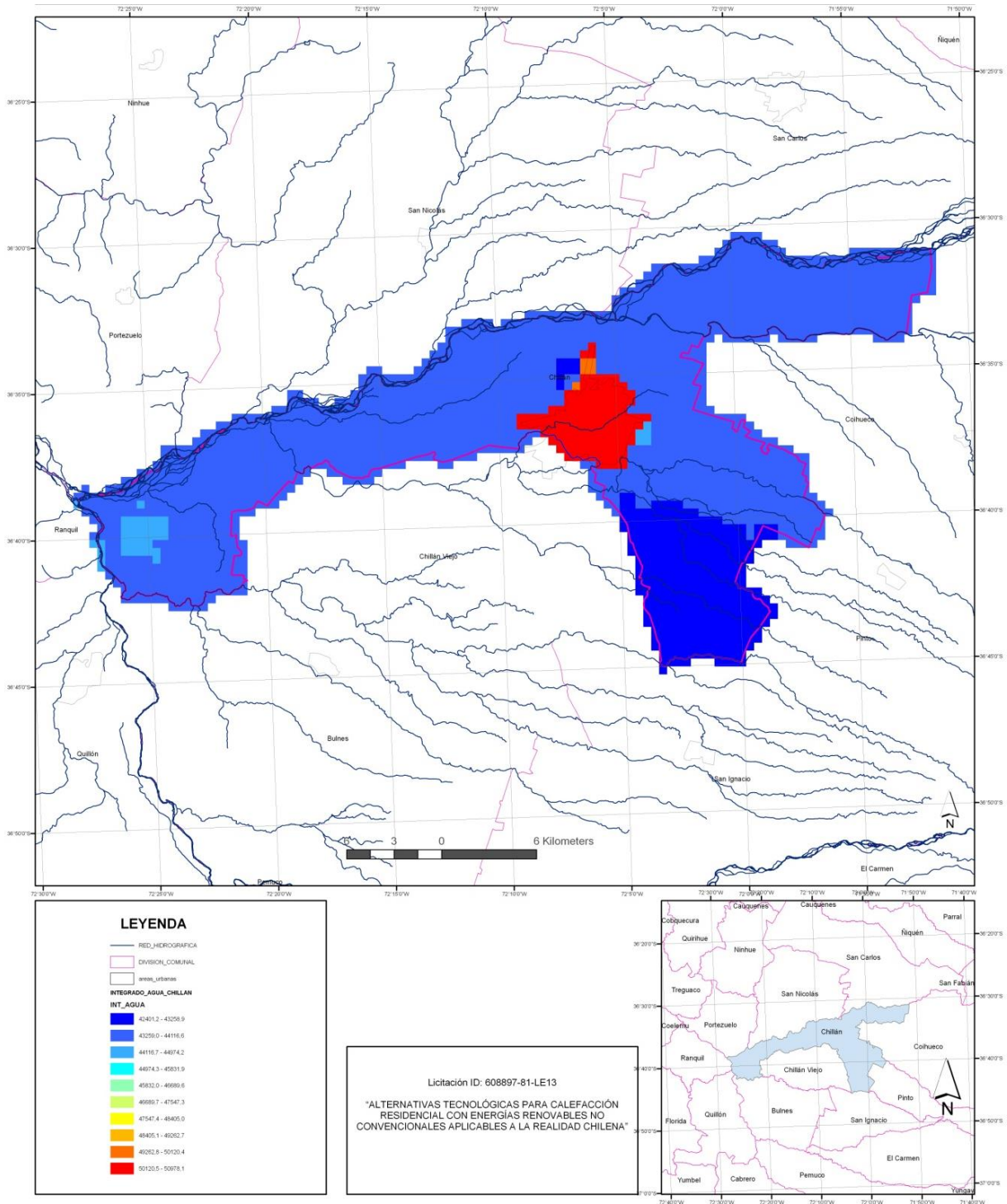


Figura 6: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Chillán [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

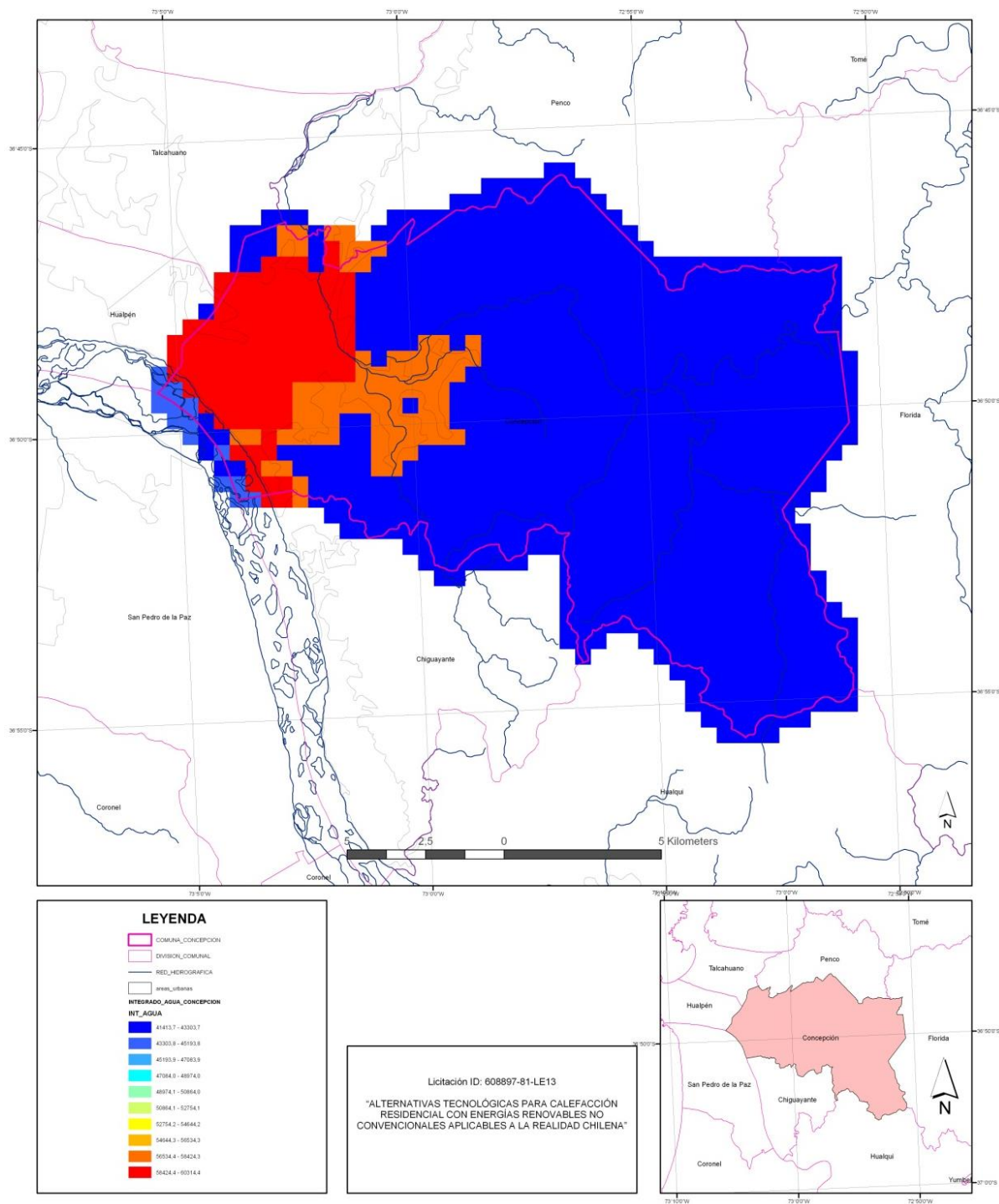


Figura 7: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Concepción [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

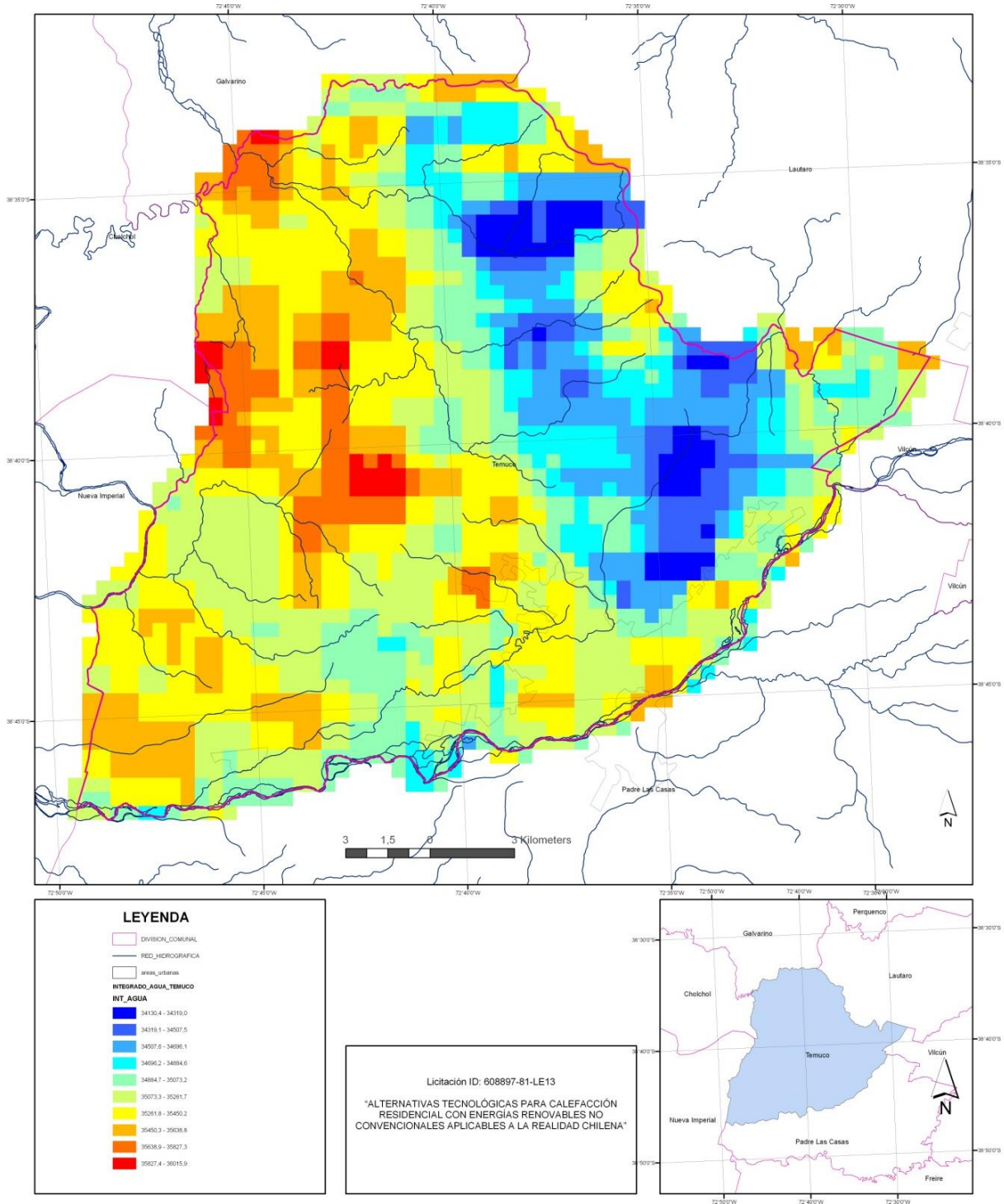


Figura 8: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Temuco [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

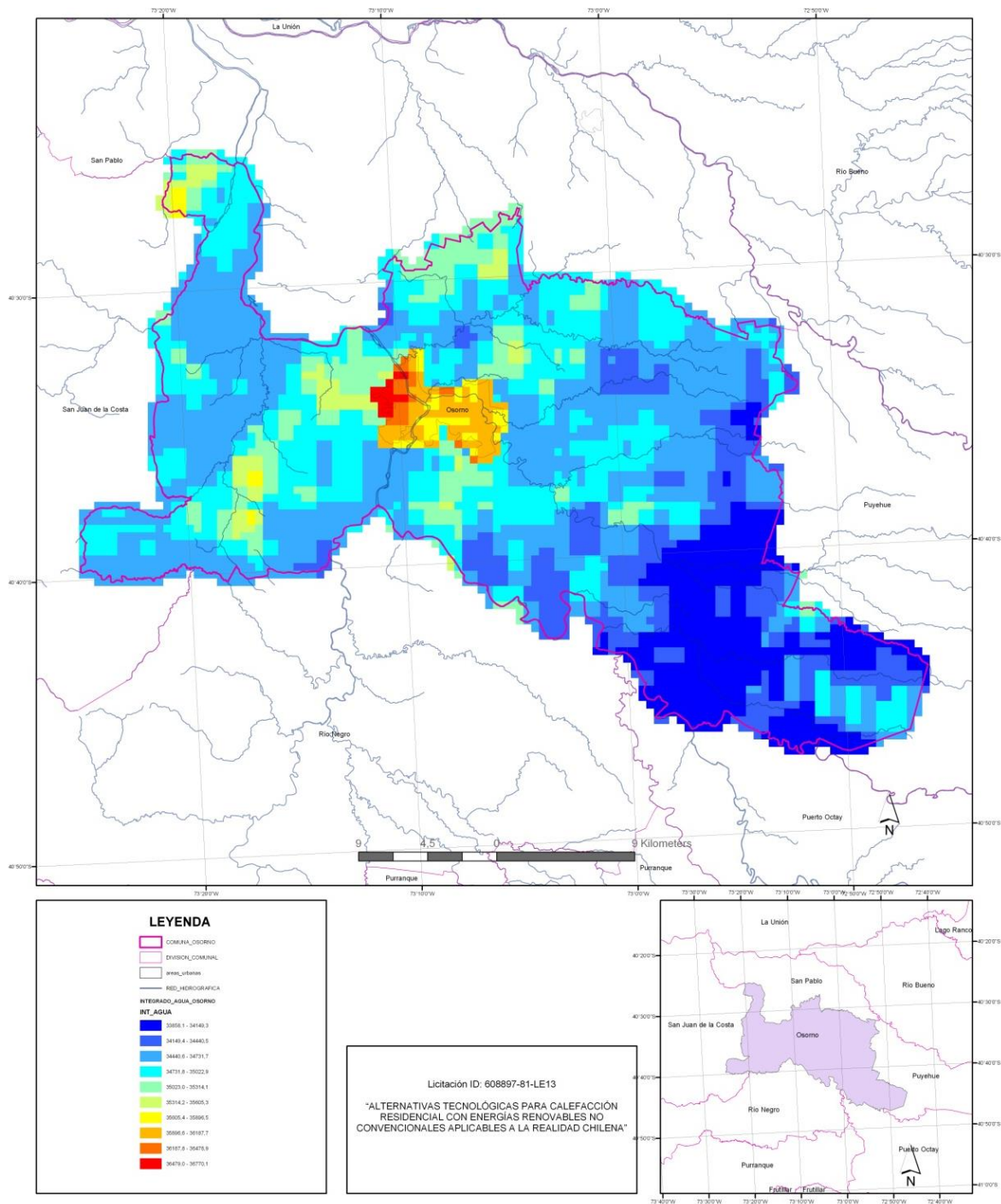


Figura 9: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Osorno [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

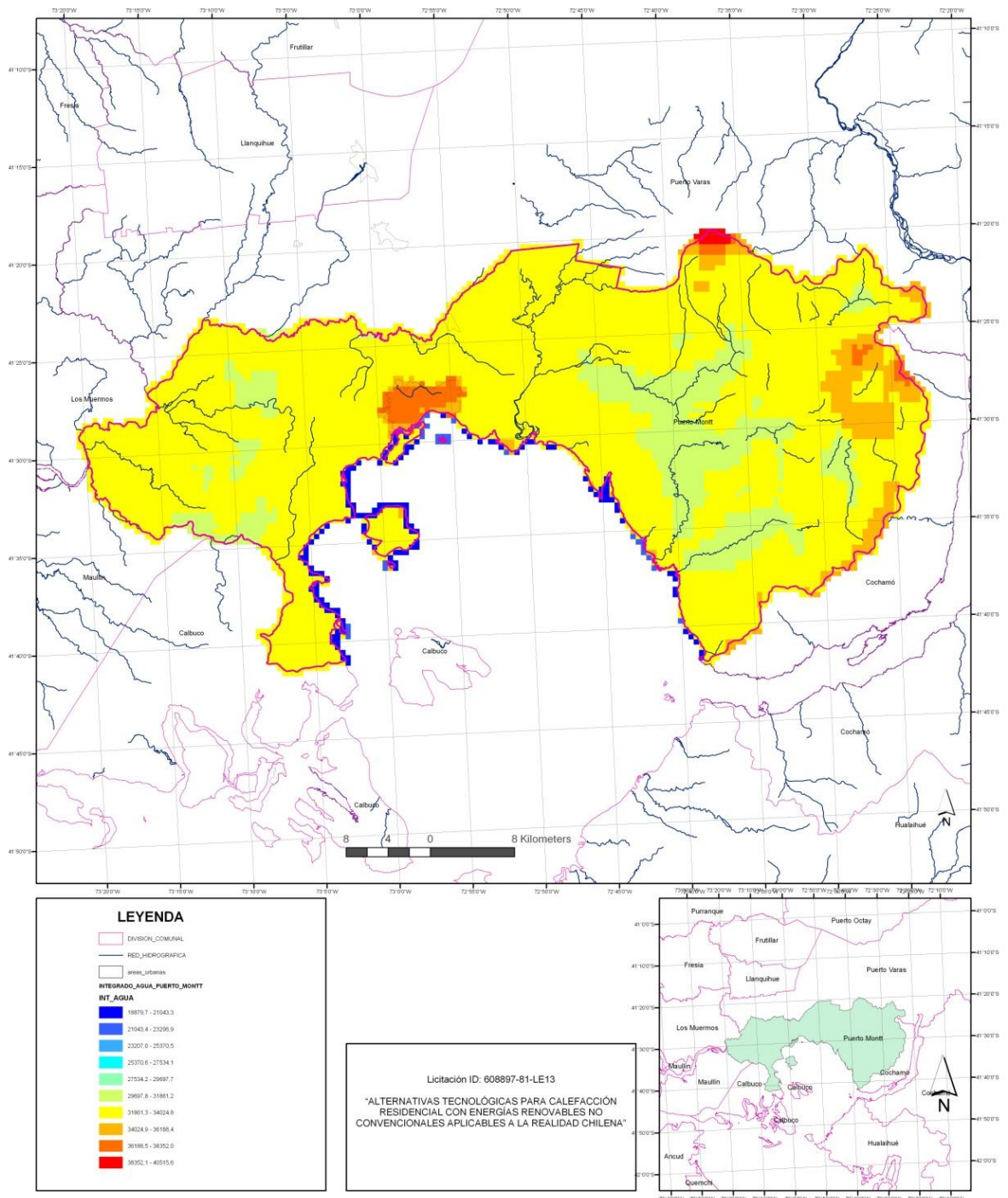


Figura 10: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Puerto Montt [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia

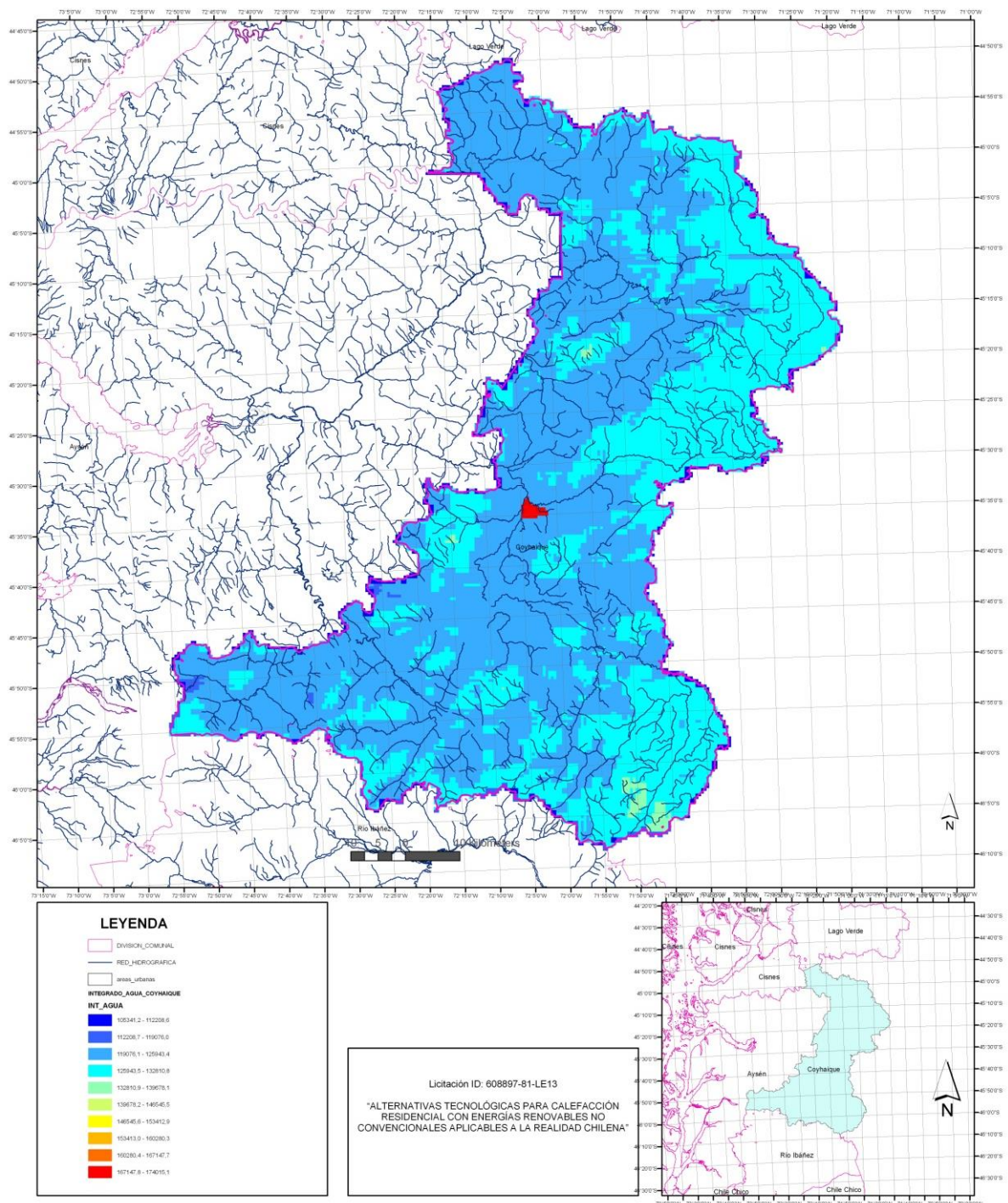


Figura 11: Disponibilidad Anual de Energía para Calefacción en Coyhaique [kWh/vivienda]
Fuente: Elaboración Propia



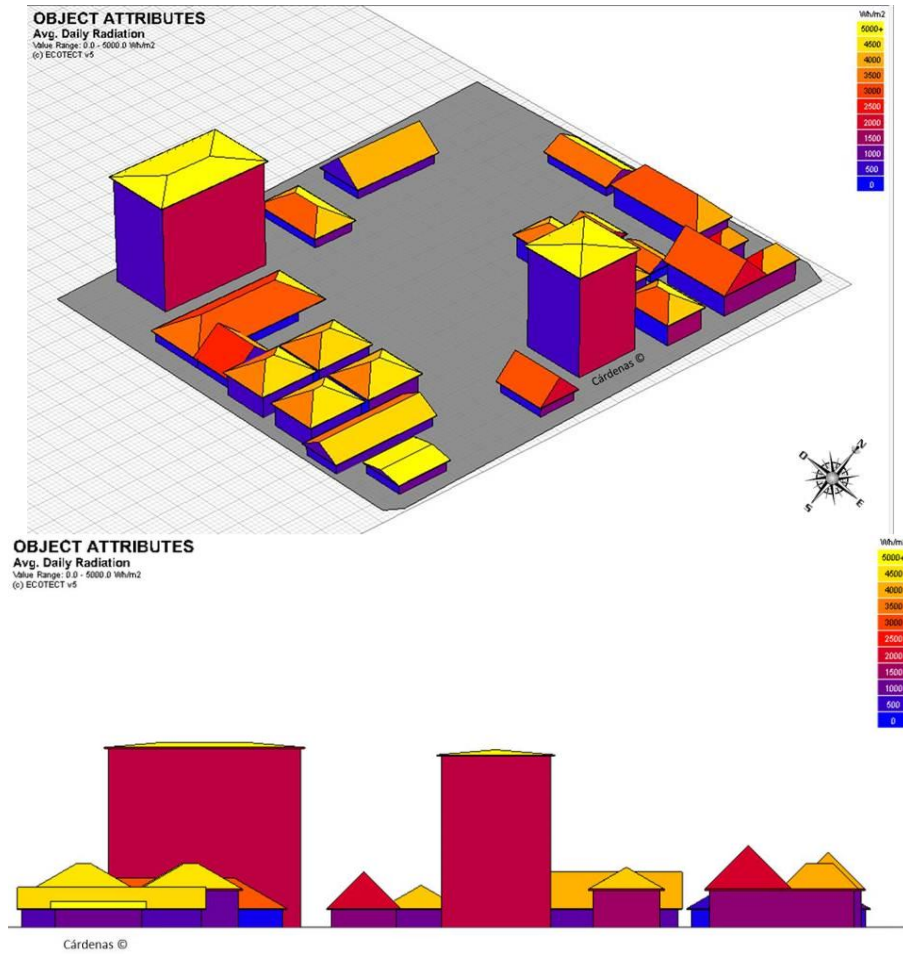
4.2.2. Comparación de Valores de Radiación Global entre Modelación SIG en Escala Regional y Modelación 3D en Escala Urbana

Se han presentado dos formas de aproximación al modelamiento de la radiación solar disponible y oferta energética para fines alternativos a la calefacción residencial. La modelación en la escala regional mediante los Sistemas de Información Geográfica y la modelación 3D en la escala urbana, que permite comparar dos situaciones espaciales: la distribución en el territorio, y en un grado de resolución más fino, la distribución según la morfología urbana. Las tipologías de vivienda al igual que los espacios intersticiales entre ellas definen condiciones particulares de radiación incidente, reflejada y emitida por las superficies de los espacios públicos y las edificaciones.

Por ello, los valores globales de la escala regional son una aproximación viable al momento del cálculo de la disponibilidad energética solar, pero se debe estimar igualmente las fluctuaciones que ella tiene en una escala menor, el tejido de la ciudad. Los cálculos de la disponibilidad energética sobre las superficies difieren según sea las formas, espacios, pendientes, orientaciones, localización, etc. en ella. A modo ilustrativo se presenta una comparación entre los valores de la modelación SIG y la modelación 3D, para lo cual se ha vuelto a modelar la escala pequeña con los valores equivalentes al **promedio diario de radiación** global sobre una base anual en las 3 ciudades: Talca, Puerto Montt y Coyhaique. Esta misma unidad de análisis permite la comparación entre ambas modelaciones.

Talca

Los rangos de valores oscilan entre 0 a 5 [kWh/m²] y es posible encontrar toda la gama según la ubicación de la tipología residencial y la exposición de las superficies al sol. Se observa que la máxima radiación (color amarillo) 5 [kWh/m²] se encuentra normalmente en las techumbres, pero en forma no homogénea, aún dentro de una misma tipología. La fachada oriente presenta valores intermedios entre los 2 [kWh/m²] y los 4 [kWh/m²], y también es posible encontrar valores máximos de 5 kWh/m² en algunos faldones de la techumbre. Es importante esa observación porque obedece a una tipología que al cambiar de posición en la manzana, cambia también su oferta energética significativamente.



Puerto Montt

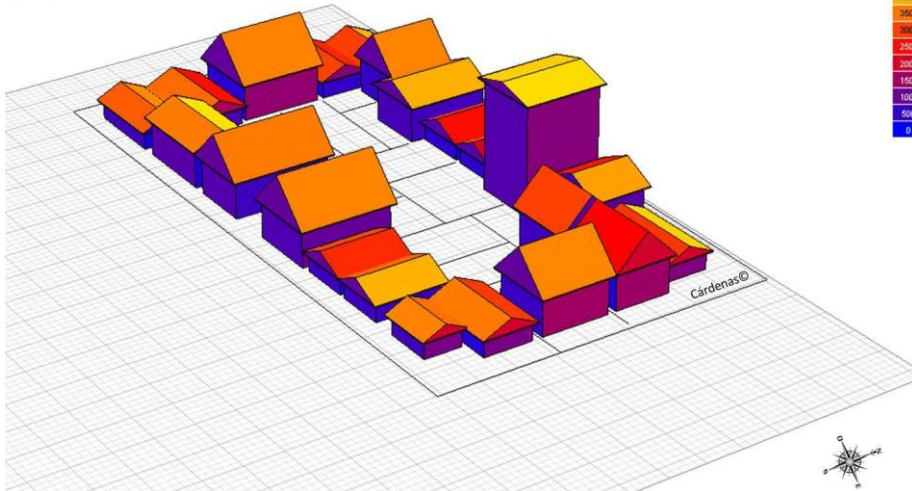
Los rangos de valores oscilan entre 0 a 5 [kWh/m²], pero es muy escaso encontrar valores máximos de 5 debido a la latitud. Además, dada la cercanía entre las viviendas y algunas sombras de los edificios vecinos; se observa una diversa valoración en techumbre; aunque pertenezcan a una misma tipología residencial. Por ejemplo, las viviendas de un piso residencial en la misma orientación, pero bajo el cono de sombra presenta una menor aportación energética, pues fluctúa entre los 2,5 [kWh/m²] y los 3,5 [kWh/m²]. Las techumbres presentan máximas predominantes de 4 k [Wh/m²] de radiación disponible, en cambio la fachada oriente alcanza entre 1 [kWh/m²] a 2,5 [kWh/m²].

A latitudes más altas tiende a reducirse la radiación solar y más aún si existen días nublados dada la ubicación costera de esta ciudad.



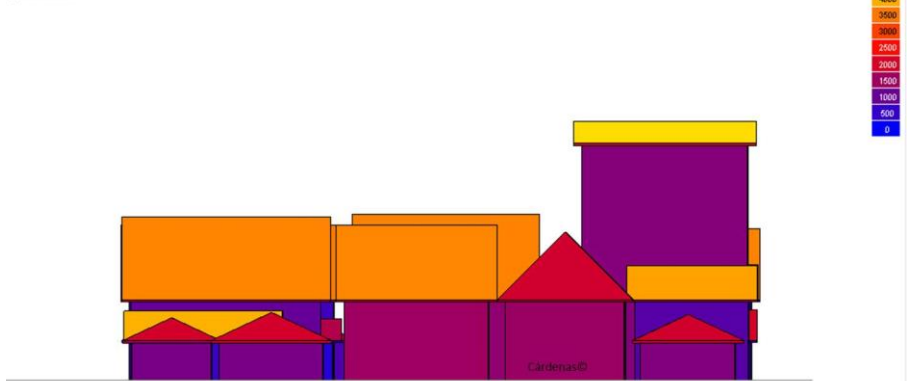
OBJECT ATTRIBUTES

Avg. Daily Radiation
Value Range: 0.0 - 5000.0 Wh/m2
(c) ECOTECT v5



OBJECT ATTRIBUTES

Avg. Daily Radiation
Value Range: 0.0 - 5000.0 Wh/m2
(c) ECOTECT v5



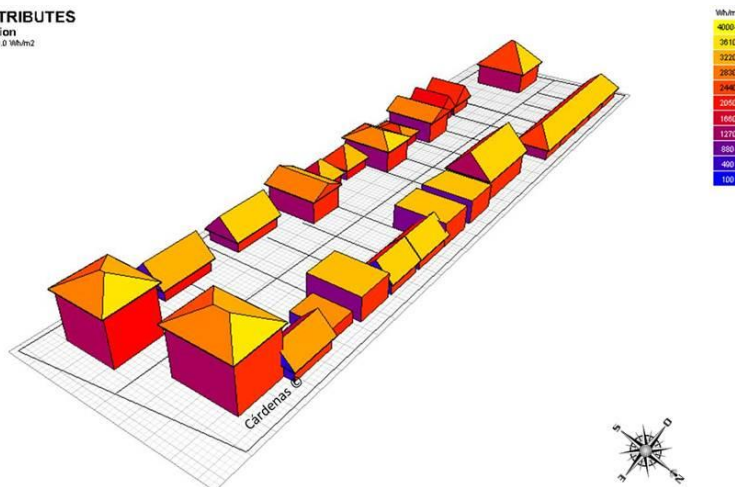
Coyhaique

Los rangos de valores oscilan entre 1 [kWh/m²] a 4 [kWh/m²] como promedio diario, alcanzando las superficies de techumbre inclinadas los mayores valores de radiación. Tipologías residenciales idénticas en orientación y superficie presentan diferentes oferta energética debido a su ubicación bajo el cono de sombra; variando de 3,2 [kWh/m²] a 3,6 [kWh/m²] una reducción de un 10% aproximadamente. En cambio, en la fachada sur de la manzana se observan valores de radiación entre 1,2 [kWh/m²] a 2,4 [kWh/m²].



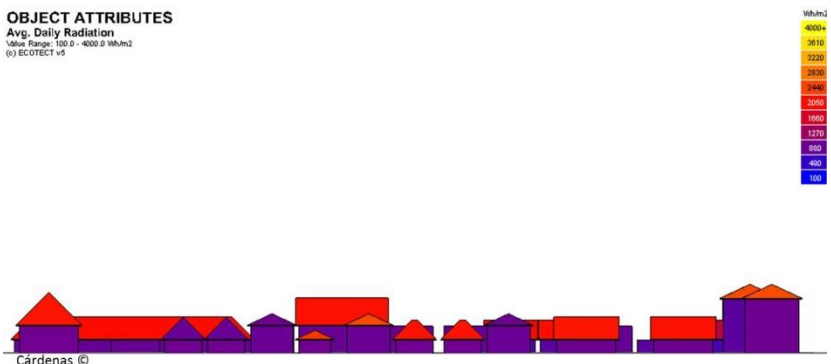
OBJECT ATTRIBUTES

Avg. Daily Radiation
Value Range: 100.0 - 4000.0 kWh/m2
(c) ECOTECH v5



OBJECT ATTRIBUTES

Avg. Daily Radiation
Value Range: 100.0 - 4000.0 kWh/m2
(c) ECOTECH v5



Finalmente, a continuación se presenta una tabla comparativa de los promedios de los valores de radiación global, promedios diarios en base anual utilizados en ambas modelaciones.

Tabla 6: Comparación de valores de radiación entre las modelaciones

Ciudad	Valor Radiación Global Promedio diario en base anual(kWh/m ²)	
	Modelación SIG	Modelación 3D
Talca	6	5
Puerto Montt	3,5	4,5
Coyhaique	4,3	4

Fuente: Elaboración Propia

Fuentes locales como el explorador solar del Departamento de Geofísica incorporan características locales de nubosidad, humedad, etc. Por otra parte, fuentes internacionales requieren ser afinadas localmente para ajustar los valores de radiación a condiciones atmosféricas. Otro aspecto a considerar se refiere a la extensión de los períodos promediados: se presentan diferencias porque no tienen la misma cantidad de años, meses o días para calcular sus promedios (la extensión de las series de observaciones no son para el mismo período).



5. Tecnologías ERNC Comerciales para Uso Térmico

En esta sección se presentan las tecnologías ERNC actualmente comerciales y técnicamente factibles de utilizar para usos de calefacción residencial. Para las mismas se desarrolla un análisis de barreras y se presentan los costos asociados. En el anexo 2.8 se presenta una ficha técnica de cada una de las tecnologías revisadas.

Adicionalmente, se examina el reacondicionamiento térmico como la tecnología base sobre la que se debiera implementar el resto de las tecnologías ERNC que sean seleccionadas como factibles de implementación y las demandas de calefacción con esta tecnología implementada. En el anexo 2.7 se presenta el detalle de las tecnologías y costos para el reacondicionamiento térmico de viviendas.

Finalmente, en base a los antecedentes presentados anteriormente y a la disponibilidad de recursos, se evalúan cada una de las tecnologías.

5.1. Reacondicionamiento Térmico de Viviendas

En esta sección se presentan los costos estimados para el reacondicionamiento térmico de las actuales viviendas en cada ciudad, considerando para ello las distintas tipologías y exigencias térmicas dependiendo del año de construcción.

Además, en el anexo 2.7 se han caracterizado las viviendas beneficiadas con el actual subsidio térmico del Programa de Protección al Patrimonio Familiar (PPPF) y se cuantifican las potenciales viviendas a reacondicionar.

5.1.1. Costos de Reacondicionamiento

Para estimar los costos de reacondicionamiento se utiliza como aislación objetivo las exigencias propuestas por el MINVU para el año 2016, ya que las actuales exigencias son insuficientes para lograr los niveles de confort deseados o establecidos en países desarrollados. En particular, al año 2016 se realizarán nuevas modificaciones a la actual OGUC, las cuales aumentarán las exigencias térmicas en los complejos techumbre, muros y pisos.

Para estimar los costos unitarios de reacondicionamiento térmico en las viviendas se consideró la aplicación de aislante en los complejos techumbre, muros y pisos, además del cambio de ventanas y el sellado de infiltraciones. Las cantidades de aislante aplicado en cada vivienda corresponden a la mínima cantidad de material tal que cumpla con las exigencias propuestas.

Para cada vivienda se consideró la aplicación de un aislante de $0,043 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ en muros y techos, valor cercano al presentado para poliestireno expandido y lana mineral en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico. En el caso de pisos ventilados se consideró la aplicación de poliestireno extruído, mientras que en el caso de las ventanas se



consideró una ventana de vidrio doble termopanel. Además, se considera el sellado de infiltraciones.

Considerando los aspectos técnicos y los costos de éstos, detallados en el anexo 2.7, se calculan los costos totales de reacondicionamiento de las viviendas construidas antes del año 2000 en cada ciudad. Además, considerando la cantidad de viviendas de cada tipología, se calcula la inversión que se debiese hacer para llevar las actuales viviendas (construidas antes del año 2000) a los estándares pensados para el año 2016. Los valores estimados se presentan a continuación.

Tabla 7: Costos Totales de Reacondicionamiento por Tipología y Ciudad [USD]

Ciudades	Tipología	Valor Unitario por Vivienda [USD]	Valor Total Ciudad [USD]	Costo Promedio ⁵ Vivienda [USD]
Rancagua	Tip 1	457	26.709.788	784,2
	Tip 2	8.451		
	Tip 3	660		
	Tip 4	312		
	Tip 5	299		
	Tip 6	561		
	Tip 7	211		
	Tip 8	218		
	Tip 9	331		
Rengo	Tip 1	1.086	11.395.168	1.350,1
	Tip 2	10.152		
	Tip 3	1.587		
	Tip 4	676		
	Tip 5	675		
	Tip 6	1.182		
	Tip 7	502		
	Tip 8	299		
	Tip 9	809		
San Fernando	Tip 1	1.086	11.589.431	1.086,6
	Tip 2	10.152		
	Tip 3	1.587		
	Tip 4	676		
	Tip 5	675		
	Tip 6	1.182		
	Tip 7	502		
	Tip 8	299		
	Tip 9	809		

⁵ Promedio ponderado.



Ciudades	Tipología	Valor Unitario por Vivienda [USD]	Valor Total Ciudad [USD]	Costo Promedio ⁵ Vivienda [USD]
Talca	Tip 1	2.695	61.274.299	1.324,4
	Tip 2	7.893		
	Tip 3	640		
	Tip 4	300		
	Tip 5	285		
	Tip 6	546		
	Tip 7	203		
	Tip 8	210		
	Tip 9	1.657		
Chillán	Tip 1	2.997	33.295.269	1.509,2
	Tip 2	8.086		
	Tip 3	755		
	Tip 4	466		
	Tip 5	370		
	Tip 6	492		
	Tip 7	356		
	Tip 8	200		
	Tip 9	1.785		
Concepción	Tip 1	3.129	19.457.883	1.740,7
	Tip 2	8.536		
	Tip 3	1.012		
	Tip 4	497		
	Tip 5	513		
	Tip 6	834		
	Tip 7	409		
	Tip 8	273		
	Tip 9	1.901		
Temuco	Tip 1	3.137	75.391.402	1.779,1
	Tip 2	8.560		
	Tip 3	4.074		
	Tip 4	497		
	Tip 5	513		
	Tip 6	834		
	Tip 7	409		
	Tip 8	273		
	Tip 9	1.906		
Osorno	Tip 1	3.320	42.749.450	1.581,3
	Tip 2	9.097		
	Tip 3	4.321		
	Tip 4	509		
	Tip 5	528		
	Tip 6	849		
	Tip 7	416		



Ciudades	Tipología	Valor Unitario por Vivienda [USD]	Valor Total Ciudad [USD]	Costo Promedio ⁵ Vivienda [USD]
Puerto Montt	Tip 8	281	49.026.814	1.949,2
	Tip 9	2.015		
	Tip 1	3.384		
	Tip 2	9.391		
	Tip 3	4.482		
	Tip 4	540		
	Tip 5	605		
	Tip 6	2.647		
	Tip 7	441		
	Tip 8	331		
Coyhaique	Tip 1	3.335	34.344.701	3.142,8
	Tip 2	9.429		
	Tip 3	4.501		
	Tip 4	653		
	Tip 5	546		
	Tip 6	2.617		
	Tip 7	1.048		
	Tip 8	402		
	Tip 9	2.086		

Fuente: Elaboración Propia

5.1.2. Demandas de Calefacción de Viviendas Reacondicionadas

Con las características de los aislantes mencionados en la sección anterior (detallados en el anexo 2.7) y las dimensiones de las viviendas, se recalcularon los factores de transmitancia térmica y las demandas de calefacción para las viviendas reacondicionadas y construidas antes del año 2000, por tipología y en cada ciudad. Los valores obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 8: Transmitancias Térmicas G [W/m³ °C]

Tipología	Rancagua	Rengo – Sn. Fdo.	Talca	Concepción	Temuco	Osorno	Pto. Montt	Coyhaique
Tip 1	1,722	1,474	1,438	1,366	1,281	1,281	1,257	1,222
Tip 2	0,922	0,800	0,922	0,892	0,847	0,847	0,832	0,816
Tip 3	1,038	0,908	1,038	1,005	0,958	0,813	0,798	0,781
Tip 4	1,191	0,955	1,191	1,127	1,045	1,045	1,018	0,990
Tip 5	0,994	0,832	0,994	0,942	0,887	0,887	0,874	0,848
Tip 6	1,041	0,888	1,041	1,002	0,946	0,946	0,808	0,787
Tip 7	1,235	1,041	1,235	1,177	1,110	1,110	1,093	0,935
Tip 8	1,303	1,089	1,303	1,249	1,169	1,169	1,146	1,119
Tip 9	1,579	1,347	1,329	1,271	1,188	1,188	1,161	1,128

Fuente: Elaboración Propia



Con estas nuevas transmitancias y utilizando el método Grados Hora ya mencionado, se calcularon las demandas y potencias de cada tipología en cada ciudad. Los valores obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9: Demanda de Calefacción y Potencia de Viviendas Reacondicionadas

Ciudades	Parámetros	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Rancagua	Pi [W/m ²]	66,4	44,3	59,1	43,4	35,9	42,7	40,5	42,5	56,0
	P [W]	3749,3	9793,5	6091,8	2255,3	2433,6	3620,7	1312,5	1699,1	2225,7
	Dneta [kWh]	2268,5	5079,3	3310,6	2008,8	2410,1	2870,3	1046,8	1531,7	1347,7
	Dneta [kWh/m ²]	40,2	23,0	32,1	38,6	35,6	33,9	32,3	38,3	33,9
Rengo	Pi [W/m ²]	60,3	40,9	55,1	36,3	31,6	38,6	35,7	37,2	50,5
	P [W]	3408,0	9038,4	5679,8	1886,8	2139,6	3268,6	1156,4	1486,2	2006,8
	Dneta [kWh]	2512,4	5965,8	3926,9	1862,2	2416,3	3020,4	1057,7	1517,9	1470,6
	Dneta [kWh/m ²]	44,5	27,0	38,1	35,8	35,7	35,7	32,6	37,9	37,0
San Fernando	Pi [W/m ²]	55,0	37,3	50,4	32,9	28,6	35,1	32,1	33,6	45,8
	P [W]	3107,4	8248,0	5186,9	1707,8	1936,4	2971,5	1040,5	1342,2	1821,6
	Dneta [kWh]	3211,9	7850,5	5113,1	2271,4	2923,2	3759,4	1299,1	1839,4	1869,1
	Dneta [kWh/m ²]	56,8	35,5	49,6	43,7	43,2	44,4	40,1	46,0	47,0
Talca	Pi [W/m ²]	49,7	40,6	54,3	39,6	32,8	39,1	36,7	38,7	41,7
	P [W]	2808,4	8990,3	5595,5	2058,7	2219,6	3313,8	1191,4	1547,1	1659,9
	Dneta [kWh]	2129,1	7212,9	4622,3	2468,5	2959,6	3600,5	1294,6	1874,0	1254,3
	Dneta [kWh/m ²]	37,7	32,6	44,9	47,5	43,7	42,5	39,9	46,8	31,5
Chillán	Pi [W/m ²]	54,3	45,1	60,4	43,2	35,9	43,4	40,6	42,9	46,2
	P [W]	3066,8	9987,0	6221,2	2245,7	2427,7	3678,1	1317,3	1717,3	1835,5
	Dneta [kWh]	3282,9	11375,4	7271,2	3622,0	4241,3	5480,8	1959,3	2812,4	1978,8
	Dneta [kWh/m ²]	58,1	51,4	70,6	69,7	62,6	64,7	60,4	70,3	49,8
Concepción	Pi [W/m ²]	39,6	33,8	45,5	30,7	25,9	31,9	28,9	30,6	33,0
	P [W]	2239,4	7474,9	4686,0	1596,9	1753,5	2701,9	936,1	1223,5	1310,9
	Dneta [kWh]	1040,1	4122,6	2741,3	1495,4	1963,3	2295,8	771,7	1174,1	594,1
	Dneta [kWh/m ²]	18,4	18,6	26,6	28,8	29,0	27,1	23,8	29,4	14,9
Temuco	Pi [W/m ²]	48,1	40,7	45,6	37,6	31,7	38,7	35,8	37,6	40,5
	P [W]	2715,4	8999,8	4701,2	1953,7	2148,4	3278,9	1161,3	1505,4	1608,5
	Dneta [kWh]	2399,0	8591,0	4027,5	2740,6	3371,0	4297,6	1510,4	2160,9	1419,5
	Dneta [kWh/m ²]	42,5	38,8	39,1	52,7	49,8	50,7	46,6	54,0	35,7
Osorno	Pi [W/m ²]	52,3	44,2	49,6	41,0	34,7	42,1	39,3	41,2	44,2
	P [W]	2955,5	9769,1	5107,1	2133,8	2347,7	3570,0	1275,0	1647,6	1758,6
	Dneta [kWh]	4250,1	14900,1	7162,5	4291,9	5076,4	6788,4	2417,9	3367,0	2534,1
	Dneta [kWh/m ²]	75,2	67,4	69,5	82,6	75,0	80,1	74,6	84,2	63,7
Puerto Montt	Pi [W/m ²]	39,7	34,0	37,9	30,6	26,1	27,1	29,1	30,6	32,9
	P [W]	2245,9	7511,8	3908,7	1588,9	1769,5	2297,2	943,1	1225,6	1309,2
	Dneta [kWh]	1957,9	7183,7	3317,7	2299,3	2925,5	2760,2	1240,0	1820,5	1124,4
	Dneta [kWh/m ²]	34,7	32,5	32,2	44,2	43,2	32,6	38,2	45,5	28,3
Coyhaique	Pi [W/m ²]	61,7	52,3	58,6	48,2	41,3	42,6	40,4	49,2	52,3
	P [W]	3483,3	11579,4	6040,7	2508,0	2793,0	3608,7	1309,1	1967,4	2078,1
	Dneta [kWh]	5412,1	19046,0	9216,6	5153,9	6138,5	6724,5	2446,9	4118,3	3238,4
	Dneta [kWh/m ²]	95,8	86,1	89,5	99,2	90,7	79,4	75,5	103,0	81,4

Fuente: Elaboración Propia



Además, considerando la distribución de las tipologías en las ciudades⁶, se calculó la demanda promedio de una vivienda en cada lugar para cada uno de los períodos en los que se ha visto afectada la Reglamentación Térmica. Los valores obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 10: Potencias y Demandas Promedio de las Viviendas en cada Ciudad por Período

Ciudades	Parámetros	PRE 2000	2000-2007	2007-2016	Post 2016 ⁷	Vivienda Reacondicionada ⁸
Rancagua	Pi [W/m ²]	140,8	75,3	70,8	49,8	47,9
	Dneta [kWh/m ²]	170,9	71,6	65,1	36,7	34,2
Rengo	Pi [W/m ²]	151,4	81,2	76,3	43,2	42,9
	Dneta [kWh/m ²]	218,6	96,3	88,4	36,4	36,0
San Fernando	Pi [W/m ²]	138,9	74,2	69,7	39,2	39,0
	Dneta [kWh/m ²]	258,0	116,5	107,1	45,6	45,1
Talca	Pi [W/m ²]	129,7	68,0	59,3	43,2	41,5
	Dneta [kWh/m ²]	204,6	86,3	71,0	43,6	40,8
Chillán	Pi [W/m ²]	148,6	78,4	68,4	47,0	45,8
	Dneta [kWh/m ²]	301,6	134,2	111,2	64,7	62,0
Concepción	Pi [W/m ²]	119,2	62,3	54,2	33,9	33,3
	Dneta [kWh/m ²]	187,5	71,4	57,6	24,9	24,1
Temuco	Pi [W/m ²]	142,1	74,1	62,1	40,2	39,6
	Dneta [kWh/m ²]	273,4	116,5	91,4	46,8	45,5
Osorno	Pi [W/m ²]	153,6	80,3	67,5	43,9	43,2
	Dneta [kWh/m ²]	382,5	173,8	138,5	76,5	74,7
Puerto Montt	Pi [W/m ²]	122,0	62,6	44,5	32,5	32,0
	Dneta [kWh/m ²]	255,8	104,8	63,4	37,7	36,8
Coyhaique	Pi [W/m ²]	187,8	97,5	56,0	50,1	49,6
	Dneta [kWh/m ²]	461,1	214,5	105,3	90,2	89,0

Fuente: Elaboración Propia

Como puede apreciarse, las transmitancias y demandas obtenidas para viviendas reacondicionadas son significativamente menores que las de los períodos Pre2000. La tabla siguiente muestra la reducción teórica de la demanda de calefacción al reacondicionar viviendas construidas en el período Pre2000 y 2000-2007.

⁶ Se asume que la distribución de las tipologías se mantiene en el tiempo.

⁷ Los valores presentados fueron calculados considerando la transmitancia mínima exigida en cada ciudad.

⁸ Las demandas de las viviendas reacondicionadas son levemente menores a las presentadas para el período Post 2016. Esto se debe a que debido al formato de los aislantes (planchas) no es posible aplicar una cantidad menor que cumpla las exigencias mínimas.



Tabla 11: Reducción de la Demanda en Viviendas Reacondicionadas en Períodos Pre2000 y 2000-2007

Ciudades	PRE 2000	2000-2007
Rancagua	80,0%	52,2%
Rengo	83,5%	62,6%
San Fernando	82,5%	61,3%
Talca	80,1%	52,8%
Chillán	79,5%	53,8%
Concepción	87,2%	66,3%
Temuco	83,3%	60,9%
Osorno	80,5%	57,0%
Puerto Montt	85,6%	64,9%
Coyhaique	80,7%	58,5%

Fuente: Elaboración Propia

Para proyectar los futuros y potenciales proyectos habitacionales por beneficiar en cada ciudad no se considerarán las condiciones exigidas actualmente por el programa PPPF, sino que todas aquellas viviendas que no cumplan las exigencias térmicas. El motivo de esto es que el parque de viviendas posibles de reacondicionar es extenso y el PPPF, y las condiciones que actualmente exige, se hacen cargo de una pequeña parte de este parque. Por lo mismo, según indican profesionales del MINVU, el objetivo de este programa es que en el futuro llegue a más viviendas⁹.

Debido a las razones expuestas anteriormente, para estimar las potenciales viviendas a reacondicionar se considerarán todas aquellas construidas antes del año 2000. En las secciones posteriores se detalla la estimación de las potenciales viviendas a reacondicionar.

Finalmente, se lleva a cabo una estimación del cálculo de costos de inversión y nivelado por energía reducida gracias al reacondicionamiento térmico. Ello se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 12: Costo de Reacondicionamiento Térmico por Energía Reducida¹⁰

Ciudad	Costo Inversión por energía reducida [US\$/kWh]	Costo Nivelado por energía reducida [US\$/kWh]	Ciudad	Costo Inversión por energía reducida [US\$/kWh]	Costo Nivelado por energía reducida [US\$/kWh]
Rancagua	0,0101	-0,0977	Concepción	0,0189	-0,0857
Rengo	0,0128	-0,0952	Temuco	0,0150	-0,0468
San Fernando	0,0109	-0,0970	Osorno	0,0119	-0,0474
Talca	0,0126	-0,0652	Puerto Montt	0,0193	-0,0422
Chillán	0,0105	-0,0653	Coyhaique	0,0139	-0,0497

Fuente: Elaboración Propia

⁹ Según conversaciones sostenidas con profesionales del MINVU.

¹⁰ Los costos presentados incluyen IVA.



Como se observa en el cuadro, los costos de inversión por consumo de energía reducido varían entre 0,0101 y 0,0193 [KUS\$/kWh], dependiendo de la ciudad en que se lleve a cabo y en particular, del tipo de vivienda predomina en dichas localidades. Por su parte, el costo nivelado (que incluye la reducción de costos por el combustible reducido) varía entre -0,0977 y -0,0422 [KUS\$/kWh], dependiendo de la latitud de la ciudad en que se implementa y del mix de combustibles tradicionales que se utiliza en ellas.

5.2. Tecnologías ERNC Existentes

En esta sección se pretende identificar, seleccionar y caracterizar las tecnologías ERNC comerciales para uso térmico, según zonas climáticas análogas a las zonas centro-sur de nuestro país, considerando soluciones centralizadas, distritales u otras soluciones del tipo unitarias no tradicionales y excluyendo el uso de calefactores a leña.

5.2.1. Antecedentes internacionales

De acuerdo a los análisis desarrollados por el consultor, y con la conformidad de la contraparte técnica, se han considerado tres países de Europa como referencia para analizar el uso de tecnologías de calefacción renovable. Ellos son España, que posee un clima mediterráneo similar al centro – sur de Chile; Alemania que queda en la zona climática fresca/templada y Francia, donde se pueden distinguir tres áreas climáticas características: la del dominio oceánico, la de dominio mediterráneo y la continental, marcado por períodos de frío, nevadas y brucas heladas; lo que se puede aproximar al extremo sur de Chile.

En la figura siguiente se presenta la participación de las energías renovables en la demanda total de calor en países de la OCDE, incluidos los tres países revisados.

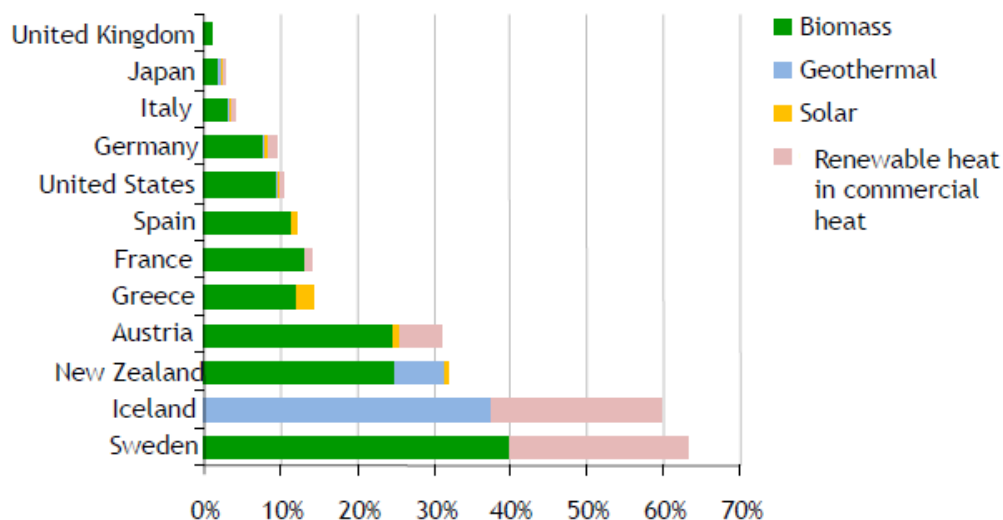


Figura 12: Participación energías renovables por tipo en demanda total de calor en países OCDE
Fuente: IEA (2010)

España

Este país posee muy buenos recursos solares, pero no ha tenido un gran desarrollo en tecnología solar térmica (a diferencia de la fotovoltaica). Se puede estimar un potencial de cerca de 1.000 MWt.

En el caso de la biomasa limpia, se han desarrollado los pellets desde 2008, con una producción y consumo cercano a 100 Kt.

Con respecto a las bombas de calor, el país ha tenido un menor desarrollo que en el resto de Europa.

Alemania

Este país posee menores radiaciones solares que España, pero posee un buen desarrollo de sistemas solares térmicos, con cerca de 10.000 MWt instalados.

El país tuvo un aumento muy importante en el desarrollo de pellets hasta 2007, pero decayó por volatilidad de precios y abastecimiento. Actualmente se dispone de una producción de 1,8 MMt y un consumo de 1,2 MMt al 2010.

En el caso de las bombas de calor, el país es uno de los líderes en el mercado de estos artefactos.



Francia

Este país tiene un buen desarrollo de sistemas solares térmicos (más de 1.000 MWt) sin tener las mejores condiciones naturales de radiación.

Es un buen productor y consumidor de pellets, con valores cercanos a 200 Kt al 2008 y es uno de los líderes en el mercado de bombas de calor.

Con respecto a las expectativas de la matriz energética de Europa, a continuación se presenta la prospectiva de Alemania de uso de energías ERNC en calefacción al año 2050.

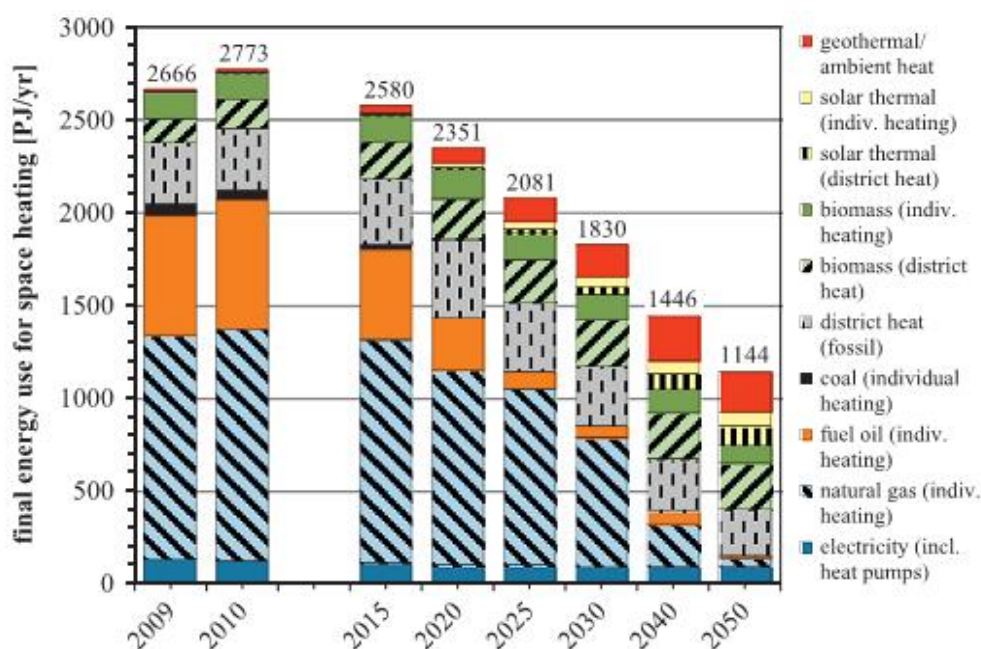


Figura 13: Participación futura de las energías renovables en calefacción en Alemania

Fuente: Long-term scenarios and strategies for the deployment of renewable energies in Germany, 2013.

La meta esperada por Alemania al año 2050 es de un 53% de participación ERNC en calefacción. Ello incluye un 15% de geotermia, 12% de solar, 20% de biomasa distrital y 6% de biomasa individual.

5.2.2. Tecnologías consideradas en el estudio

A continuación se listan las distintas tecnologías identificadas y desarrolladas con ERNC que son posibles de aplicar a calefacción. Se consideraron para este estudio tecnologías de uso directo en calefacción, descartando tecnologías ERNC para uso eléctrico, que podrían ser utilizadas de forma indirecta para calefacción. Se descartaron además tecnologías que no pueden utilizarse por falta



de recursos energéticos, según se ha indicado anteriormente, en el capítulo 4 del presente informe.

- **Estufas a pellets:** Instalación de estufas individuales al interior de las casas, operando con pellets. No considera instalaciones complementarias. La tecnología puede aplicarse tanto en viviendas existentes como en viviendas nuevas.
- **Calefacción distrital con biomasa:** Instalación de una central de calefacción para conjuntos de casas, operando con calderas a biomasa, particularmente astillas. Considera además la instalación de los sistemas de distribución de agua caliente y de agua caliente sanitaria al interior de las casas. La tecnología puede aplicarse únicamente sobre viviendas nuevas instaladas en condominio.
- **Calefacción distrital con bombas de calor:** Instalación de una central de calefacción para conjunto de casas, operando con bombas de calor geotérmicas de gran escala. Considera además la instalación de los sistemas de distribución de agua caliente y de agua caliente sanitaria al interior de las casas. La tecnología puede aplicarse únicamente sobre viviendas nuevas instaladas en futuros proyectos habitacionales ordenados (condominios, poblaciones definidas por el regulador).
- **Calefacción distrital con calor residual de procesos industriales:** Instalación de sistemas que permitan aprovechar el calor residual de instalaciones industriales cercanas. Considera además la instalación de los sistemas de distribución de agua caliente y de agua caliente sanitaria al interior de las casas. La tecnología puede aplicarse únicamente sobre viviendas nuevas instaladas en futuros proyectos habitacionales ordenados (condominios, poblaciones definidas por el regulador).
- **Aeroterminia:** Instalación de bombas de calor aerotérmicas y sistema de distribución de calor al interior de las casas. Se considera la aplicación de la tecnología únicamente en viviendas nuevas, dadas las necesidades de intervención para la instalación de sistemas internos de distribución.
- **Bombas de calor geotérmicas:** Instalación de bombas de calor geotérmicas (incluyendo instalaciones en el patio de las casas) y la distribución de calor al interior. Se considera la aplicación de la tecnología únicamente en viviendas nuevas, dadas las necesidades de intervención para la instalación de sistemas internos de distribución.
- **Colectores solares termodinámicos:** Instalación de sistemas de bombeo de calor correspondientes a colectores solares termodinámicos y la distribución de calor al interior de las casas. Se considera la aplicación de la tecnología únicamente en viviendas nuevas, dadas las necesidades de intervención para la instalación de sistemas internos de distribución.
- **Paneles solares térmicos:** Instalación de colectores solares, sistema de almacenamiento y distribución de calor al interior de las casas. La tecnología puede aplicarse tanto en viviendas existentes como en viviendas nuevas.

5.3. Posibilidad de una integración a través de micro redes

La posibilidad de usar y coordinar recursos que son intermitentes y que dependen de un uso inteligente de las mismas es la base para el concepto de micro redes inteligentes. A continuación se presenta la visión de la AIE respecto de la energía sostenible inteligente, que incluye recursos eléctricos y térmicos.

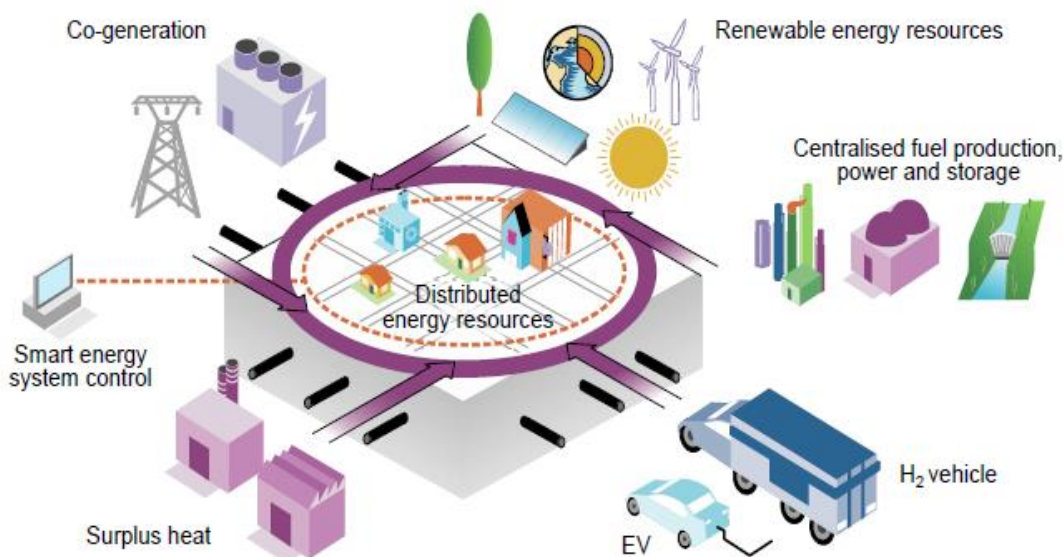


Figura 14: Sistema de energía sostenible inteligente
Fuente: Energy Technology Perspectives, 2012

La forma de maximizar la oportunidad de energías renovables para calefacción y climatización requiere que se haga el mejor uso de la energía renovable intermitente cuando ella está disponible, por ejemplo a través de bombas de calor y otros elementos de alta eficiencia.

Adicionalmente se requiere almacenar la energía renovable intermitente de manera eficiente para su uso futuro cuando exista demanda de los consumidores. Para ello se requiere disponer de un almacenamiento Térmico – Eléctrico inteligente

De esta forma, para facilitar este desarrollo se requiere del entendimiento y adopción de las tecnologías Smart-Grid y de mecanismos de mercado de la energía, que faciliten su implementación.

Los distintos recursos para calefacción se pueden coordinar de acuerdo al esquema que se presenta en la figura siguiente. En este caso, es fundamental disponer de almacenamiento térmico, que es una tecnología relativamente bien desarrollada, pero que por el momento no posee costos asequibles para la mayor parte de la población.



Figura 15: Sistema de gestión de energía automatizado para el hogar
Fuente: O'Driscoll, 2013

Para el desarrollo de este enfoque se requiere avanzar en el almacenamiento de energía para evitar los períodos pico de demanda de electricidad/calefacción y en la integración con micro-generación de energía renovable, incluyendo energía fotovoltaica y eólica para soluciones de calefacción y climatización en terreno.

Adicionalmente, se debe continuar con la I+D en materiales promisorios para el almacenamiento de energía térmica de manera compacta y mejorar I+D en materia de almacenamiento de temperatura (100-300°C). Por otro lado, para la integración de las tecnologías de calefacción y generación eléctrica, se pueden explorar sistemas híbridos: energía solar térmica + bomba de calor, bomba de calor + caldera de biomasa, etc.

5.4. Costos de inversión, mantención y operación de las tecnologías seleccionadas

En esta sección se presentan los costos de inversión, mantención y operación de las tecnologías revisadas anteriormente. Para ello se han usado referencias de instituciones oficiales internacionales y en algunos casos, los costos provienen de proveedores locales o casos reales implementados.

En el cuadro siguiente se resumen los costos de las tecnologías seleccionadas, los que se detallan en el anexo 4.



Tabla 13: Costos de inversión, operación y combustibles por tecnología

	Vida útil (años)	Costo Inversión 2013 (\$/kW)			Reducción costos al 2030		Costos O&M	Costo combustible (\$/Tcal)	Fuente de información
		Prom	Máx	Mín	Máx	Mín			
Leña	10	127.000	170.000	84.000	0	0	2.0%	43,314,286 ¹¹	Costos: Proveedores Nacionales (Sodimac y La Polar) Costo combustible: Homecenter
Estufa Pellets	10 - 20	144,368	222,353	46,146	0	0	2.0%	46,565,774 ¹²	Costos: proveedores Bosca, Amesti, Biomass.cl Proyecciones: IEA - "Renewables for heating and cooling", 2007 Costo combustible: CNE 2013
Calor distrital (astillas)	20 - 40 ¹³	894,710	1,350,000	572,151	-24%	-24%	2.0%	8,662,857 ¹⁴	Costos: Estudios Rancagua y Osorno y referencias internacionales Proyecciones Euroheat & Power-"Heat Roadmap Europe", 2013 Costo combustible: Homecenter
Aeroterminia	20	319,216	319,216	267,072	-22%	-22%	1.6%	0	Costos: proveedores Anwo Proyecciones: IEA - "Energy Technology perspectives", 2010
Bombas de calor individual	20	426,089	478,377	375,992	-22%	-22%	1.6%	0	Costos: proveedores Anwo Proyecciones: IEA - "Renewables for heating and cooling", 2007
Bombas de calor distrital	20	711,974	797,294	626,653			0.2%	0	Euroheat &Power - "Heat Roadmap Europe", 2013
Panel solar (agua)	20	704,136	972,988	435,284	-35%	-50%	1.5%	0	IEA - "Renewables for heating and cooling", 2012

Fuente: Elaboración Propia

¹¹ Valor calculado en base a un precio de la leña seca de 150 [\$/kg] (Fuente: Precio retail SODIMAC). Incluye costo de distribución a nivel local.

¹² Valor calculado en base a un precio de 200 [\$/kg] (Fuente: Precio retail SODIMAC). Incluye costo de distribución a nivel local.

¹³ Las referencias internacionales y los estudios nacionales para calefacción distrital consideran valores de 20-25 años para caldera de biomasa y de 40-50 años para la red de distribución (<http://www.land-energy.com/services/case-study-1/>; http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2013/Flett.pdf). Además, por ser una tecnología limpia que requiere inversiones de largo plazo, es necesario considerar horizontes de más largo plazo.

¹⁴ Valor calculado en base a un precio de astillas de 30 [\$/kg] (Fuente: (Universidad de Concepción, 2013). Incluye costo de distribución a nivel local.



Se han identificado diversos rangos de costos para las distintas tecnologías, lo que permite definir valores máximos y mínimos para el costo por kW instalado. Para efectos de la evaluación de costos, se considera el promedio entre el máximo y el mínimo. Por otro lado, el costo de operación y mantenimiento (O&M) se estima como un porcentaje de la inversión por kW instalado.

5.5. Definición de niveles de emisión de las tecnologías con ERNC

De los recursos y tecnologías mencionadas, las únicas en las que se han identificado emisiones de contaminantes son la biomasa (leña y pellets) y la geotermia, cuyos niveles se detallan a continuación.

5.5.1. Leña

En el caso de la leña en Chile, es posible identificar numerosos artefactos de calefacción, entre ellos cocinas, estufas de cámara simple y doble (también conocidas como estufas de doble combustión), salamandras, chimeneas y braseros. Estos artefactos poseen distintos Factores de Emisión debido principalmente a las diferencias en los diseños de cada uno y a la inexistencia, hasta octubre del presente año, de una norma nacional que regulara los niveles de emisiones de estos.¹⁵

Además del diseño de los equipos, el modo de operación (uso de tiraje cerrado) y el estado de la leña (seca o húmeda) son variables relevantes en los niveles de emisiones. (Ambiente Consultores Ltda., 2007b)

Según indica (Ambiente Consultores Ltda., 2007b), la combustión de leña genera emisiones de material particulado fino (MP_{2,5}), monóxido de carbono, componentes volátiles, óxidos de nitrógeno y otros contaminantes. En cuanto a la emisión de CO₂, la leña se considera neutra.

De los contaminantes mencionados, el principal problema en Chile y para el cual existe mayor información a nivel nacional e internacional, es el Material Particulado (MP_{2,5} y MP₁₀¹⁶), motivo por el cual sólo se presentarán factores de emisión para este contaminante.

Las tablas presentadas a continuación muestran los factores de emisión de MP₁₀ y MP_{2,5} para distintos artefactos de calefacción utilizados en Chile. Para el caso del MP_{2,5} se considera que 93,1% del MP₁₀ emitido por combustión a leña corresponde a material particulado fino. (Instituto de Normalización, 2011)

¹⁵ A partir de octubre del año 2013 entró en vigencia la norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de la madera (D.S. 39/2011).

¹⁶MP_{2,5}: Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrones. MP₁₀ : Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrones.



Tabla 14: Factores de Emisión MP₁₀ Artefactos a Leña

Artefactos	Factores de Emisión MP ₁₀ [g MP _{2,5} / kg combustible]		
	Humedad 0-20 (%) ¹⁷	Humedad Mayor a 20 (%)	Mala Operación ¹⁸
Cocina a Leña	19,2	30,9	-
Estufa (cámara simple, doble o insert) ¹⁹	15,3	24,2	76,0
Salamandras	15,9	27,9	-
Chimeneas	16,6	27,9	-
Braseros	17,9	27,9	-

Fuente: Elaboración Propia en base a (Ambiosis, 2009), (CENMA, 2008) y (Enviromodelling Ltda., 2009)

Tabla 15: Factores de Emisión MP_{2,5} Artefactos a Leña

Artefactos	Factores de Emisión MP _{2,5} [g MP _{2,5} / kg combustible]		
	Humedad 0-20 (%)	Humedad Mayor a 20 (%)	Mala Operación
Cocina	17,9	28,8	-
Estufa Actual con Cámara Simple	14,2	22,5	70,76
Estufa Actual con Cámara Doble	14,2	22,5	70,76
Salamandras	14,8	26,0	-
Chimeneas	15,5	26,0	-
Braseros	13,3	21,0	-
Estufa Comercio General ²⁰	2,10 ²¹	3,3 ²²	70,8 ²³

Fuente: Elaboración Propia en base a (Ambiosis, 2009), (CENMA, 2008), (Enviromodelling Ltda., 2009) e (Instituto de Normalización, 2011)

¹⁷ La humedad de 20% está expresada en base húmeda, equivalente a 25% en base seca.

¹⁸ Equivalente a uso de tiraje cerrado.

¹⁹ En la práctica, la combustión con cámara simple, con doble cámara o tipo "insert" es la misma, por lo que se considera el mismo FE para todas. Por otra parte, no existen estudios experimentales para cada tipo de artefacto, por lo que, según la opinión de profesionales del MMA, es recomendable utilizar el mismo FE para estos artefactos.

²⁰ Estufa comercializada a partir del 1º de marzo de 2013.

²¹ Valor correspondiente a la conversión de 2,5 g/hr, el cual ha sido calculado en base a cálculos realizados por profesionales del MMA. El valor de 2,5 gr/hr corresponde al valor permitido por la Norma de Emisión de Calefactores para calefactores que se comercialicen a partir del 1º de marzo del año 2013.

²² Se asume, para ambos calefactores, que la emisión de MP_{2,5} con utilización de leña húmeda aumenta en la misma proporción que en el caso de los antiguos calefactores. De esta manera, la emisión de un artefacto operado con leña húmeda es 1,58 veces la emisión del mismo calefactor operado con leña seca.

²³ Se asume el mismo valor de las estufas antiguas debido a la alta variabilidad de las emisiones bajo modo de operación con tiraje cerrado y dado que no se han realizado estudios para determinar la emisión de MP bajo este modo de operación para los nuevos equipos.



Es importante mencionar que las emisiones de MP de los artefactos nacionales son altamente variables, pudiendo ser la relación entre el peor y el mejor calefactor de 50 a 1, aún en condiciones óptimas de combustible y operación (ULLOA P., CONTRERAS C.G., COLLADOS, 2010) Dada la alta variabilidad presentada, se imposibilita la asignación de un valor único característico a cada artefacto (Ambiente Consultores Ltda., 2007b). A pesar de lo anterior y a modo de referencia, los valores presentados en la tabla anterior son una aproximación utilizada en numerosos estudios.

5.5.2. Pellets

Por otra parte, los sistemas de combustión a pellet tienen muy bajas emisiones debido al diseño de los equipos y a las características del combustible. En el caso de Chile, la gran mayoría de las estufas comercializadas son importadas y tienen certificaciones de organismos internacionales. Para estos equipos, el factor de emisión es de aproximadamente 1,19 [g MP_{2,5}/kg combustible], valor que corresponde al presentado en el estudio “PM_{2,5} Emission Reduction Benefits of Replacing Conventional Uncertified Cordwood Stoves with Certified Cordwood Stoves or Modern Pellet Stoves” (OMNI Environmental Services Inc., 2005)²⁴.

En el caso de los equipos nacionales, se ha identificado que la empresa BOSCA es la única productora local y según indican sus certificados, las emisiones de MP van desde 0,54 [gr/hr] a 0,93 [gr/hr] dependiendo de la tasa de quemado utilizada.

5.6. Evaluación de Tecnologías

De acuerdo a los antecedentes presentados en las secciones anteriores, a continuación se hará una selección preliminar de tecnologías factibles de ser implementadas previo a los análisis económicos y de escenarios factibles a desarrollar en el software LEAP. El análisis se llevará a cabo de acuerdo a los recursos energéticos disponibles en las distintas ciudades, el análisis de barreras de las tecnologías, factibilidad técnica de las mismas y costos por kW instalado.

Cabe hacer notar que de acuerdo a la mayoría de los criterios que se acaban de mencionar, para el contexto de la línea base sin restricciones ambientales (la contaminación ambiental es el principal problema que enfrenta este combustible en la actualidad en las zonas estudiadas), la leña es la alternativa más barata y más directamente utilizada en viviendas individuales y comunitarias, lo que se ve reflejado en la línea base de penetraciones tecnológicas que se desarrolla en la sección 6, la cual sirve de base para evaluar los escenarios alternativos. Sin embargo, el objetivo de la modelación de estos escenarios alternativos es determinar la penetración de otras tecnologías

²⁴ El valor presentado en el estudio corresponde al promedio de las emisiones de MP_{2,5} medidas en estufas a pellets en Estados Unidos, el cual está estimado en 2,5 [lb MP_{2,5}/ton combustible] (o equivalentemente 1,19 gr/kg de combustible).



renovables que no generen impactos de contaminantes locales (principalmente material particulado).

5.6.1. Disponibilidad de Recursos

Como se observa en el cuadro siguiente, en el caso de la tecnología solar, dada la posibilidad de utilización del recurso como opción de calefacción directa (no a través de la generación de electricidad), la opción Solar Térmico a través de agua es la más conveniente hasta la X Región, donde se logran valores sobre los 6.000 kWh por vivienda.

Para los recursos eólicos, las tecnologías parecen ser convenientes en las ciudades de San Fernando y Coyhaique.

En el caso de la geotermia, la de alta entalpía quedó descartada en todas las ciudades dada la lejanía de los puntos geotérmicos identificados. Las pérdidas que se producen en la transmisión del calor hacen infactible su uso. Para la geotermia de baja entalpía, ella ha sido identificada como una tecnología viable dado su alto potencial energético, superior a los 10.000 [kWh] en todas las ciudades analizadas.

Para la biomasa (leña) se puede apreciar que se dispone de recursos de interés en la ciudad de San Fernando y en las ciudades de Osorno, Puerto Montt y Coyhaique.

Dado el bajo desarrollo de la industria de los pellets de madera, esta no es un recurso de gran disponibilidad en las ciudades estudiadas (y en general en todo el país), a pesar que se espera un impulso importante de las tecnologías asociadas.

Por último, en el caso del calor residual, este se encuentra disponible fundamentalmente en zonas urbanas, pero más asociado a las grandes ciudades, lo que en este caso hace relevar a Concepción, con más de 17.000 [kWh] por vivienda.



Tabla 16: Resumen de disponibilidad de recursos por ciudad y sector urbano y rural (kWh/vivienda)

Ciudades / Recursos		Solar PV	Solar Térmico (Agua)	Solar Térmico (Aire)	Eólico	Geotérmico Alta Entalpía	Geotérmico Baja Entalpía	Biomasa		Pellets		Calor Residual	
		Urbano/Rural	Urbano/Rural	Urbano/Rural	Urbano/Rural	Urbano/Rural	Urbano/Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Rancagua	Mínimo	5.925	22.570	6.838	17	0	10.829	114	120	7	0	2.202	0
	Máximo	6.529	24.870	7.535	1.678	0	10.829	114	120	7	0	2.202	0
Rengo	Mínimo	5.734	21.844	6.618	6	0	13.020	318	329	0	0	2.203	0
	Máximo	7.402	28.196	8.542	7.952	0	13.020	318	329	0	0	2.203	0
San Fernando	Mínimo	4.626	17.623	5.339	8	0	12.827	5.106	4.527	0	0	2.024	0
	Máximo	6.154	23.443	7.102	10.779	0	12.827	5.106	4.527	0	0	2.024	0
Talca	Mínimo	5.956	22.689	6.874	41	0	14.762	2	2	14	0	2.909	0
	Máximo	6.247	23.799	7.210	565	0	14.762	2	2	14	0	2.909	0
Chillán	Mínimo	5.716	21.776	6.597	131	0	20.451	26	6	6	0	6.730	0
	Máximo	6.110	23.274	7.051	1.241	0	20.451	26	6	6	0	6.730	0
Concepción	Mínimo	5.774	21.995	6.663	81	0	14.883	1.155	4.281	36	0	19.207	0
	Máximo	6.159	23.461	7.108	2.021	0	14.883	1.155	4.281	36	0	19.207	0
T-PLC	Mínimo	4.574	17.424	5.279	135	0	16.230	209	195	59	0	232	0
	Máximo	4.863	18.527	5.613	1.386	0	16.230	209	195	59	0	232	0
Osorno	Mínimo	3.372	12.846	3.892	118	0	18.470	2.808	2.271	2	0	705	0
	Máximo	3.711	14.136	4.282	1.359	0	18.470	2.808	2.271	2	0	705	0
Pto. Montt	Mínimo	3.191	12.156	3.683	49	0	10.367	10.438	8.285	8	0	717	0
	Máximo	4.741	18.059	5.471	4.722	0	10.367	10.438	8.285	8	0	717	0
Coyhaique	Mínimo	2.861	10.898	3.302	78	0	28.183	126.452	77.158	0	0	68	0
	Máximo	5.208	19.839	6.010	12.000	0	28.183	126.452	77.158	0	0	68	0

Fuente: Elaboración Propia



5.6.2. Análisis de barreras de las tecnologías

De acuerdo al análisis de barreras presentado en el anexo 3, la tecnología solar térmica junto con la tecnología de estufas a Pellet cuentan con las condiciones más favorables, según este análisis, para alcanzar mayores niveles de penetración en los centros urbanos consolidados en escenarios alternativos a la leña. En el primer caso las ciudades factibles de considerar son las que se encuentran al norte de la zona de Osorno (inclusive). En el caso de los pellets se deberá recurrir a la implementación de alguna de las medidas propuestas en el análisis de barreras para que se propicie el desarrollo más agresivo de la industria con el fin de establecer una mayor oferta del energético en el mercado.

En expansión urbana se pudo identificar la tecnología Calefacción Distrital como alternativas interesante por desarrollar dado su potencial de reducción de emisiones y manejo de fuentes de emisión en los planes de descontaminación. En ambos casos, las ciudades de San Fernando, Osorno, Puerto Montt y Coyhaique son propicias para su desarrollo, dada la disponibilidad del recurso biomasa.

5.6.3. Factibilidad técnica de las tecnologías

En el cuadro siguiente se realiza el análisis resumido de la factibilidad de las tecnologías evaluadas en el estudio. Como se aprecia en el cuadro, las tecnologías asociadas a generación eléctrica aún poseen baja factibilidad técnica para calefacción.

Tabla 17: Factibilidad Técnica de las Tecnologías en Estudio

Tecnología	Uso en Calefacción	Tipo de viviendas	Factibilidad
Paneles solares fotovoltaicos	Electricidad para equipos eléctricos	Individual	Baja
Paneles solares térmicos	Calor directo	Individual / Colectivo	Alta
Muros solares	Calor directo	Individual	Media
Colectores solares termodinámicos	Calor directo	Individual	Media
Estufas a pellets	Calor directo	Individual	Alta
Calefacción distrital	Calor directo a partir de biomasa	Colectivo	Alta
Calefacción distrital geotérmica	Calor directo a partir de geotermia	Colectivo	Baja
Bombas de calor geotérmicas	Calor directo a partir de geotermia de baja entalpía	Individual / Colectivo	Media
Micro cogeneración-biocombustibles	Calor directo a partir de biocombustibles	Individual / Colectivo	Baja
Micro turbina eólica	Electricidad para equipos eléctricos	Individual / Colectivo	Baja

Fuente: Elaboración Propia



Es interesante notar que algunas tecnologías colectivas, como la calefacción distrital con biomasa limpia (astillas de madera) aparecen como factibles, seguramente dado por el gran desarrollo a nivel mundial y exitosas iniciativas piloto que se han desarrollado en el país.

5.6.4. Costos por kW

En la Tabla 13 se resumen los costos por kW para las tecnologías térmicas revisadas. Estos valores se utilizarán en la evaluación económica que se haga para las distintas penetraciones tecnológicas en los escenarios alternativos con tecnologías ERNC para calefacción.

Esta variable también aportará en el ordenamiento de las tecnologías que han sido previamente relevadas a partir del análisis de barreras y la factibilidad técnica. Se ha decidido que, dado que se evaluarán escenarios tecnológicos prospectivos, además que incluirán los cobeneficios asociados a su implementación, no es conveniente descartar tecnologías con factibilidad técnica, siendo que además son de interés de ser revisadas por la contraparte técnica.



6. Modelación de Penetración de Tecnologías ERNC

En esta sección se presentan los supuestos de la línea base utilizada como contrafactual para la evaluación de los escenarios tecnológicos alternativos. Ello incluye la proyección de viviendas, la participación de los distintos energéticos en la demanda de energía y la proyección de emisiones de $MP_{2,5}$. Adicionalmente se lleva a cabo la definición de los escenarios de penetración de tecnologías ERNC.

La línea base considera criterios relativos a la proyección de viviendas, dado el crecimiento económico y estructural de las ciudades, la composición de artefactos para calefacción y consumo de energéticos, donde predomina la leña en las ciudades más australes del país y las emisiones de MP que se generan por este hecho, las que se basan en los inventarios de emisiones de dichas ciudades.

6.1. Proyección de Viviendas

La metodología para proyectar las viviendas, considera elementos como el ingreso per cápita proyectado del país y la proyección de población. Esta información, en conjunto con información de referencia de otros países desarrollados, permite considerar como indicador de comparación y *driver* de la proyección el número de personas por vivienda. Este valor, en conjunto con la proyección de habitantes, permite obtener el número de viviendas por ciudad, como un stock que incluye los departamentos y las casas. Con el objeto de separar las casas y los departamentos, se realizó un análisis de sus trayectorias de participación para cada ciudad, con el objeto de obtener el dato de casas para cada una de ellas por año.

6.1.1. Proyección PIB Per Cápita

La proyección del PIB regional se obtuvo de la Fase I del proyecto (MAPS, 2013), en conjunto con la proyección regional de población del INE. Estos datos permitieron obtener el valor per cápita de cada región, que se usó como variable para proyectar el PIB per cápita de éstas, como se aprecia en la siguiente figura.

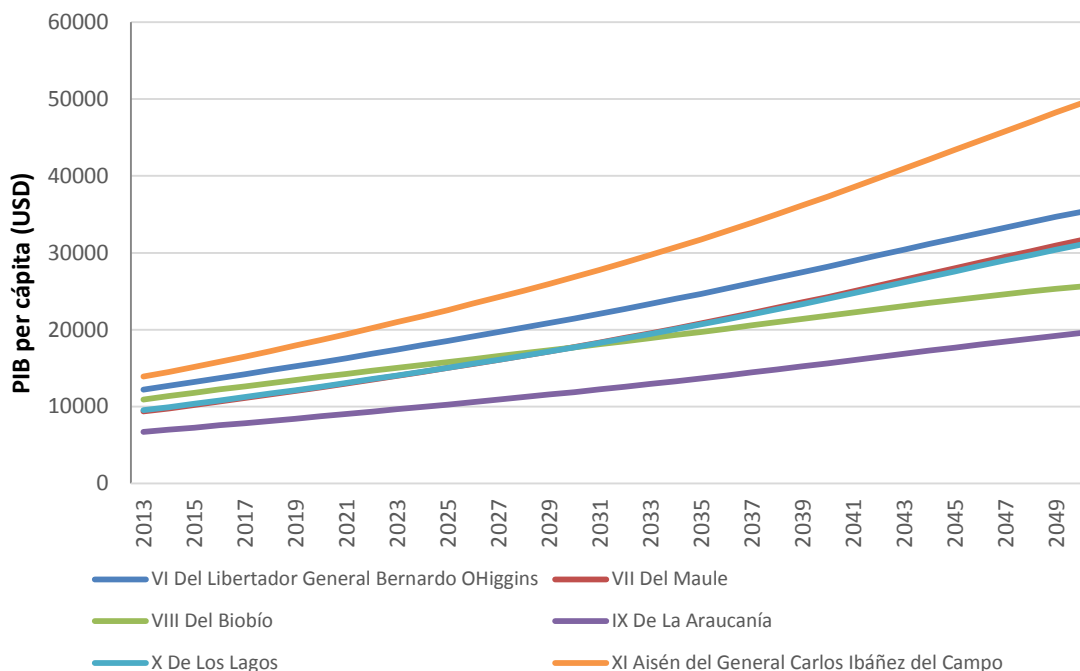


Figura 16: Proyecciones de PIB per cápita Regional en Chile
Fuente: Elaboración Propia en base a (MAPS, 2013)

Cómo se puede observar, el PIB per cápita en el caso más alto corresponde a la XI región en donde se espera un valor cercano a los 50.000 USD en el año 2050. En el caso de la IX Región, es la que posee el menor valor de PIB per cápita llegando a un valor de 20.000 USD. El caso de la XI región se debe principalmente al bajo crecimiento que se espera para la población en la región. De hecho, de acuerdo a las proyecciones del INE utilizadas por el proyecto MAPS Chile, la población crece desde un valor de 107.000 personas en la actualidad, a cerca de 124.000 en el año 2050. Ello corresponde a un crecimiento de menos de 0,4% anual. En el anexo digital "Proyección Viviendas" se puede apreciar la estimación desarrollada en cada región/ciudad.

Esta proyección permite ver cómo las regiones se compararán con países desarrollados, para apreciar la tendencia de habitantes por vivienda, como se observará a continuación.

6.1.2. Habitantes por vivienda

Tomando como referencia la metodología desarrollada en (MAPS, 2013) de la fase I, se utilizó el análisis desarrollado en ese estudio para observar hacia qué valor de habitantes por vivienda tendían los países desarrollados, en función de sus ingresos per cápita. Para el presente gráfico, se puede observar que hacia un valor de 40.000 USD se tiene un valor de 2 personas por vivienda, lo cual corresponde al caso de Suecia.

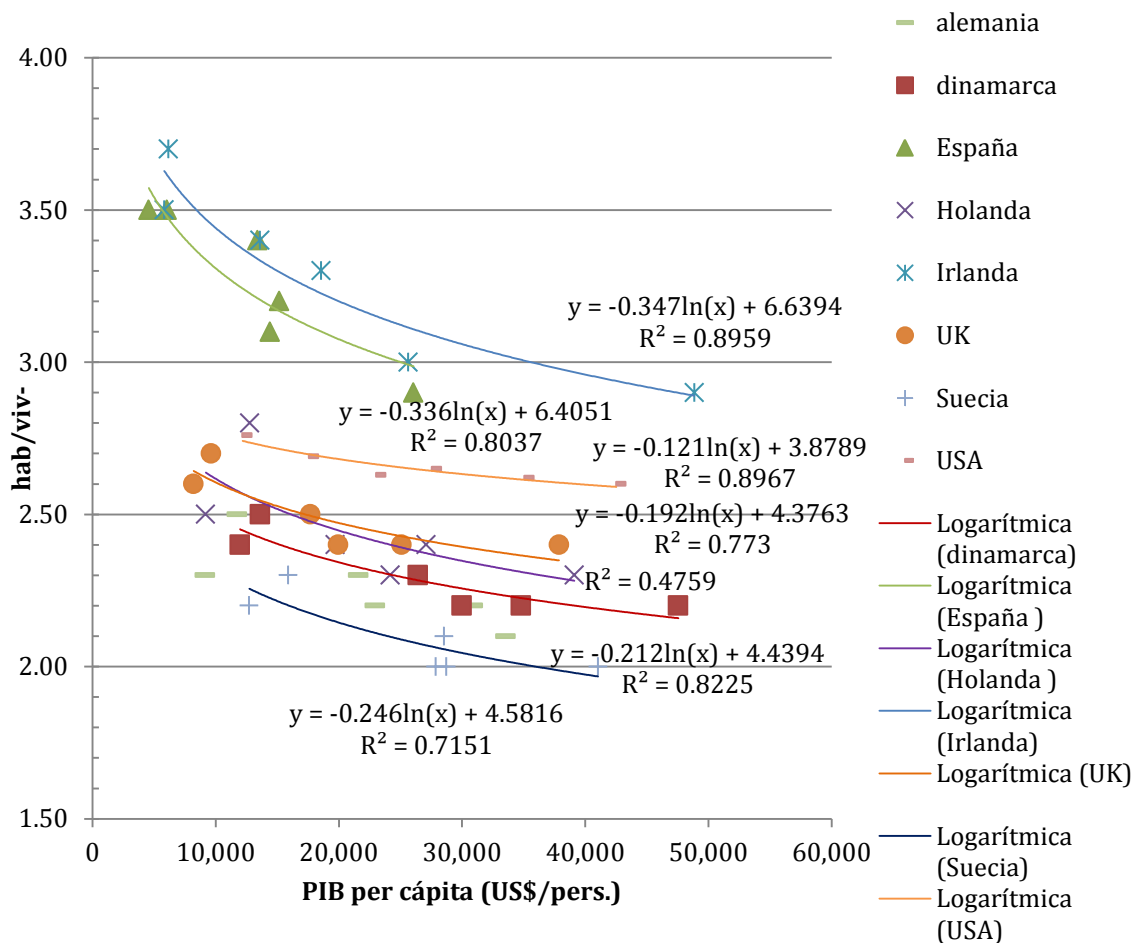


Figura 17: Habitantes por vivienda versus PIB per cápita
Fuente: (MAPS, 2013)

Con el objeto de proyectar los habitantes por vivienda, se procedió a utilizar la siguiente fórmula:

$$hab/viv_t = hab/viv_t * (1 - B * g_t)$$

Dónde B corresponde a la elasticidad de habitantes por vivienda e ingreso per cápita, cuyo valor corresponde a 0,29 de acuerdo al análisis de panel realizado con los datos anteriores, gracias al proyecto (MAPS, 2013). Para esta ecuación, g corresponde al crecimiento del PIB per cápita anual.

Como se puede apreciar en la figura siguiente, la mayoría de las ciudades proyectan valores entre 1,8 y 2,3 habitantes por vivienda, lo cual es acorde con el gráfico de tendencias de países desarrollados.

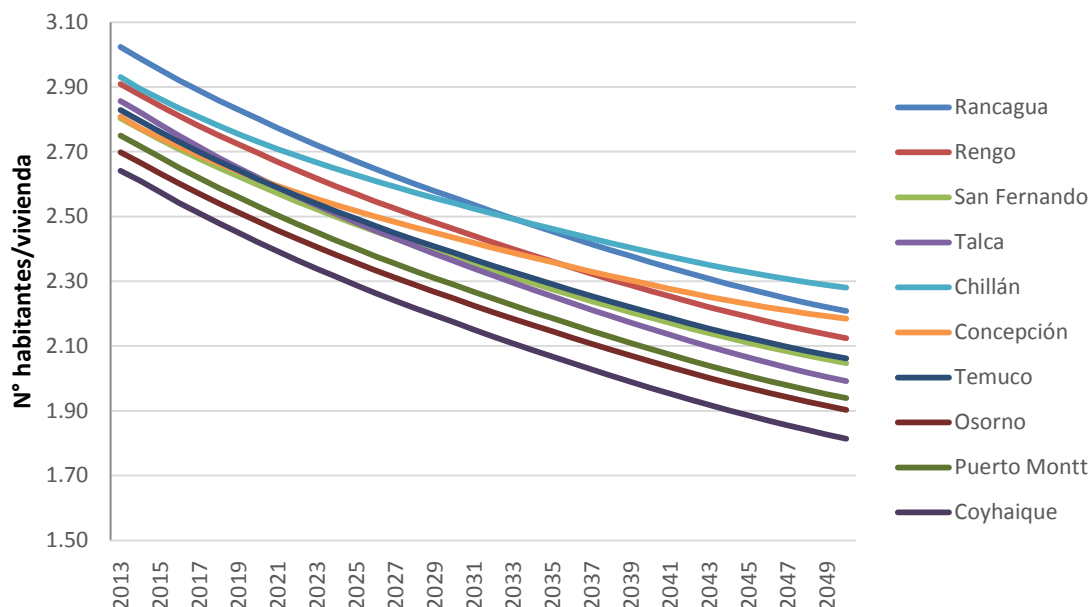


Figura 18: Proyección de Habitantes por vivienda
Fuente: Elaboración propia en base a metodología (MAPS, 2013)

6.1.3. Proyección de Población por ciudad

Para poder proyectar la cantidad de personas que viven en la ciudad, se tomó en cuenta solamente aquellas personas que habitan en el sector urbano. Para esto se usó como punto de partida la información disponible del censo 2012, ya que se consideró que esta opción puede tener menores errores de estimación, que tomar como punto de partida el censo 2002 (INE, 2013).

Para las proyecciones a nivel de ciudad se utilizó como referencia los crecimientos de población del (INE, 2013), los cuales se encontraban disponibles para cada ciudad. Estas dos informaciones, permitieron obtener la siguiente proyección de población para cada una de las ciudades en estudio.

Tabla 18: Proyección de Población Urbana

	Rancagua	Rengo	San Fernando	Talca	Chillán	Concepción	Temuco	Osorno	Puerto Montt	Coihaique
2013	224.738	44.809	60.039	194.911	160.064	211.372	257.326	142.925	214.148	53.008
2020	239.853	48.906	64.034	214.670	164.269	212.762	286.120	148.208	230.040	55.340
2030	262.263	55.244	69.974	245.339	169.627	213.617	330.778	155.140	240.799	57.928
2040	286.766	62.404	76.464	280.389	175.159	214.475	382.406	162.395	252.061	60.638
2050	313.559	70.491	83.556	320.447	180.871	215.336	442.093	169.990	263.849	63.474

Fuente: Elaboración Propia en base a (INE, 2013) e (INE, 2013)



6.1.4. Proyección de Casas por ciudad

Sobre la base de las proyecciones de habitantes y en conjunto con las estimaciones de habitantes por vivienda, ambos estimados anteriormente para cada ciudad, se obtienen las siguientes proyecciones de viviendas totales para cada una de las ciudades. Esta estimación considera el total de viviendas urbanas, es decir departamentos, casas y otros tipos de viviendas.

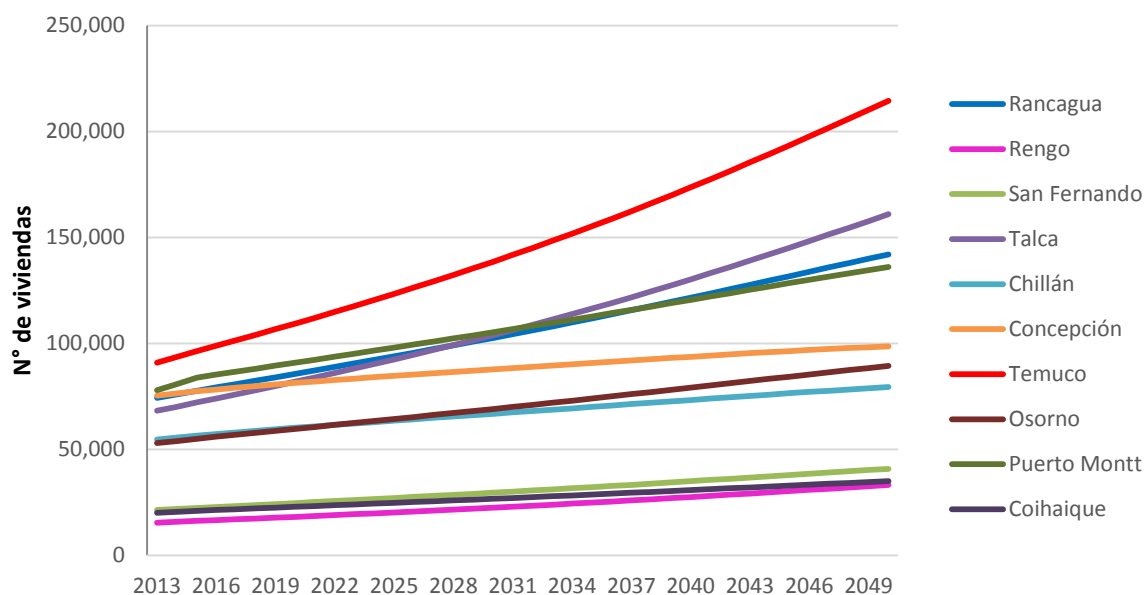


Figura 19: Proyección de viviendas urbanas por ciudad
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19: Proyección de Viviendas Urbanas por ciudad

	Rancagua	Rengo	San Fernando	Talca	Chillán	Concepción	Temuco	Osorno	Puerto Montt	Coihaique
2013	74.335	15.404	21.418	68.224	54.608	75.272	90.950	52.959	77.882	20.069
2020	85.599	18.140	24.647	81.936	60.155	81.328	109.384	59.640	90.859	22.857
2030	102.532	22.447	29.504	103.835	66.746	87.739	138.531	69.052	105.197	26.656
2040	121.519	27.484	34.947	130.183	73.283	93.664	173.596	79.101	120.506	30.761
2050	141.997	33.178	40.810	160.913	79.334	98.589	214.454	89.328	136.086	34.987

Fuente: Elaboración Propia

Para poder separar las casas de los departamentos, se hizo un estudio con referencia al censo 2002 y a los permisos de construcción otorgados entre los años 2002, con el objeto de ver las tendencias de participación de entre las casas. Con estas tendencias, se procedió a ajustar curvas que representen la situación de cada ciudad, con el propósito de ver la proyección de participación de casas en cada ciudad.

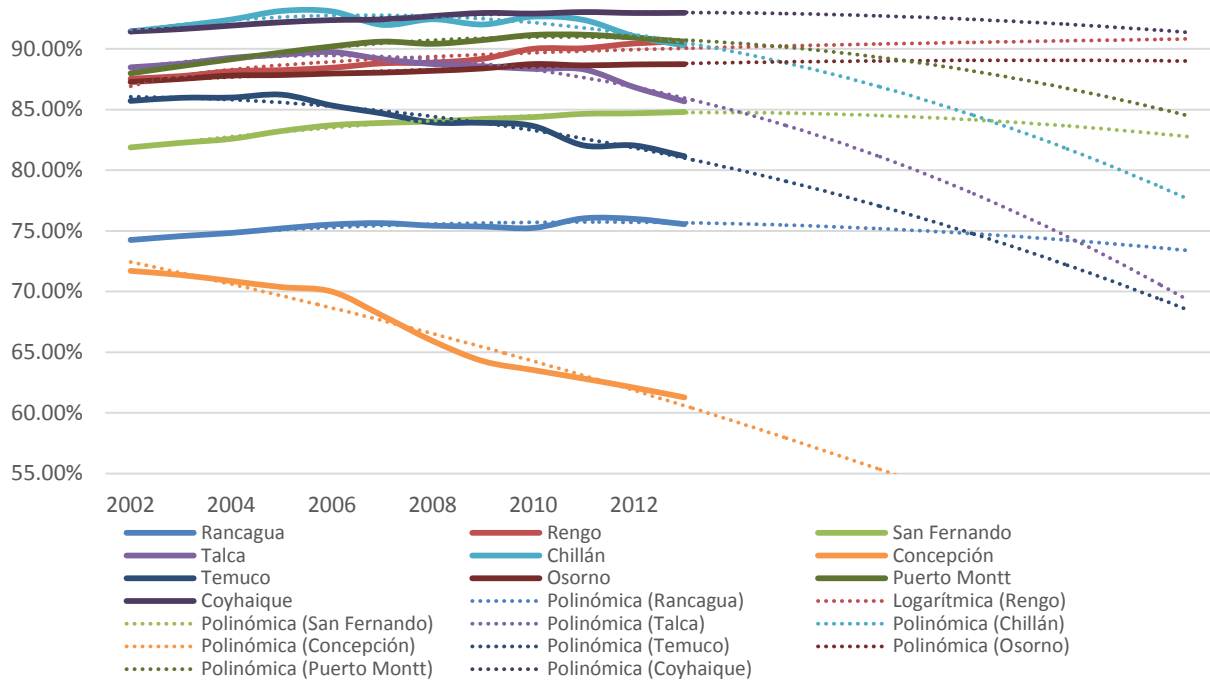


Figura 20: Participación de Casas (%) por ciudad
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en el gráfico anterior, hay ciudades donde la participación de las casas va en descenso, como es el caso de Concepción, Temuco, Talca, Chillán. Para el resto de las ciudades, se observa que se mantiene una tendencia relativamente constante, pero que empieza a tener ligeras caídas de la participación, como en el caso de Rancagua.

Como ejemplo, para poder proyectar esta participación en el caso de Concepción, se consideró que su tendencia posee el mismo comportamiento que Santiago Centro en el futuro, en donde hay una importante participación de departamentos en la última década. En el gráfico siguiente se puede observar la tendencia de Santiago Centro versus el resto de las ciudades.

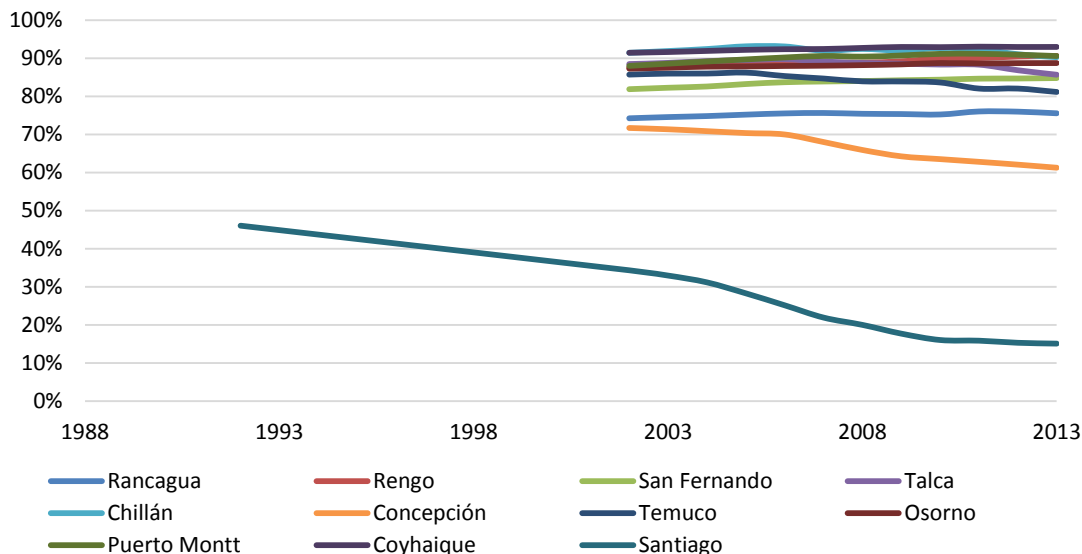


Figura 21: Participación de Casas (%) por ciudad incluyendo Santiago Centro
Fuente: Elaboración Propia

Para el resto de las ciudades, se asumió primero una tendencia observada en las ecuaciones de ajuste presentadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, hasta cierto punto en dónde se seguía la tendencia de otra ciudad, que en este caso es Concepción. Luego se procedió a realizar un procedimiento de filtrado de los datos, con el objeto de remover las incoherencias obtenidas mediante el ajuste entre ciudades. Los resultados se presentan a continuación.

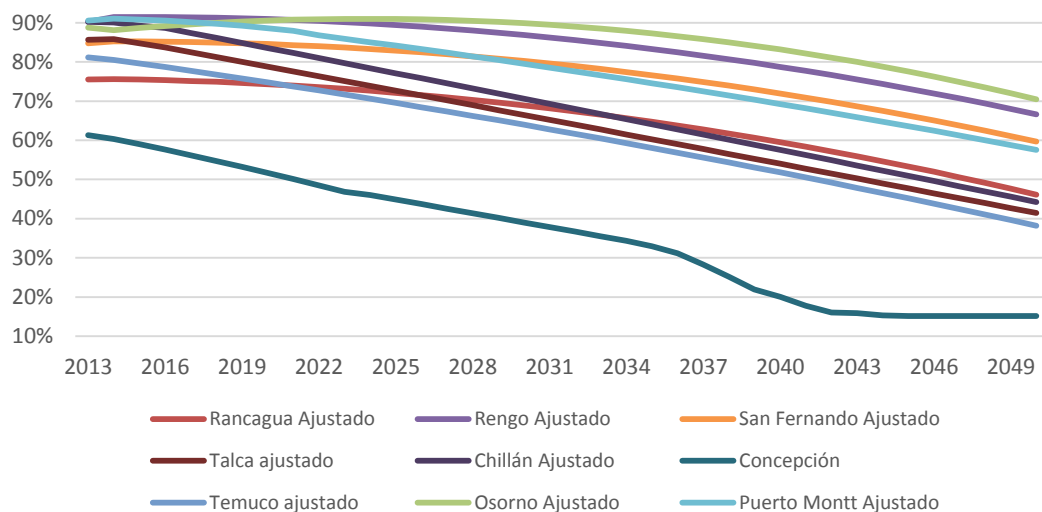


Figura 22: Participación de Casas (%) proyección al año 2050
Fuente: Elaboración Propia

Con la información anterior, es posible proyectar la cantidad de casas urbanas por ciudad, para lo cual se obtiene el siguiente gráfico de total de casas por ciudad.

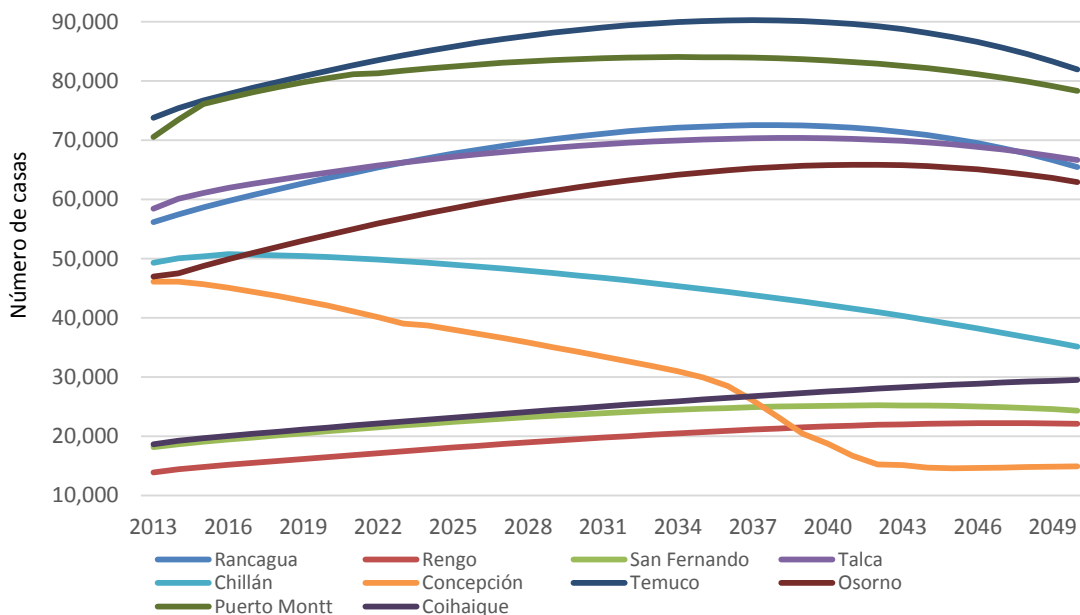


Figura 23: Total de Casas Urbanas proyección al año 2050
Fuente: Elaboración Propia



Como se puede observar en el gráfico, aún cuando la demanda total de viviendas aumenta, el stock de éstas decrece después de ciertos años debido a la mayor importancia de los departamentos en las ciudades. Este supuesto implica que hay un proceso de destrucción de viviendas para dar paso a la construcción de departamentos. Para efectos de la presente proyección, se consideró la destrucción de aquellas viviendas que eran previas al año 1999 (inclusive).

Tabla 20: Proyección de Casas Urbanas por ciudad

	Rancagua	Rengo	San Fernando	Talca	Chillán	Concepción	Temuco	Osorno	Puerto Montt	Coihaique
2013	56.159	13.894	18.162	58.447	49.295	46.122	73.807	46.992	70.546	18.658
2020	63.617	16.499	20.842	64.582	50.263	42.038	81.772	54.016	80.519	21.470
2030	70.665	19.496	23.680	69.026	47.149	34.257	88.628	62.057	83.681	24.718
2040	72.328	21.644	25.148	70.315	42.170	18.767	89.917	65.788	83.471	27.540
2050	65.489	22.113	24.347	66.664	35.119	14.911	81.958	62.949	78.368	29.505

Fuente: Elaboración Propia

6.2. Participación de los distintos energéticos en la demanda de energía

Para estimar las demandas energéticas y los combustibles que participan, se determina la distribución entre las distintas fuentes de energías utilizadas en calefacción residencial y se proyecta esta información acorde a las variaciones esperadas en la participación de cada combustible en el total de la demanda de energéticos para calefacción. Las fuentes de información utilizadas para los supuestos fueron:

- “Estudio de usos finales y curvas de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile”, Programa País de Eficiencia Energética, Corporación de desarrollo tecnológico (CDT), 2010.
- MAPS (2013). “Escenario Línea Base de Emisiones de GEI del Sector Comercial, Público y Residencial”, Fase 1 Proyecto MAPS – Chile, Fundación Chile, junio de 2013.
- “Diagnóstico del mercado de leña” realizado por el Centro de microdatos del Departamento de Economía de la Universidad de Chile para la Comisión Nacional de Energía.
- Estadísticas de ventas de combustibles de la SEC.
- Encuesta CASEN 2006, Ministerio de desarrollo Social, 2006.

Para la estimación de consumos de energía en distintos artefactos en el año inicial del estudio (2013) se parte de la base de la información del proyecto “Estudio de usos finales y curva de conservación de la energía en el sector residencial” desarrollado por la



Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) para el Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) el año 2010. Este estudio se basa en la realización de encuestas a nivel nacional desagregado acorde a las 7 zonas térmicas del país. La información utilizada corresponde al porcentaje de uso de distintos equipos de calefacción y la energía consumida en estos equipos, por cada caso. Estos datos se presentan en la siguiente tabla.



Tabla 21: Porcentaje de presencia en hogares de cada equipo de calefacción y Consumo anual de energía, en cada equipo por vivienda, en kWh

	Gas licuado		Gas Natural		Kerosene		Electricidad		Leña	
	%	kWh anual	%	kWh anual	%	kWh anual	%	kWh anual	%	kWh anual
Zona 1	2%	1	0%	0,0	2%	1,5	6%	20,4	1%	3,4
Zona 2	34%	125	4%	87,7	8%	66,2	12%	26,4	16%	577,8
Zona 3	48%	420	4%	141,1	93%	1260,4	15%	55,4	11%	991,2
Zona 4	31%	299	2%	122,0	24%	1042,4	12%	55,1	60%	8.789,2
Zona 5	20%	144	0%	18,1	10%	49,1	4%	9,7	90%	15.467,9
Zona 6	13%	90	0%	0,0	8%	22,3	3%	12,1	91%	19.535,5
Zona 7	6%	103	43%	14.309,0	2%	102,3	4%	29,9	53%	18.944,9

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el consumo en cada equipo para cada una de las ciudades, en una primera instancia, se multiplican los valores anteriores por la cantidad de viviendas estudiadas de cada ciudad. Estos valores deben ser corregidos en algunos casos en que la participación de un equipo en el conjunto estudiado (casas en zona urbana) difiere de la participación en la zona térmica. Para verificar la necesidad de realizar correcciones se recurrió a diversos estudios específicos realizados durante el último tiempo en el país, así como a algunas estadísticas del sector energético. Las correcciones realizadas, y las fuentes de información utilizadas fueron las siguientes:

- Corrección de los valores de consumo de gas natural. Entre las ciudades estudiadas, el gas natural se encuentra presente para su consumo en el sector residencial únicamente en la ciudad de Concepción. Para conocer el consumo de GN en esta ciudad se utilizan las estadísticas de la SEC y para el resto de las ciudades los valores se reducen a cero.
- Corrección de los valores de consumo de kerosene. Dado que el consumo de este combustible es más intensivo en las zonas urbanas, se asume que este tiene mayor presencia en la zona en estudio que en el total de la zona térmica. Para realizar la corrección se utilizan las estadísticas regionales de venta de Kerosene de la SEC y se pondera por la participación del conjunto en estudio (casas en zona urbana) con respecto a la región.
- En algunas ciudades se corrigen los valores de consumo en leña, acorde a lo señalado en inventarios de emisiones y a la comparación realizada con el estudio “Diagnóstico del mercado de leña” realizado por el Centro de microdatos del Departamento de Economía de la Universidad de Chile para la Comisión Nacional de



Energía. Las ciudades corregidas fueron Temuco, Puerto Montt y Coyhaique, según los siguientes criterios:

- Temuco: Se utiliza la información de consumo de leña dado por el inventario de emisiones, de 8,9 m³ de leña por vivienda, considerando que un 44%²⁵ de estos se utilizan en cocina y el resto en calefacción.
- Puerto Montt y Coyhaique: Se utiliza directamente la información del estudio “Diagnóstico del mercado de leña”.
- Adicionalmente en la zona 3 se corrige la información antes señalada, dado que la zona 3 contiene a ciudades de la VI región y de la Región Metropolitana, cuyos comportamientos difieren de forma considerable. Por lo tanto, para la zona 3 se utiliza la información de participación de equipos a leña en calefacción dada por la información de la encuesta CASEN del año 2006 para la VI región, que considera un 44% de presencia de equipos a leña para la calefacción.

Con la información de base y las correcciones indicadas, los valores finales de participación de cada combustible en el consumo en calefacción residencial, para el año inicial, corresponden a los siguientes.

Tabla 22: Participación de cada combustible en la oferta de energía al año 2013

	Viviendas	Gas Natural	Gas Licuado	Kerosene	Electricidad	Leña	Total
Rancagua	56.158	6%	0,0%	19%	0%	76%	100%
Rengo	13.895	6%	0,0%	19%	0%	76%	100%
San Fernando	18.164	6%	0,0%	19%	0%	76%	100%
Talca	58.448	2%	0,0%	8%	0%	90%	100%
Chillán	49.294	2%	0,0%	7%	0%	91%	100%
Concepción	46.120	1%	10,38%	6%	0%	82%	100%
Temuco	71.356	0%	0,0%	3,0%	0%	96,7%	100%
Osorno	46.992	0%	0,0%	1%	0%	98,4%	100%
Puerto Montt	70.545	0%	0,0%	3%	0%	97,0%	100%
Coyhaique	18.660	0%	0,0%	3%	0%	97,29%	100%

Fuente: Elaboración propia

La leña presenta diversos rendimientos, variables acorde al tipo de tecnología utilizada, por lo cual, para este caso particular, se requiere conocer la distribución entre distintas

²⁵ “Diagnóstico del mercado de leña”. Centro de microdatos del Departamento de Economía de la Universidad de Chile para la Comisión Nacional de Energía.



tecnologías. Para esto se utiliza información de estudio de Centro de Microdatos ya citado, tomando únicamente las tecnologías a leña utilizadas para la calefacción (descartando cocinas a leña, braseros y fogones).

Tabla 23: Participación de cada tipo de calefactor a leña en la oferta de leña al año 2013

Tipo de calefactor	Región					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Salamandra	15%	15%	22%	18%	17%	7%
Estufa Combustión simple	31%	31%	38%	30%	33%	49%
Estufa Combustión doble entrada de aire	41%	41%	35%	52%	44%	40%
Chimenea	13%	13%	5%	0%	6%	3%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia

Sobre la base de los antecedentes presentados, a continuación se estima la proyección de la participación de los distintos energéticos en la línea base de cada una de las ciudades estudiadas.

6.2.1. Proyección de las participaciones de energéticos/tecnologías

La participación de cada tecnología es proyectada considerando variaciones en los valores de energéticos; con excepción de la leña, cuya participación se mantendrá fija de modo de poder establecer claramente el impacto que la introducción de tecnologías ERNC tendrá en el consumo de leña, y por lo tanto en las emisiones de contaminantes.

Para determinar si existen variaciones en las participaciones del resto de los equipos, se establecen algunos criterios de comportamiento en la adquisición de estos. Estos datos se respaldan en los criterios de proyección determinados por el estudio MAPS Chile para el sector residencial, realizado por CDT para PNUD durante el año 2013. Los criterios de variación de la participación de cada equipo fueron los siguientes:

- Reducción en la participación de equipos de calefacción que utilizan gas licuado, debido a un aumento en la oferta de equipos sustitutos tales como equipos a kerosene eficientes y equipos eléctricos.
- Aumento en la participación de equipos de calefacción que utilizan kerosene, entre las ciudades de Rancagua y Concepción debido al aumento, durante los últimos años, en la oferta de estos equipos. En ciudades más al sur, donde la participación de estos equipos es marginal, se estima una reducción



- Aumento en la participación de equipos de calefacción a electricidad, debido al aumento en la oferta de equipos que son flexibles en su uso y con alto potencial de ser utilizados de forma complementaria.

De esta forma, en la siguiente tabla se presenta la variación anual promedio de la participación de cada combustible en cada ciudad.

Tabla 24: Variación anual de la participación de cada combustible en la oferta de energía

Ciudad	Combustible	Variación anual	Ciudad	Combustible	Variación anual
Rancagua	Leña	0%	Concepción	Leña	0%
	GLP	-0,08%		GLP	-0,02%
	GN	0,00%		GN	0,09%
	kerosene	0,04%		kerosene	-0,091%
	Electricidad	0,04%		Electricidad	0,02%
Rengo	Leña	0%	Temuco	Leña	0%
	GLP	-0,08%		GLP	-0,005%
	GN	0,00%		GN	0,000%
	kerosene	0,04%		kerosene	-0,042%
	Electricidad	0,04%		Electricidad	0,047%
San Fernando	Leña	0%	Osorno	Leña	0%
	GLP	-0,08%		GLP	-0,003%
	GN	0,00%		GN	0,000%
	kerosene	0,04%		kerosene	-0,020%
	Electricidad	0,04%		Electricidad	0,023%
Talca	Leña	0%	Puerto Montt	Leña	0%
	GLP	-0,02%		GLP	-0,002%
	GN	0,00%		GN	0,000%
	kerosene	0,002%		kerosene	-0,040%
	Electricidad	0,02%		Electricidad	0,042%
Chillán	Leña	0%	Coyhaique	Leña	0%
	GLP	-0,02%		GLP	-0,001%
	GN	0,00%		GN	0,000%
	kerosene	0,002%		kerosene	0,001%
	Electricidad	0,02%		Electricidad	0,000%

Fuente: Elaboración propia



Como se aprecia en el cuadro, las participaciones de combustibles tienen comportamientos entregados por los supuestos mencionados más arriba, pero responden a la dinámica y la base estructural del consumo de cada una de las ciudades.

En la figura siguiente se observa la comparación de la participación de las tecnologías de la Línea Base entre el año 2013 y 2043, en cada ciudad. Es interesante observar que las salamandras y chimeneas desaparecen al 2043 y que aumentan las estufas de combustión doble, GLP y Kerosene.

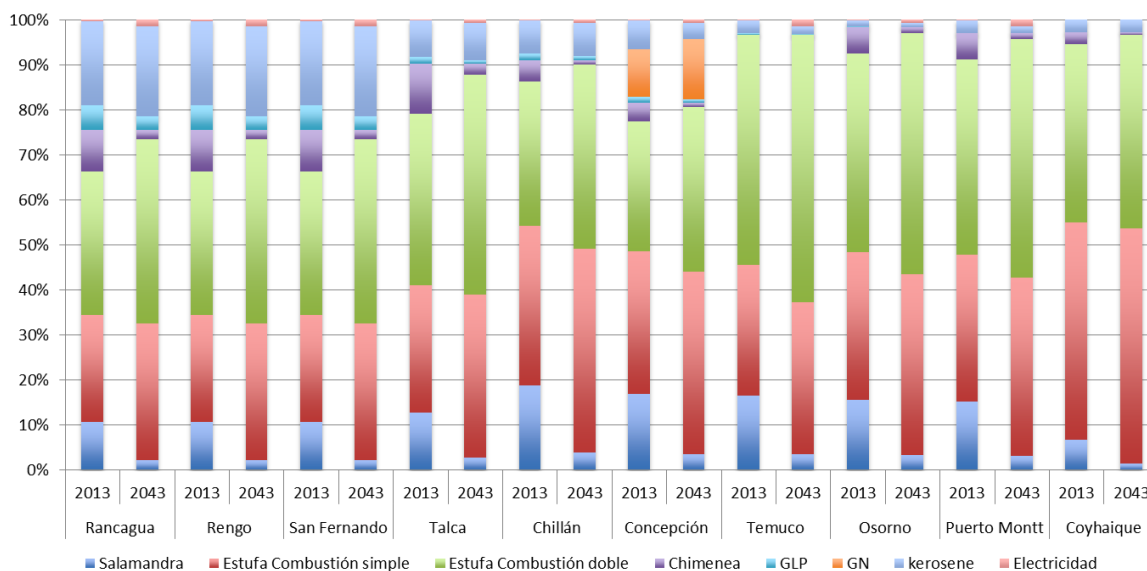


Figura 24: Participación tecnologías en Línea Base, 2013 y 2043

Fuente: Elaboración Propia

Con esta información, a continuación se estiman los consumos proyectados para cada ciudad.

6.2.2. Proyección de Consumos de Energía por ciudad

Con la información anterior, más la proyección de tendencias de tecnologías, se procedió a modelar la demanda de energía para cada una de las ciudades, usando el software LEAP. A continuación se presenta una imagen de la estructura del software para mostrar la organización de árbol que permite desarrollar la modelación.

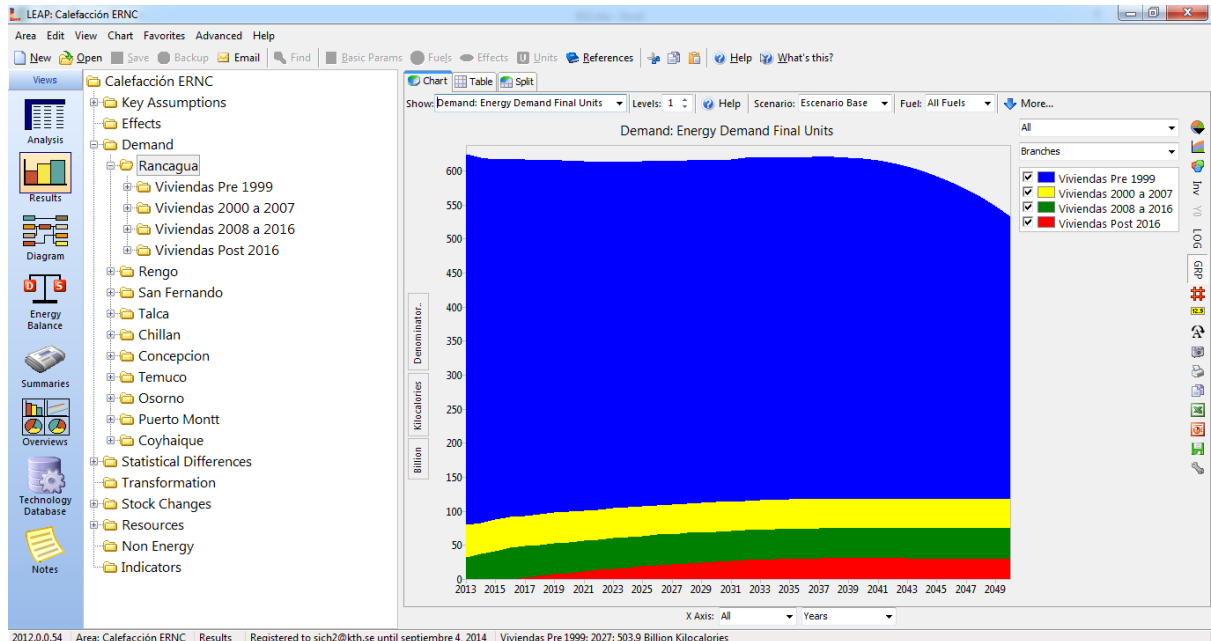


Figura 25: Estructura de Proyección en Software LEAP
Fuente: Elaboración Propia

Se ha definido una división y agrupación de zonas que responde a las similitudes entre las ciudades y sobre las cuales la participación de tecnologías es similar para una evaluación de línea base, sobre la que se presenta el consumo proyectado de energéticos. Esta línea base considera una trayectoria de consumo de energía y de participación de tecnologías, respecto a las preferencias de los habitantes de estas zonas y a una inercia en el uso de estas tecnologías, ya sea por precio o por barreras.

También considera un componente de aumento gradual de confort térmico, lo cual se debe al aumento del poder adquisitivo de las familias.

Cabe destacar que todas las proyecciones presentadas a continuación, corresponden solamente al consumo de energía de casas a nivel urbano en el escenario de línea base, de acuerdo a los objetivos del presente estudio.

6.2.2.1. Línea Base Zona Rancagua-Rengo-San Fernando

Para esta zona se puede apreciar lo indicado anteriormente, en donde los consumos de energía van aumentando a lo largo del tiempo. Esto debido al mayor confort térmico esperado dentro de las casas, gracias al mayor nivel económico de las familias. En términos de participación del combustible, en esta zona la leña posee una importante participación, siendo el kerosene el segundo combustible más importante.

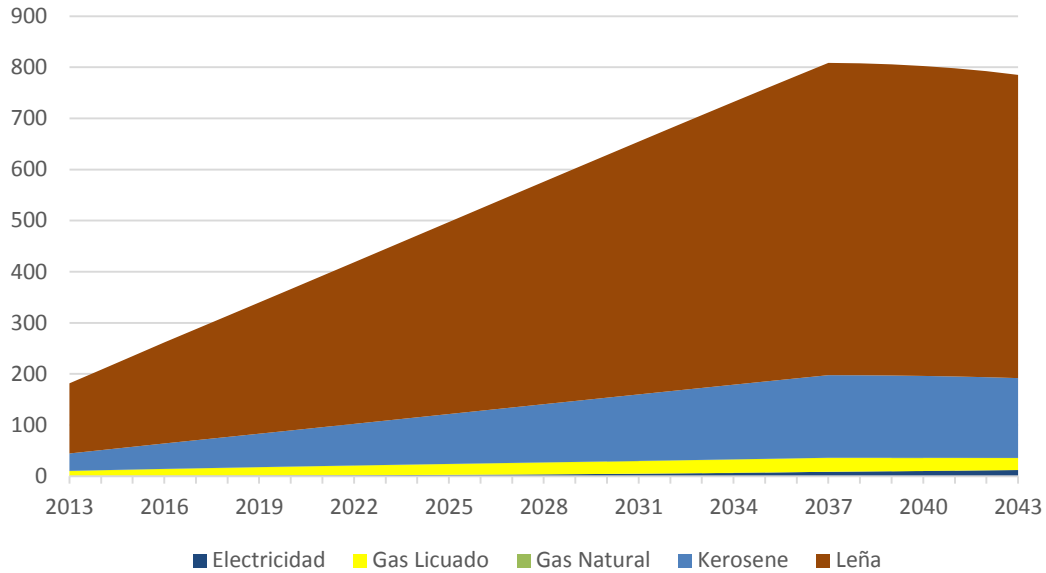


Figura 26: Total Energía (Teracalorías) Rancagua
Fuente: Elaboración Propia

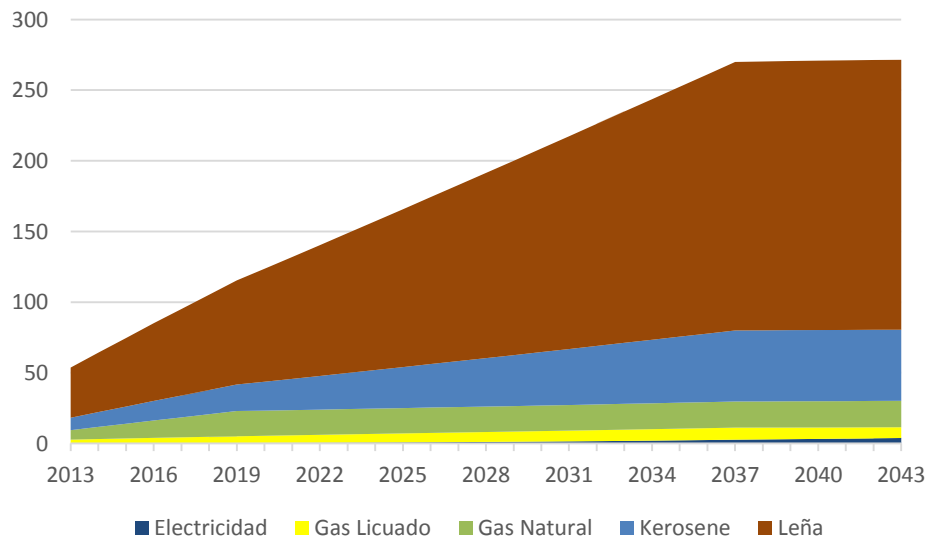


Figura 27: Total Energía (Teracalorías) Rengo
Fuente: Elaboración Propia

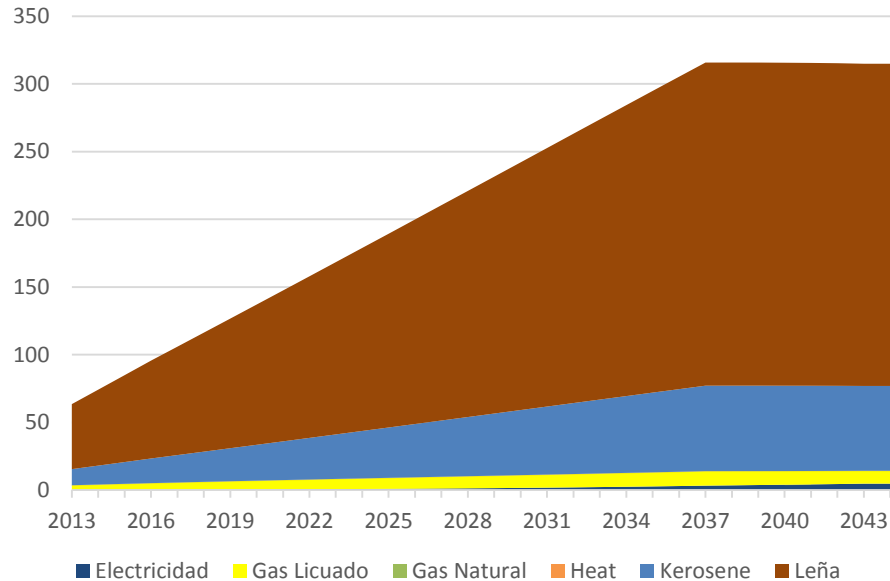


Figura 28: Total Energía (Teracalorías) San Fernando
Fuente: Elaboración Propia

6.2.2.2. Línea Base Zona Talca

Para el caso de Talca, se tiene que el consumo de energía va desde los 300 Teracalorías a las 1.200 Teracalorías el año 2043, siendo la causa más importante el efecto relacionado con el aumento del confort térmico. Desde esta zona al sur comienza a aparecer la leña como el combustible preponderante en el uso para calefacción, con una menor participación de otros combustibles.

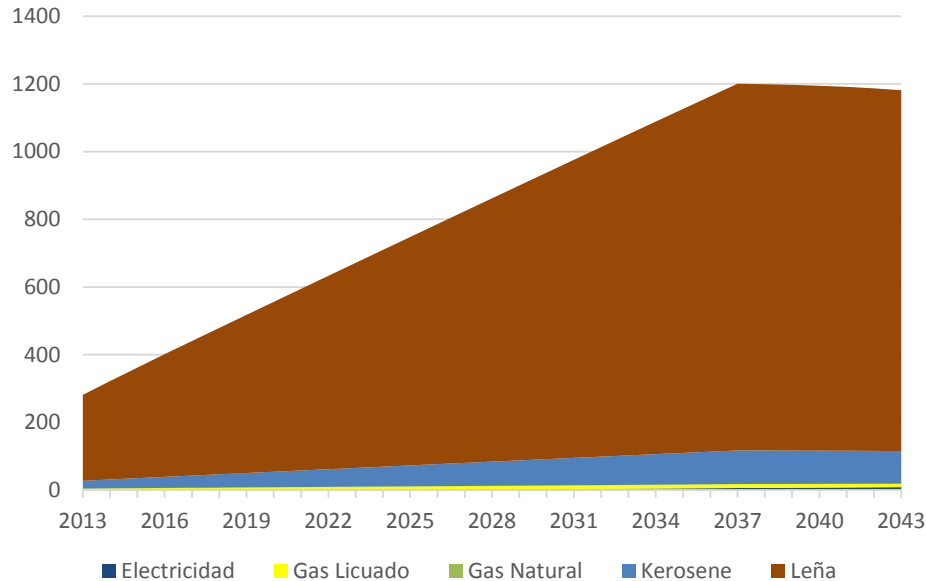


Figura 29: Total Energía (Teracalorías) Talca
Fuente: Elaboración Propia

6.2.2.3. Línea Base Zona Chillán

En el caso de Chillán el aumento de energía es de 300 Teracalorías del año 2013 a 1.100 Teracalorías el año 2037, lo cual se debe principalmente al efecto del aumento del confort térmico. La caída del consumo luego de este año, se debe a que el número de viviendas empieza a declinar debido a una mayor participación de departamentos. En esta ciudad se puede observar que la leña es el principal combustible de la ciudad, con una menor participación de otros combustibles como kerosene o electricidad.

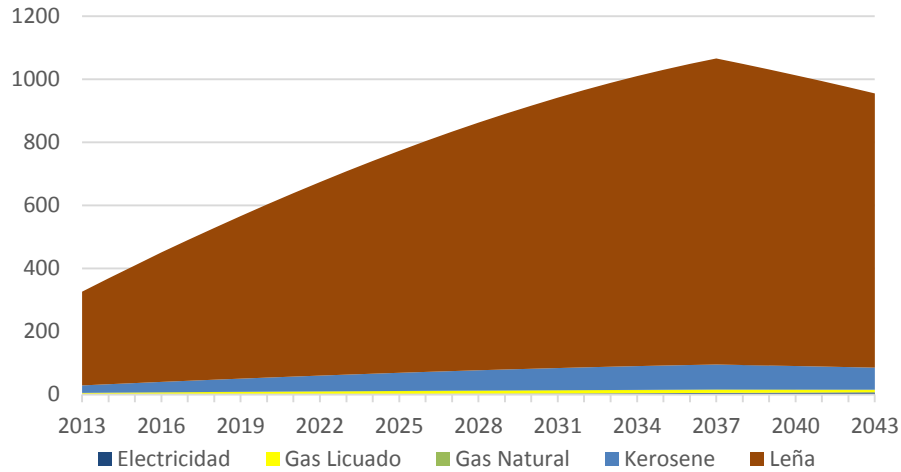


Figura 30: Total Energía (Teracalorías) Chillán
Fuente: Elaboración Propia

6.2.2.1. Línea Base Zona Concepción

Para el caso de Concepción, la caída en el consumo de energía de las viviendas se debe principalmente a una mayor densificación proyectada de la ciudad. En esta ciudad la leña sigue siendo el principal combustible, con una participación mayor del gas natural, el cual se encuentra disponible actualmente en la ciudad.

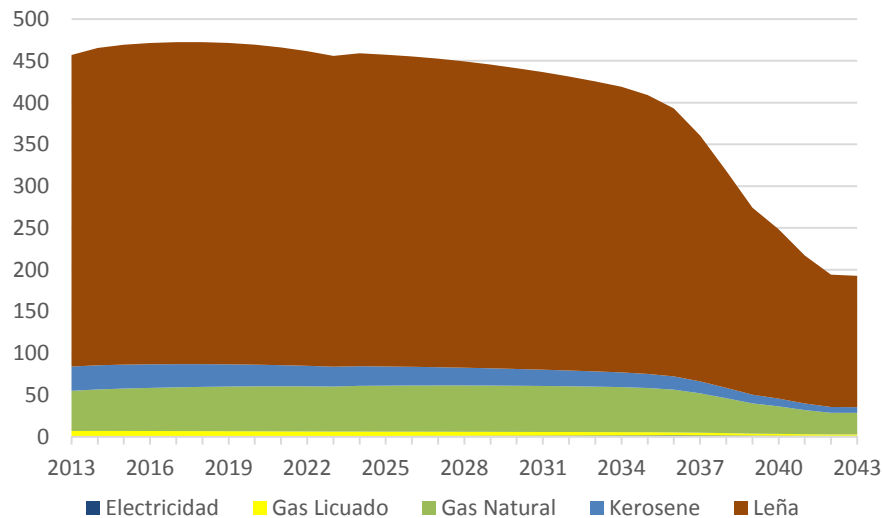


Figura 31: Total Energía (Teracalorías) Concepción
Fuente: Elaboración Propia



6.2.2.2. Línea Base Zona Temuco- Osorno

Para efectos de la penetración de tecnologías en línea base, estas ciudades se agruparon debido a sus similitudes. Para el caso de Temuco, se puede observar que su consumo de energía va aumentando desde 500 Teracalorías hasta 1.400 Teracalorías el año 2037. Esta tendencia también se observa en Osorno, que aumenta desde 600 Teracalorías a alrededor de 1.000 Teracalorías. Este efecto en ambas ciudades es debido al aumento del confort térmico, gracias al mayor poder adquisitivo de las familias.

Con respecto a la participación de combustibles, la leña es el combustible principal usado, con una menor participación de kerosene y electricidad.

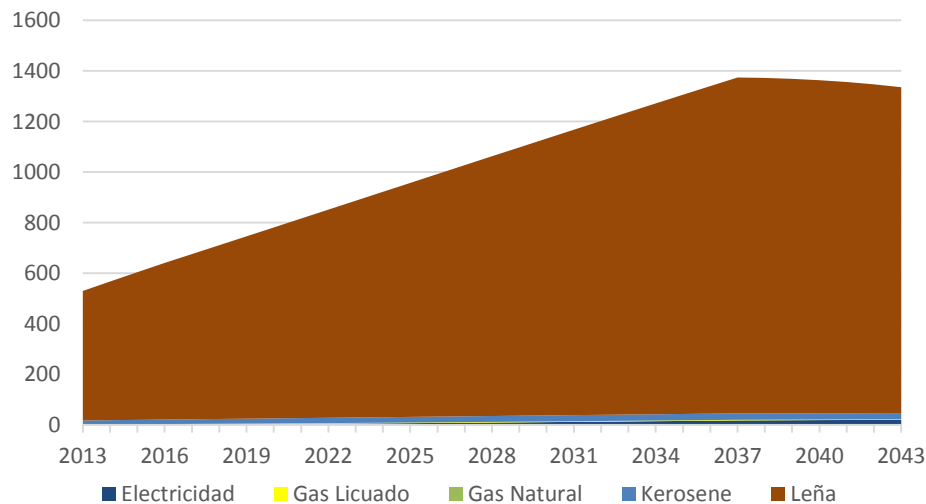


Figura 32: Total Energía (Teracalorías) Temuco
Fuente: Elaboración Propia

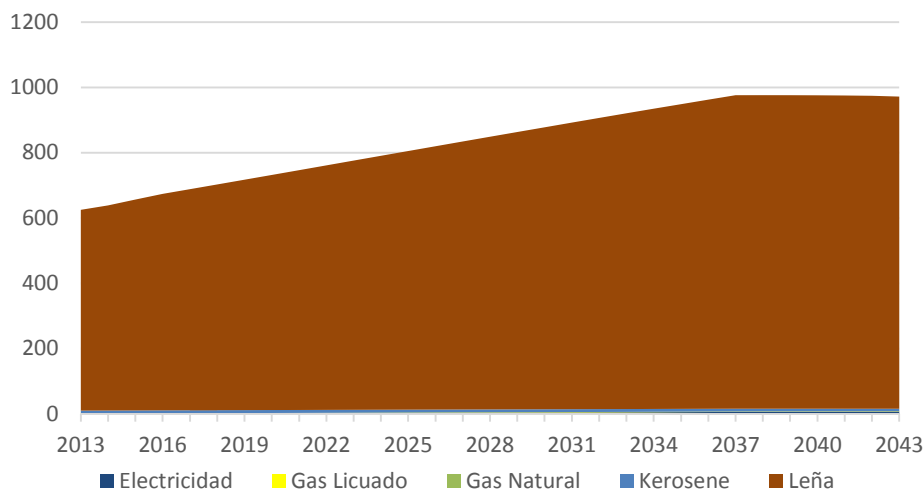


Figura 33: Total Energía (Teracalorías) Osorno
Fuente: Elaboración Propia

6.2.2.3. Línea Base Puerto Montt

En el caso de Puerto Montt, el consumo proyectado para el año 2013 es de alrededor de 500 Teracalorías, cuyo valor llegará a alrededor de 800 Teracalorías el año 2037, debido al efecto del confort térmico. La leña es el combustible que más participación tiene, con una muy menor participación de otros combustibles como kerosene o electricidad.

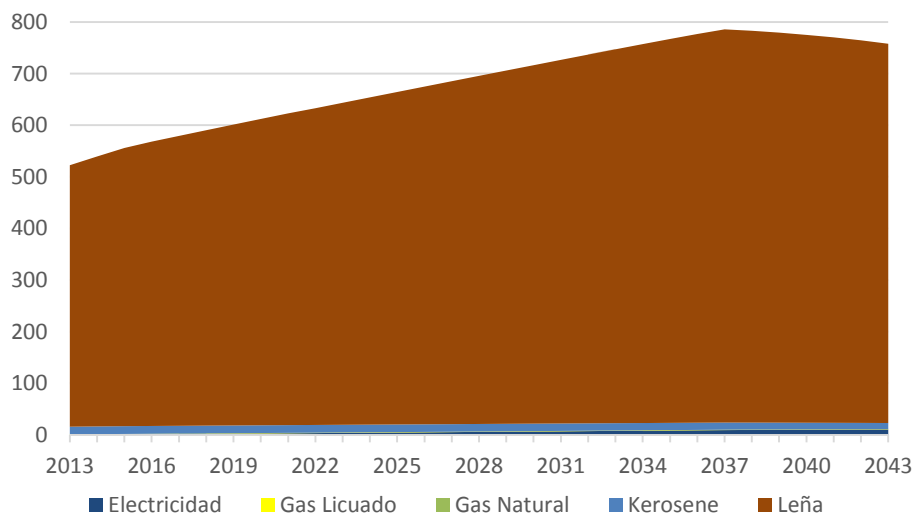


Figura 34: Total Energía (Teracalorías) Puerto Montt
Fuente: Elaboración Propia



6.2.2.4. Línea Base Coyhaique

Para el caso de esta ciudad, se puede observar que el consumo es de alrededor de 250 Teracalorías, el cual va subiendo hasta un valor de 700 Teracalorías el año 2037, debido al efecto del incremento del confort térmico en las viviendas. En esta ciudad se puede observar que el principal combustible es la leña, con una participación muy menor del kerosene, electricidad u otros combustibles.

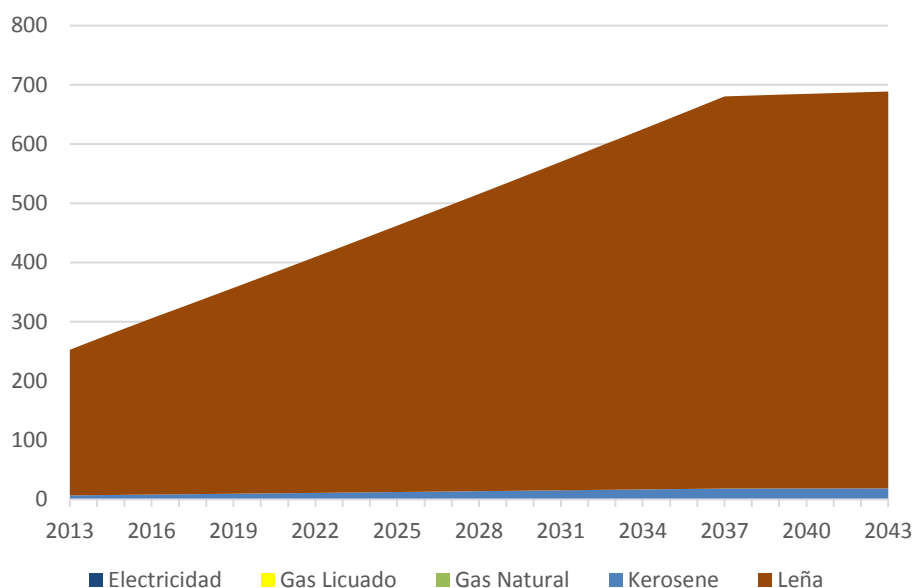


Figura 35: Total Energía (Teracalorías) Coyhaique
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se utilizarán los valores de consumo de combustible, para distintos tipos de artefactos, para estimar las emisiones de MP_{2,5} en el horizonte 2013 – 2043 definido para la proyección.

6.3. Proyección de Emisiones de MP_{2,5}

Luego de determinada la energía consumida en la línea base, se obtuvieron las emisiones de MP_{2,5} para las ciudades del presente estudio. Para ello se establecieron los factores de emisión para cada una de las ciudades y tecnologías asociadas. Ellos se presentan en las siguientes secciones.

Uno de los principales insumos para el cálculo de las emisiones es el inventario de emisiones existente, además de los consumos de energía de cada tecnología presente en los hogares. El inventario de emisiones considera diversos sectores emisores, tanto de



fuentes fijas como móviles, las que se modelan de acuerdo a diversos supuestos y fuentes de información.

Como se explica en la sección 6.2, la energía consumida por las viviendas particulares se estima a partir de los estudios de usos finales disponibles en la actualidad (CDT, 2010 y MAPS, 2013), además de información de la encuesta CASEN, la SEC, Balance de Energía y estudios del mercado de la leña. Esta información entrega la base para estimar las emisiones utilizando factores de emisión para las distintas tecnologías.

En el caso de la energía consumida, existe una importante diferencia en los valores estimados a partir de diversas fuentes oficiales (SEC, Balance de Energía, CASEN) de los valores reportados en los inventarios de emisiones. Incluso, en algunos casos, la energía estimada en los inventarios era superior a los niveles de consumo de la región.

Por el lado de los factores de emisión, a continuación se explica la base utilizada para estimar los valores de las 10 ciudades. En este caso, no existe uniformidad en la metodología dado que los distintos inventarios no coinciden en sus enfoques para la estimación. De esta forma, a continuación se especifica el conjunto de valores que se usó en cada ciudad y el ajuste que se definió para efectos de este estudio.

6.3.1. Factores de emisión

En cada caso se analizan los factores de emisión (FE) por combustible para las distintas ciudades. Esto se lleva a cabo de esta forma, ya que en un primer intento de simulación, utilizando una metodología única de estimación de los FE para todas las ciudades, los resultados diferían de los valores de emisiones de los inventarios, cifra que se solicitó por parte de la contraparte técnica del estudio, se tomara como referencia. Al realizar un análisis más profundo, se encontró que estas diferencias se producían en general por las diferencias de FE entre los estudios mismos.

6.3.1.1. Biomasa forestal (leña)

En este tipo de energético se consideraron cuatro tecnologías: salamandra, chimeneas y estufas de combustión simple y doble. Para cada una de las tecnologías y ciudades se hizo una comparación de los inventarios existentes versus otra información relevante, para obtener un factor de emisión por ciudad.

Rancagua – Rengo – San Fernando – Talca – Temuco

En este caso se utilizaron los factores de emisión asociados al inventario de la sexta región (Dictuc, 2008) y se asumieron estos valores para el caso de Talca, dado que no se poseía información específica de esta ciudad. Básicamente, el ejercicio que se realizó consistió en dividir las emisiones indicadas por cada equipo, por el consumo de leña asociado.



Para el caso de Temuco, se utilizó el inventario correspondiente a la ciudad, debido a las mismas razones indicadas para las ciudades anteriores.

Tabla 25: Factores de emisión de distintas tecnologías basados en inventario de emisiones

Ciudades	Factores de Emisión [gr MP _{2,5} /kg leña]			
	Salamandras	Chimeneas	Estufas simples	Estufas combustión doble
Rancagua - Rengo - Sn. Fdo.- Talca	14,897	15,364	14,518	7,7967
Temuco	25,01	25,01	61,13	39,4

Fuente: Elaboración Propia en base a (Dictuc, 2008) y (CENMA, 2010)

Concepción – Chillán – Osorno – Puerto Montt – Coyhaique

Para el caso de estas ciudades, ya sea porque no se tenía información de inventarios, o dado que el inventario no permite obtener el detalle de la forma en que los factores fueron ponderados, se determinó utilizar el siguiente procedimiento.

Lo primero que se realizó fue obtener una participación del uso de leña húmeda y seca, además de la situación respecto de la operación de los artefactos basado en los siguientes supuestos:

- Las encuestas realizadas en la ciudad de Talca (Ambiosis, 2009) y Temuco (CENMA, 2010) indican que la población que cierra el tiraje de las estufas durante el día es de alrededor de un 30%, valor que aumenta a alrededor del 65% en la noche (Ambiosis, 2009). Dado que no se cuenta con mayor información respecto a los modos de operación en el resto de las ciudades, se asumirá estos valores.
- En el caso de las chimeneas y salamandras no se tienen datos de mala operación, por lo que la mejor información disponible para estos equipos corresponde sólo al tipo de leña²⁶.
- Para estimar la cantidad de leña combustionada durante el día y la noche se consideró que un 90% del consumo de combustible se produce durante el día y el restante 10% corresponde a lo que queda en la estufa el resto de la noche, sin los moradores presentes.

²⁶ En el caso de las chimeneas, por su estructura, es imposible cerrar algún tiraje.



Tabla 26: Porcentajes de Leña Seca, Húmeda y Mala Operación en Chillán y Concepción

Día		Noche	
Buena Operación		Buena Operación	
70%		35%	
Leña Seca	Leña Húmeda	Leña Seca	Leña Húmeda
10%	90% ²⁸	10%	90%
Mala Operación		65%	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27: Porcentajes de Leña Seca, Húmeda y Mala Operación en Osorno y Puerto Montt

Día		Noche	
Buena Operación		Buena Operación	
70%		35%	
Leña Seca	Leña Húmeda	Leña Seca	Leña Húmeda
5%	96% ²⁹	5%	96%
Mala Operación		65%	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28: Porcentajes de Leña Seca, Húmeda y Mala Operación en Coyhaique

Día		Noche	
Buena Operación		Buena Operación	
70%		35%	
Leña Seca	Leña Húmeda	Leña Seca	Leña Húmeda
0%	100% ³⁰	0%	100%
Mala Operación		65%	

Fuente: Elaboración Propia

En conjunto con la información anterior, se utilizaron los siguientes factores de emisión base por cada tipo de artefacto, y además respecto de la situación de consumo (leña seca o húmeda y operación en tiraje cerrado). Estos valores se obtuvieron del inventario de emisiones de Concepción (UCT, 2009).

²⁷Se asume un valor de 30% debido a que las dos únicas fuentes de información disponibles, (Ambiosis, 2009) y (CENMA, 2010), indican valores cercanos al asumido.

²⁸Valor obtenido en base a humedades presentadas para la ciudad de Concepción en (John O'Ryan Surveyors S.A., 2011). Dado que no se cuenta con información para la ciudad de Chillán, se asume el valor de la ciudad de Concepción.

²⁹Obtenido en base a valores de humedades de la ciudad de Valdivia de (John O'Ryan Surveyors S.A., 2011). Dado que no se cuenta con información para las ciudades de Osorno o Puerto Montt, se asume el valor de la ciudad de Valdivia.

³⁰Obtenido en base a valores de humedad de (INFOR, 2004)



Tabla 29: Factores de emisión base para distintos artefactos

Artefactos	Factores de Emisión [gr MP _{2,5} /kg leña]		
	Leña Seca	Leña Húmeda	Mala Operación
Estufa Doble Combustión	8,1	23,5	73,9
Estufa Combustión Simple	14,9	24,7	135,4
Chimenea	16,1	26	-
Salamandras	16,1	26	-

Fuente: Elaboración Propia en base a (UCT, 2009)

Estos valores en conjunto con los porcentajes anteriores, permiten obtener los factores de emisión siguientes, los cuales se utilizaron para las ciudades indicadas.

Tabla 30: Factores de emisión utilizados en simulación

Ciudades	Factores de Emisión [gr MP _{2,5} /kg leña]			
	Salamandras	Chimeneas	Estufas simples	Estufas combustión doble
Concepción - Chillán	25,01	25,01	61,13	39,4
Osorno – Puerto Montt	25,50	25,55	61,49	39,9
Coyhaique	26,0	26,0	61,78	40,4

Fuente: Elaboración Propia

6.3.1.2. Resto de artefactos

Para el resto de las tecnologías y artefactos asociados, se utilizaron los siguientes factores de emisión.

Tabla 31: Factores de emisión resto de tecnologías

Ítem	Valor	Unidad (gr MP _{2,5})	Fuente
Gas Licuado	0,061	gr/Kg	(CENMA, 2010)
Gas Natural	0,00063	gr/Kg	(IIASA, 2014)
Kerosene	97,61	gr/m ³	(CENMA, 2010)
Pellets	1,19	gr/Kg	(OMNI Environmental Services Inc., 2005)
Calefacción distrital con astillas	132,69	gr/GJ	(EPA, 2012)

Fuente: Elaboración Propia en base a varias fuentes

6.3.2. Resultados de proyección de emisiones de MP_{2,5} para línea base

Antes de presentar los resultados para las simulaciones en el horizonte de evaluación, se procedió a comparar las emisiones obtenidas en la simulación para el año base, con los datos disponibles de los inventarios. Ello dada la solicitud de la contraparte técnica, de tomar como referencia dichos estudios.

Es importante indicar que no todos los inventarios poseen información desagregada que permitiera separar el efecto urbano/rural, la separación por comuna o por artefactos emisores. Por lo tanto los valores que se presentan, son una normalización de los valores



de los inventarios, gracias a supuestos como la población urbana/rural o la participación de los artefactos en los consumos de leña, entre otros. La comparación de las emisiones de los inventarios, versus lo obtenido en la simulación se presenta en el siguiente cuadro. En el paréntesis al lado de cada ciudad se indica el año de referencia de las emisiones del inventario.

Tabla 32: Comparación emisiones inventario versus simulación LEAP

Ciudad	Inventario 2006 (toneladas MP2,5)	Simulación 2013 (toneladas MP 2,5)
Rancagua (2006)	511,7	551
Rengo (2006)	93,7	142,6
San Fernando (2006)	125,2	192,8
Talca (2006)	762	1.019,7
Chillán (2005)	3.436	4.451,1
Concepción (2005)	6.272	5.583,1
Temuco (2009)	5.830	5.872,1
Osorno	Sin información	9.069,2
Puerto Montt	Sin información	7.548,4
Coyhaique (2008)	3.480	4.131,7

Fuente: Elaboración Propia

Si bien el año de referencia de los inventarios es distinto al año base de la proyección, los valores son comparables y son una buena medida de partida para las proyecciones. Además, los resultados que son de mayor interés son los diferenciales de emisiones, más que los valores absolutos.

A partir de estos valores base (año 2013) y sobre la base de los supuestos de crecimiento del consumo energético y de los factores de emisión presentados previamente, se proyectan las emisiones al año 2043. Para ello se utiliza el software LEAP que ha sido descrito anteriormente. Esta herramienta permite relacionar los consumos de los distintos energéticos con los factores de emisión y los artefactos utilizados para la calefacción.

En la figura y cuadro siguientes se presentan los resultados de la proyección de emisiones de línea base para cada una de las ciudades analizadas.

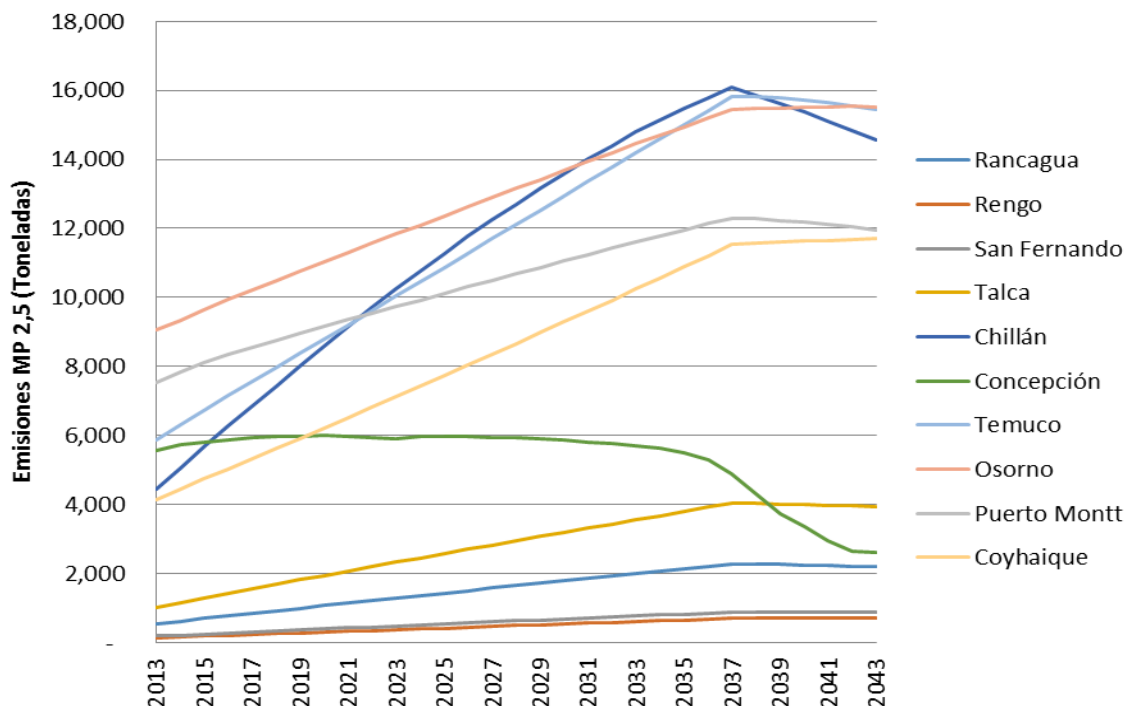


Figura 36: Emisiones MP 2,5 Línea Base por Ciudad (Toneladas)
Fuente Elaboración Propia

Tabla 33: Emisiones MP_{2,5} Línea Base por Ciudad (Toneladas)

Ciudades	2013	2020	2030	2040	2043
Rancagua	551	1.077	1.797	2.254	2.197
Rengo	143	311	545	709	707
San Fernando	193	404	692	887	881
Talca	1.020	1.955	3.201	4.005	3.945
Chillán	4.451	8.597	13.588	15.368	14.563
Concepción	5.583	5.995	5.863	3.378	2.633
Temuco	5.872	8.796	12.946	15.720	15.429
Osorno	9.069	11.024	13.678	15.510	15.513
Puerto Montt	7.548	9.158	11.056	12.183	11.958
Coyhaique	4.132	6.218	9.294	11.628	11.715

Fuente Elaboración Propia

Como se aprecia en la figura y a partir de los datos del cuadro, se observa que en todas las ciudades, excepto en Concepción, las emisiones siguen una tendencia creciente hasta el año 2037, momento en que se estima se logra el confort térmico para las distintas ciudades, por lo que los consumos para calefacción por casa se estancan. En el caso de Concepción, dado que hay una tendencia a la baja a la construcción de casas, en beneficios



de departamentos, se da la tendencia a la baja en las emisiones, situación que ocurre en la mayoría de las ciudades post 2037.

A continuación, en la sección siguiente se describen los escenarios tecnológicos a ser evaluados, tanto en sus valores de emisiones, costos de inversión, operación y combustibles y beneficios obtenidos por las mejoras ambientales que se obtendrán.

6.4. Definición de escenarios

Para modelar el impacto de la aplicación de tecnologías de ERNC para la calefacción residencial se definirán distintos escenarios, en cada uno de los cuales se definirá la participación anual de un mix de tecnologías ERNC que reemplazará a los combustibles convencionales, particularmente a la leña.

La participación anual de cada tecnología ERNC en cada escenario será definida acorde a los siguientes criterios:

- En cada escenario se definirán metas de participación de cada tecnología al año 2043, trazando posteriormente la participación año a año que permite llegar a una meta.
- Cada escenario considera una tecnología prioritaria y una tecnología suplementaria. Así los principales esfuerzos se aplican sobre la tecnología prioritaria, poniendo metas más exigentes en estos casos, sin dejar de lado los esfuerzos que se puedan aplicar sobre otras tecnologías.
- Las metas se han establecido sobre la base de referencias internacionales, particularmente del caso Alemán y Europa, reduciéndolas acorde al contexto socio económico nacional, según el criterio del consultor, validado con la contraparte técnica y grupos especializados en el tema (Unidad de Geotermia del Minenergía). Las metas se aplicarán únicamente sobre la demanda de los tipos de viviendas involucrados. Por ejemplo si se indica una meta de un 20% al año 2040 para una tecnología que se propone aplicar únicamente sobre viviendas nuevas, entonces el 20% se aplicará sobre la demanda asociada a viviendas nuevas.

En cada ciudad, las metas podrán ser reducidas acorde a las siguientes limitaciones:

- (i) Potencial existente. Si el potencial para alguna tecnología es menor a la meta propuesta, la cuota de participación de esa tecnología estará limitada a un 80% de este valor de potencial existente. Por ejemplo, si para una ciudad el recurso



de biomasa permite cubrir un 10% de la demanda, entonces la cuota establecida para la ciudad será de un 8%³¹.

- (ii) Porcentaje de participación de la leña. Dado que el objetivo de la entrada de tecnologías ERNC es reducir la participación de la leña en el mix de tecnologías utilizadas, la suma de las cuotas de participación de las tecnologías ERNC no podrá superar la participación de esta. Por ejemplo, si para una ciudad la participación de la leña en la línea base es de un 10%, entonces las cuotas de ERNC propuestas sumadas no pueden superar el 10%.

6.4.1. Escenarios de penetración de tecnologías ERNC

Dados los criterios antes descritos, los escenarios se han definido como se indica en la siguiente tabla.

³¹Esta limitante no se considera en el caso de aplicar estufas a pellets, pues si bien el mercado actual de venta de pellets es bajo y no permite cubrir una eventual demanda de este combustible, el mercado puede crecer en la medida que la demanda de pellets aumente.



Tabla 34: Características de escenarios de penetración de tecnologías ERNC

Escenario	Tecnologías prioritarias	Tecnología complementaria	Metas al 2040 para la participación en el consumo de energía final por tecnología y tipo de vivienda.
Escenario RT + Priorización biomasa	<ul style="list-style-type: none"> - Estufas Pellets - Calor distrital con biomasa (astillas) 	<ul style="list-style-type: none"> - Paneles solares térmicos - Bomba de calor geotérmica 	<ul style="list-style-type: none"> - En viviendas nuevas en condominio menores a 100 m²: 80% del potencial de biomasa forestal a utilizar como calefacción distrital, 10% de Estufas a Pellets, 5% de tecnologías complementarias. - En resto viviendas: 15% de Estufas a Pellets, 5% de tecnologías complementarias.
Escenario RT + Priorización solar	<ul style="list-style-type: none"> - Paneles solares 	<ul style="list-style-type: none"> - Estufa a Pellets - Bomba de calor geotérmica 	<ul style="list-style-type: none"> - En viviendas nuevas y existentes hasta la VIII región: 15% de Paneles solares, 5% de tecnologías complementarias. - En vivs. nuevas y existentes de la IX y X: 10% paneles solares, 5% tecnologías complementarias.
Escenario RT + Priorización calefacción distrital	<ul style="list-style-type: none"> - Calor distrital con biomasa (astillas) - Calefacción distrital con recuperac. de calor - Calefacción distrital con bombas de calor geotérmicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Paneles solares. - Bomba calor geotérmica - Estufa a Pellets 	<ul style="list-style-type: none"> - En viviendas nuevas en condominio: 80% del potencial de biomasa forestal a utilizar como calefacción distrital, 40% del potencial de recuperación de calor a utilizar como calefacción distrital, 5% de calefacción distrital con bomba de calor geotérmica. - En resto viviendas: 5% de tecnologías complementarias.
Escenario RT + Priorización bombas de calor	<ul style="list-style-type: none"> - Bomba de calor geotérmica individual - Calefacción distrital con bombas de calor geotérmicas. - Aerotermia - Panel solar termodinámico (bombeo de calor). 	<ul style="list-style-type: none"> - Paneles solares - Estufa a Pellets 	<ul style="list-style-type: none"> - En viviendas nuevas mayores a 100 m²: 100% del consumo de biomasa forestal reemplazado por bombas de calor geotérmicas. - En viviendas nuevas en condominio: 30% calefacción distrital con geotermia, 5% otros sistemas de bombeo de calor (aerotermia y solar termodinámico) y 5% de tecnologías complementarias. - En resto viviendas nuevas: 5% otros sistemas de bombeo de calor (aerotermia y solar termodinámico) y 5% de tecnologías complementarias. - En viviendas existentes: 5% tecnologías complementarias.
Escenario RT + Escenario combinado (mayor esfuerzo)	<ul style="list-style-type: none"> - Estufas a pellets - Calor distrital con biomasa (astillas) - Bombas de calor geotérmicas - Paneles solares 	--	<ul style="list-style-type: none"> - A partir del 2017 se dan 5 años para eliminar chimeneas y salamandras, y 10 años para eliminar estufas a combustión simple - En viviendas nuevas en condominio mayores a 100 m²: 80% del potencial de biomasa forestal a utilizar como calefacción distrital, 10% estufa a pellets, 15% bombas de calor geotérmicas, 10% paneles solares (hasta la VII región). - En viviendas nuevas, fuera de condominio, mayores a 100 m²: 15% bombas de calor geotérmicas, 10% paneles solares (hasta la VII región), 10% estufa a pellets. - En viviendas nuevas menores a 100 m²: 80% del potencial de biomasa forestal a utilizar como calefacción distrital, 10% estufa a pellets, 10% paneles solares (hasta la VII región). - Resto viviendas nuevas y existentes se establecen metas que permitan llegar al 50% de participación de ERNC en total (meta Alemania)

Fuente: Elaboración Propia



Es importante hacer notar que el “Escenario RT + Escenario combinado (mayor esfuerzo)” corresponde a un esfuerzo muy importante, que podría ser catalogado como de orden académico o exploratorio, ya que tiene exigencias parecidas o superiores a las que se están proyectando actualmente en Europa y que no se ha contrastado con los recursos energéticos (potenciales) existentes en cada zona. El espíritu tras la evaluación de este escenario es analizar si es factible contrarrestar la tendencia creciente de emisiones que se proyecta en la línea base, avizorar si es posible alcanzar las metas de concentración que exigen las normas de calidad del aire y estimar un costo aproximado para alcanzar estos valores.

Sobre la base de los antecedentes anteriores se estiman las emisiones de los escenarios alternativos en el período 2013–2043. En la tabla siguiente se presenta un resumen de las emisiones de MP 2,5 esperadas al año 2043, que permiten comparar los niveles de mitigación que es posible alcanzar con cada escenario, respecto al año 2013 y respecto al escenario base sin medidas tecnológicas. Adicionalmente, se presenta una tabla comparativa respecto al año 2013 y al escenario base, en cada ciudad, donde se aprecian las variaciones de cada escenario en el año 2043.

Tabla 35: Resumen de emisiones por ciudad (año base 2013 y escenarios proyectados al 2043)

Ciudades	Año Base 2013 (T MP2,5)	Proyección año 2043 (Toneladas de MP2,5)						
		Esc. Base	Esc. R. Térmico	Esc. C. Distrital	Esc. Biomasa	Esc. Geotermia	Esc. Solar	Esc. Combinado
Rancagua	551	2,197	1,598	1,456	1,246	1,450	1,196	376
Rengo	143	707	503	456	392	452	377	126
San Fernando	193	881	640	582	499	578	479	154
Talca	1,020	3,945	2,630	2,425	1,928	2,364	1,878	706
Chillan	4,451	14,563	10,605	9,762	7,530	9,762	7,404	2,932
Concepción	5,583	2,633	1,625	1,487	1,120	1,487	1,101	400
Temuco	5,872	15,429	10,905	9,953	7,851	9,800	8,575	3,588
Osorno	9,170	15,513	11,400	9,373	7,396	9,648	8,704	3,516
Puerto Montt	7,556	11,958	9,083	8,196	6,443	8,261	7,108	2,866
Coyhaique	4,132	11,715	8,275	7,243	6,188	6,848	7,677	2,552

Fuente: Elaboración Propia

Es interesante observar que en todas las ciudades, excepto Concepción, hay una tendencia creciente de emisiones y que el escenario RT permite lograr cerca del 30% de las reducciones proyectadas al año 2043. El resto de los escenarios, excepto el de esfuerzo máximo (Escenario Combinado), no logran llegar a los niveles del año base, por lo que no permitirían reducir los problemas de contaminación atmosférica que se tienen actualmente. Ello se analizará con mayor detalle en las secciones 7 y 8 de este documento.



Tabla 36: Comparación de emisiones por ciudad en escenarios proyectados (%)

Ciudades	2043 vs. 2013	Esc. Base vs.R. Térmico	Esc. Base vs. Solar	Esc. Base vs. Biomasa	Esc. Base vs. Combinado
Rancagua	399%	27%	46%	43%	83%
Rengo	496%	29%	47%	45%	82%
San Fernando	457%	27%	46%	43%	83%
Talca	387%	33%	52%	51%	82%
Chillan	327%	27%	49%	48%	80%
Concepción	47%	38%	58%	57%	85%
Temuco	263%	29%	44%	49%	77%
Osorno	169%	27%	44%	52%	77%
Puerto Montt	158%	24%	41%	46%	76%
Coyhaique	284%	29%	34%	47%	78%

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que en la mayoría de las ciudades, excepto Concepción, las emisiones aumentan entre 1,5 y 5 veces en el escenario base para el periodo 2013 – 2043. El escenario que más reduce respecto a los valores proyectados al año 2043 es el de Biomasa, que logra mitigar del orden del 50% de las emisiones proyectadas a ese año. En general, este escenario no logra volver la tendencia a los niveles del año base (2013). Para bajar esta tendencia aún más allá se ha evaluado el escenario de esfuerzo máximo (combinado) que sí permite revertir esta tendencia, logrando una reducción promedio del orden del 80%, pero considerando esfuerzos casi tan exigentes o más que los que se está proyectando actualmente en Europa.



7. Evaluación Costo-Beneficio Escenarios de Penetración de Tecnologías ERNC

7.1. Metodología de Costo Beneficio Social

La evaluación social, a diferencia de la evaluación privada, contempla la ocurrencia de costos y beneficios (e ingresos) no sólo del agente inversionista o realizador de un proyecto, sino de todos los agentes nacionales participantes del proyecto, esto es; proveedores de materias primas, productores y consumidores. Además, en una evaluación social deberán ser corregidos los precios de mercado que no necesariamente midan en forma adecuada los impactos positivos y negativos que el proyecto genera en los agentes antes descritos. En efecto, la presencia de distorsiones, tales como impuestos, aranceles aduaneros, subsidios, monopolios, precios fijos, además de externalidades; negativas como deterioro ambiental o positivas como impacto en la imagen país, determinan que además de considerar a la diversidad de agentes que se ven afectados por el proyecto se deban corregir adecuadamente los precios de los insumos y/o productos involucrados en el proyecto.

Lo anterior, que forma parte de la teoría de la evaluación social de proyectos, es parte de los lineamientos que el Ministerio de Planificación y Cooperación establece como norma en el Sistema Nacional de Inversiones, que es el marco en el que se deciden las inversiones públicas. El presente estudio se centrará en el análisis **ex-ante** por ser el paso previo y requisito de definición de políticas y medidas adecuadas para cumplir con los objetivos ambientales, sociales y económicos del regulador³². En el caso particular de este estudio interesa evaluar el beneficio neto social asociado a escenarios de penetración de ERNC en calefacción residencial.

En la evaluación de proyectos sociales suelen utilizarse metodologías de Enfoques de Costo Beneficio (CB) y Costo Efectividad (CE). En este estudio se analizarán con detalle enfoques de costo beneficio aplicados a la penetración de tecnologías ERNC para calefacción. Los enfoques de CE y CB proveen de un marco general que permite evaluar los flujos de costos (y beneficios) asociados a algún proyecto, medida o conjunto de medidas. Estos métodos se basan en la construcción de flujos de tipo financiero/económico.

Según el propósito y alcance, la evaluación puede realizarse desde una perspectiva privada, de algún organismo del Estado, de la perspectiva de un sector, de la economía, de la sociedad. Pueden o no considerarse un mayor o menor número de externalidades. En algunos casos (generalmente por problemas de disponibilidad de información y de modelos adecuados) no se

³²Por el contrario, si la evaluación tiene como propósito evaluar la forma en que una determinada política, programa o medida ha funcionado tras ser implementada, entonces se debe considerar una metodología **ex - post**. Existen numerosas metodologías para este tipo de análisis como las técnicas de inferencia causal o incluso metodologías específicas que han sido creadas, por ejemplo, para evaluar el correcto desempeño de los programas de eficiencia energética.



cuenta con información de beneficios. En estos casos se suele optar por un análisis de costo efectividad.

Dado que el análisis de bienestar (o bien de costos) es inherentemente contrafactual para realizar este tipo de análisis se debe contar con dos escenarios. Uno es el escenario base y otro el escenario caso, el cual está asociado a una determinado política, medida o acción. La comparación de ambos escenarios permite inferir respecto de diferencias en variables relevantes, entre los casos sin medidas o acciones y aquellos que sí las presentan. Por otra parte, el análisis de escenarios resulta ser una manera sencilla de abordar la incertidumbre al permitir variaciones de variables o parámetros clave.

Aspectos críticos de una evaluación CB incluyen la definición adecuada de los escenarios base y alternativos, el tratamiento del descuento y de la incertidumbre. La definición de línea base es un tema complejo y la definición de metas y evaluación de resultados la definición de las medidas adicionales suele resultar controversial. En general, se recomienda que la línea base considere todas aquellas política y medidas que la autoridad está llevando a cabo y también haya anunciado oficialmente. Sin embargo, la línea base es la referencia respecto de la cual se miden los costos y beneficios por lo que su definición puede relajar las condiciones anteriores. Por ejemplo, puede no incluirse una política en curso si el propósito es evaluar su implementación.

Otro tema crucial es el tratamiento de la incertidumbre. En general, las incertidumbres que afecten aquellos factores determinantes de los costos de la mitigación y adaptación deben identificarse y presentarse con claridad. En los casos de mitigación las principales variables inciertas se relacionan a precios y tecnología. Para poder acotar la incertidumbre existen distintas alternativas. La más simple consiste en establecer escenarios críticos de comparación. La otra opción es utilizar modelos que den cuenta explícita de la variabilidad de la incertidumbre asociada y propagada por las distintas variables (por ejemplo, métodos de simulación o cotas de probabilidad).

En este estudio interesa realizar una evaluación desde la perspectiva social por lo que La correcta realización de un análisis costo beneficio tiene como premisa definir el propósito de la evaluación y definición del alcance del sistema. El análisis de los costos y beneficios incrementales de un determinado proyecto o medida suele conocerse como *análisis costo beneficio financiero* cuando el análisis considera precios de mercado y esperados (precios financieros). Los precios financieros incorporan todos los impuestos y subsidios que resultan relevantes de considerar desde la perspectiva de un desarrollador de proyectos o inversionista. De este tipo de análisis el retorno del capital mínimo asociado a la inversión requerido para tomar la decisión de inversión se utiliza típicamente para determinar la tasa de descuento financiera. Esta tasa luego se utiliza para llevar a valor presente los beneficios y costos incrementales de un proyecto.

El método será referido a análisis *costo beneficio social* cuando los costos y beneficios incrementales se asocian a impactos considerados a nivel nacional o regional. Para este tipo de



análisis los precios deben corregirse adecuadamente considerando impuestos y subsidios para establecer los precios económicos (o precios de eficiencia). Estos precios representan el costo en términos de recursos que a la economía le significa el uso de los bienes en cuestión. En la práctica, un análisis costo beneficio económico debiera corregir de los impactos *externos* que afectan también a otros actores (no sólo aquellos relacionados directamente con el proyecto). En un análisis costo beneficio económico la tasa de descuento considerada suele ser la tasa libre de riesgo (bonos de gobierno de largo plazo) más un premio por el riesgo del crecimiento macroeconómico de un país.

Según Jansen y Bakker (2006) lo más distintivo del análisis costo beneficio social es la tasa de descuento. Esto por considerar que tasas consideradas en el análisis económico suelen dar un rol menor al tema de la equidad intergeneracional. De esta manera, el *análisis costo beneficio social* requiere los siguientes ajustes de un análisis costo beneficio financiero:

- Los precios financieros (de mercado) deben corregirse de intervención estatal. Los subsidios indirectos deben sumarse y los impuestos indirectos deben restarse. Esto incluye la consideración de un tipo de cambio social.
- Los efectos externos deben identificarse y establecerse su valor social en la medida de lo posible.
- Debe utilizarse una *tasa social de descuento* adecuada.

Cabe destacar que tanto el análisis financiero como el económico aportan información muy relevante al proceso de toma de decisiones de política pública. Si bien el análisis social permite priorizar distintas medidas de un conjunto de opciones desde la perspectiva social, el análisis financiero puede dar luces respecto de los apoyos que potencialmente podrían requerir inversionistas privados para llevar a cabo tales acciones.

7.2. Precios Sociales definidos por Ministerio de Desarrollo Social

El Ministerio de Planificación Social define periódicamente valores de precios sociales para ser utilizados en la evaluación social de proyectos. En particular, en esta evaluación se consideran los valores según se definen en la actualización de precios sociales del Ministerio de marzo de 2014³³. A continuación se presentan las variables y sus precios sociales asociados.

- El Factor de Corrección de la Divisa

El precio social de la divisa discrepa de su precio privado por la existencia de distorsiones en la economía, especialmente en los sectores de bienes y servicios transables internacionalmente

³³ “Minutas metodológicas actualización precios sociales”. Ministerio de Desarrollo Social. Subsecretaría de Evaluación Social. Marzo 2014.



(aranceles y/o subsidios). Para corregir esta diferencia se aplica un factor de corrección al tipo de cambio observado o precio privado de la divisa según la fórmula siguiente:

$$TC_s = FCSD \cdot TC_{obs}$$

Donde TC_s el tipo de cambio social (precio social de la divisa), $FCSD$ el factor de corrección social de la divisa y TC_{obs} el tipo de cambio observado (privado). Para el cálculo del $FCSD$ se utiliza la metodología propuesta por García (1988).

El $FCSD$ resultante y recomendado es 1,01.

- **La Tasa Social de Descuento.**

El modelo vigente del cálculo de la tasa social de descuento (TSD) se basa en el enfoque de eficiencia de Harberger. Este enfoque estima la TSD como el promedio ponderado de tres costos alternativos: tasa de ahorro interno (como proxy del costo por postergación del consumo); tasa de rendimiento de la inversión (como proxy del costo de la inversión desplazada); y el costo marginal del endeudamiento externo.

El Ministerio de Desarrollo Social recomienda usar una tasa del 7% anual como Tasa Social de Descuento para los proyectos que ingresan al Sistema Nacional de Inversiones.

- **Costo Social por Fallecimiento Prematuro**

La idea central es valorizar la pérdida de bienestar asociada a una muerte prematura por medio de una estimación conservadora del beneficio derivado del consumo de ocio a lo largo de la vida de las personas (se valora el ocio que el individuo dejará de percibir en el futuro). Para obtener el costo por muerte prematura para propósitos nacionales (por ejemplo, evaluación social de proyectos de inversión), se promediaron los valores individuales sobre toda la población del país.

El valor final obtenido, luego de ponderar el valor presente del ocio para los diferentes niveles educativos por la proporción de la población que logra dichos niveles, fue de 13.042,29 UF/fallecido.

7.3. Costos y Beneficios asociados a las Tecnologías de Calefacción

En esta sección se presenta el enfoque metodológico utilizado para estimar los costos/beneficios asociados a las tecnologías ERNC de calefacción y los resultados de este análisis.

En los escenarios de ERNC se asume que la calefacción convencional con biomasa forestal (leña) se reemplaza con distintas tecnologías ERNC. Los costos (beneficios) se estiman comparando cada escenario de ERNC con el escenario de eficiencia energética (EE) que servirá como referencia para la estimación. La evaluación considera las distintas componentes de costos (en métrica anualizada):



- Costos de inversión (ΔC_k) que deben representar el costo incremental de inversión en el escenario ERNC relativo al de EE. Esta componente de costos se estima como sigue:

$$\Delta C_k = C_k^{ERNC} - C_k^{EE}$$

Donde C_k^{ERNC} corresponden a los costos de capital que se incurren en el escenario ERNC y C_k^{EE} a aquellos del escenario EE.

Dado que no se cuenta con información detallada de todo el stock de inversiones en equipos en los dos escenarios se asume que la única diferencia entre ambos escenarios es la inversión adicional en ERNC y que el escenario fuerza el reemplazo adelantado de equipos por lo que la inversión en el EE en artefactos de leña es despreciable. De esta manera se asume que C_k^{ERNC} es sólo el capital en nuevos equipos de ERNC según cada escenario y $C_k^{EE} = 0$.

- Costos de operación y mantenimiento (ΔC_o)
Esta categoría de costos se define como una fracción fija del costo de inversión por tecnología según se describe en la literatura.
- Costos de Combustible (ΔC_f) que representan el cambio de gasto en combustible entre el escenario ERNC y de EE. En este caso se cuenta con los consumos totales por cada escenario.

$$\Delta C_f = C_f^{ERNC} - C_f^{EE}$$

Nótese que si $\Delta C_f < 0 \Leftrightarrow C_f^{ERNC} < C_f^{EE}$ se genera un ahorro (beneficio) en esta componente y un aumento de costos en caso contrario. Un ahorro se produce, por ejemplo, si se reemplaza leña (con costo de combustible positivo) con energía solar (donde esta componente tiene costo nulo).

Por ello, en esta componente podemos estar ante un costo o beneficio.

- Evaluación de costos agregados.
El proyecto se asociará a un beneficio social (sin considerar los beneficios ambientales) si:

$$\Delta C = \Delta C_k + \Delta C_o + \Delta C_f < 0 \Leftrightarrow \Delta C_k + \Delta C_o < -\Delta C_f$$

Por lo tanto, esto ocurre cuando se produce ahorro de costos de combustible y este es mayor que los costos de inversión y O&M.

A continuación se presentan los resultados de valor presente de cada escenario, según la siguiente expresión:



$$VPN = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta C^t}{(1+r)^t}$$

Donde r es la tasa de descuento y se agrega un superíndice al beneficio social para denotar el periodo. Se aprecia que la mayoría de los escenarios presentan costos negativos (beneficios).

En la tabla siguiente se presenta un resumen de la evaluación de Costos de las Tecnologías a través del Valor Presente. Los detalles de estos valores se presentan en el anexo 5.

Tabla 37: Valor Presente de Costos de las Tecnologías (MM\$)

Ciudad/Escenario	RT	Geotermia	Solar	C. Distrital	Biomasa	Combinado
Rancagua	-46.499,6	-1.215,3	-5.505,3	-730,7	1.061,1	-10.517,4
Rengo	-15.296,3	-534,0	-2.046,5	-327,4	225,9	-3.851,1
San Fernando	-18.486,7	-957,4	-4.039,0	-796,2	-200,3	-7.908,5
Talca	-57.326,6	-4.568,1	-15.212,1	-3.031,0	-6.759,8	-35.348,5
Chillán	-37.918,1	-3.681,7	-19.113,1	-3.681,7	-9.209,9	-43.484,1
Concepción	-15.992,3	949,8	-5.049,4	969,3	-841,2	-12.937,0
Temuco	-42.747,2	-6.762,9	-15.569,6	-4.830,5	-10.114,9	-37.649,9
Osorno	-31.084,8	-8.390,7	-9.524,9	-8.120,1	-9.901,1	-35.132,1
Puerto Montt	-19.554,2	-4.230,2	-11.407,6	-3.938,4	-7.442,9	-26.876,5
Coyhaique	-23.382,4	-4.961,9	-960,0	-2.213,8	-2.523,2	-18.488,3

Fuente: Elaboración propia.

Es interesante apreciar que la mayoría de los escenarios por ciudad posee una evaluación de costos negativa, es decir, poseen beneficios al ser implementados, lo que se debe a la reducción de costos de combustibles (leña y combustibles tradicionales) al incorporar tecnologías que en su mayoría (salvo pellets) no poseen este ítem. Las reducciones de costos por este concepto, más que compensan las mayores inversiones que se requieren para incorporar las tecnologías ERNC.

7.4. Beneficios Ambientales

En esta sección se presentan la metodología y resultados para valorar externalidades ambientales.

7.4.1. Metodología de la Función de Daño

La metodología a utilizar en el proyecto para valorar los impactos en salud derivados de cambios en los niveles de concentración de particular corresponde al método de la función de daño (o "impact pathway approach"). Este enfoque es utilizado comúnmente tanto a nivel nacional como internacional para estimar los impactos físicos y económicos generados por la contaminación.

La metodología considera la relación entre una cierta "carga" (emisiones) con un "impacto" y su posterior valoración. Típicamente utilizando este enfoque se han evaluado impactos asociados a



salud y mortalidad humana, materiales y agricultura. Este enfoque resulta especialmente útil para orientar diversas decisiones de política.

La figura siguiente ilustra los pasos principales de esta metodología aplicada a las consecuencias de emisiones contaminantes. Cada etapa incluye modelos detallados de diversos procesos.

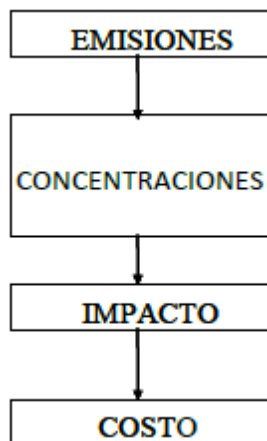


Figura 37: Esquema de metodología “Impact Pathway”
Fuente Elaboración Propia

El uso de la metodología “impact pathway” requiere de una definición detallada del escenario bajo estudio con respecto al tiempo y al espacio. Esto incluye:

- Condiciones meteorológicas que afecten la dispersión y química de los contaminantes atmosféricos
- Ubicación, edad y salud de las poblaciones expuestas a las emisiones
- El estado de los recursos ecológicos
- Los sistemas de valoración de los individuos

La estimación de los impactos se utiliza utilizando funciones de concentración respuesta. Estas funciones son relaciones empíricas que relacionan cambios en la calidad del aire (de un contaminante en particular) con cambios en una variable de impacto de interés (salud: número de casos de muerte prematura o casos de enfermedades, agricultura: cambios en producción, etc). Estas relaciones pueden ser lineales y no lineales, como también pueden poseer o no un valor umbral.

Una vez que los impactos han sido cuantificados en términos físicos se procede a su posterior valoración. Para impactos en salud no se cuenta con valores de mercado. En estos casos los



beneficios se estiman a través de algún método de costo beneficio, prefiriéndose en lo posible una buena medida de demanda (disposición a pagar).

En la notación de costos anterior, existiría un beneficio social (W) en la presencia de beneficios ambientales (B_a)

$$W = B_a - \Delta C_k - \Delta C_o - \Delta C_f > 0 \Leftrightarrow B_a > \Delta C_k + \Delta C_o + \Delta C_f$$

Nuevamente los costos de combustible pueden representar beneficios ($\Delta C_f < 0$) ó costos.

7.4.2. Resumen de emisiones, concentraciones y muertes estadísticas evitadas

A continuación se presenta una ficha resumen para cada una de las ciudades, en las que se presentan las emisiones y muertes estadísticas evitadas para cada ciudad. Esto último se deriva del efecto en las concentraciones ambientales de $MP_{2,5}$ en que se traducen los esfuerzos de mitigación propuestos en cada escenario. Si bien el análisis de este estudio sólo se enfoca en el sector calefacción domiciliar del área urbana, se ha hecho un esfuerzo por proyectar las concentraciones de $MP_{2,5}$ esperadas al año 2043, de acuerdo a las proyecciones de emisiones de este estudio y algunos supuestos acerca de la evolución de las restantes fuentes contaminantes que existen en la ciudad y que se identifican en los inventarios de emisiones respectivos. Los supuestos que se han tomado para llevar a cabo este análisis son los siguientes:

- Rancagua: Se asume constante hasta el año 2043 una emisión de 248 [ton $MP_{2,5}$] proveniente de fuentes estacionarias puntuales, combustión rural de leña, emisiones de quemas, incendios forestales, cigarrillos, fuentes móviles en ruta, polvo fugitivo por actividades de construcción, pavimentación de caminos y polvo resuspendido de calles sin pavimentar. Además, se considera una emisión de 1.565,2 [ton $MP_{2,5}$] provenientes de la mina El Teniente. Ambos valores fueron extraídos del inventario de emisiones de la VI Región.
- Talca: Se asume constante hasta el año 2043 una emisión de 128,3 [ton $MP_{2,5}$] proveniente de fuentes fijas, GLP, GN y kerosene, disposición de residuos, quemas (quemas agrícolas e incendios forestales), preparación de terrenos agrícolas, fuentes móviles en ruta y fuera de ruta y polvo resuspendido en calles pavimentadas y no pavimentadas.
- Chillán: Dado que el inventario de emisiones de la ciudad de Coyhaique presenta los datos en forma agregada con la comuna de Chillán Viejo, la información se debió desglosar. En el caso de las fuentes puntuales (fuentes de combustión externa puntual, de combustión interna puntual, industria metalúrgica secundaria, industria de productos minerales, industria de la madera y el papel, industria alimentaria y agropecuaria y las fuentes evaporativas puntuales) y en el caso de las fuentes areales (quemas agrícolas, incendios forestales, GLP y otros), las emisiones presentadas en el inventario fueron asignadas en su



totalidad a la comuna de Chillán. En el caso de las fuentes puntuales las emisiones se estiman en 2.274,2 [ton MP_{2,5}], mientras que en el caso de las emisiones areales el valor se estima en 37,5 [ton MP_{2,5}]. Las emisiones provenientes de cocinas, las cuales también se presentan en forma agregada para Chillán y Chillán Viejo, se desglosaron en forma proporcional a la cantidad de viviendas en ambas comunas según indican los valores del CENSO 2002.

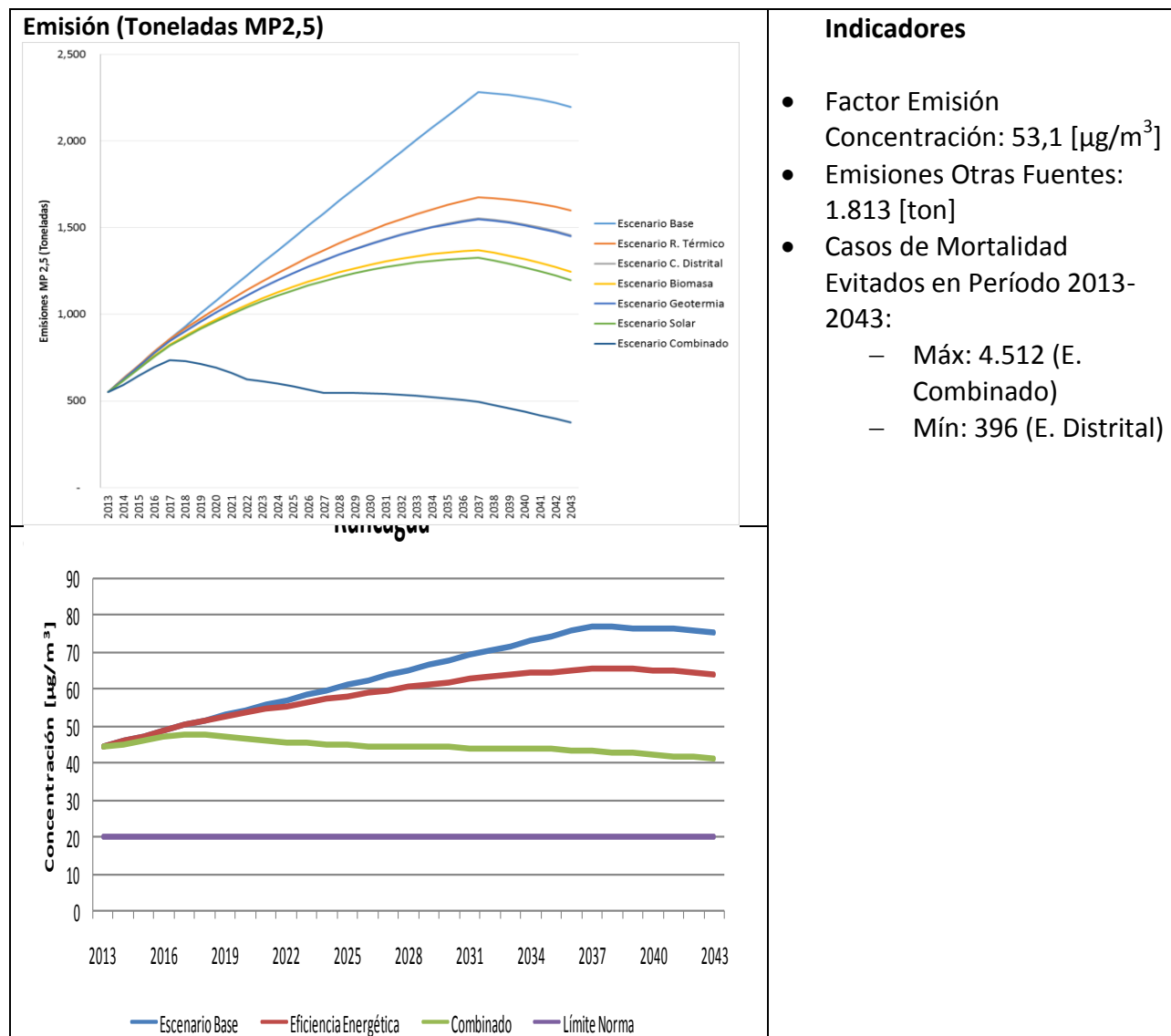
- Concepción: Al igual que en el caso de Chillán, los datos para la comuna de Concepción se presentan en forma agregada para el Gran Concepción. Si bien, en algunos casos la información aparece desglosada por comuna, esto no ocurre siempre. Se asume constante hasta el año 2043 una emisión de 507,2 [ton MP_{2,5}] provenientes de fuentes fijas, fuentes estacionarias (quemadas agrícolas e incendios forestales), fuentes móviles en ruta (se asume, en forma arbitraria, que el 50% de las emisiones presentadas para el Gran Concepción provienen de la comuna de Concepción debido a que no hay un detalle por comunas) y fuentes fugitivas (construcción de edificios y construcción de caminos). Se asume además una emisión de 1.727 [ton MP_{2,5}] provenientes de cocinas. Este valor fue calculado considerando la distribución de las emisiones de los distintos artefactos en el Gran Concepción y un total de 7.681 [ton MP_{2,5}] proveniente de la combustión residencial de leña en la comuna de Concepción.
- Temuco: Al igual que en el caso de Chillán y Concepción, el inventario de Temuco se encuentra agregado con la comuna de Padre Las Casas. Si bien en algunos casos es posible desglosar las emisiones, esto no ocurre en todos ellos. Se considera una emisión de 527 [ton MP_{2,5}] proveniente de fuentes fijas (sin incluir la combustión de leña), estacionarias, móviles y fugitivas. En el caso de las fuentes estacionarias (quemadas agrícolas e incendios forestales) se considera que la totalidad de los valores corresponden a la comuna de Temuco. En el caso de las fuentes móviles se considera que el 80% del MP_{2,5} proveniente de móviles en ruta corresponde a la comuna de Temuco, mientras que se asigna la totalidad de las emisiones de maquinarias y aeronaves en aeropuertos a la comuna de Temuco. Por último, se asume que el 80% de las emisiones de polvo resuspendido proviene de la comuna de Temuco. Por otra parte, con respecto a las emisiones provenientes de cocina, de acuerdo a los valores del inventario se tiene que estas están estimadas en 3.398 [ton MP_{2,5}]. Por último, considerando que el 94% de la población es urbana, se tiene que las emisiones provenientes de la combustión residencial de leña (excluyendo las cocinas) es de 402 [ton MP_{2,5}].
- Coyhaique: Se asume una emisión de 389 [ton MP_{2,5}] y de 35,9 [ton MP_{2,5}] proveniente de grandes consumidores y de quemadas agrícolas forestales respectivamente. En el caso de las cocinas se asume el valor de 2.702 [ton MP_{2,5}] presentado en el inventario.

En las fichas siguientes se puede apreciar la evolución de las concentraciones para 6 ciudades del total del 10, en que se contaba con información para este ejercicio (Rancagua, Talca, Chillán,



Concepción, Temuco y Coihaique). El ejercicio considera el análisis de tres escenarios (base, reacondicionamiento térmico y combinado/esfuerzo máximo), además de la comparación con la meta de 20 [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$].

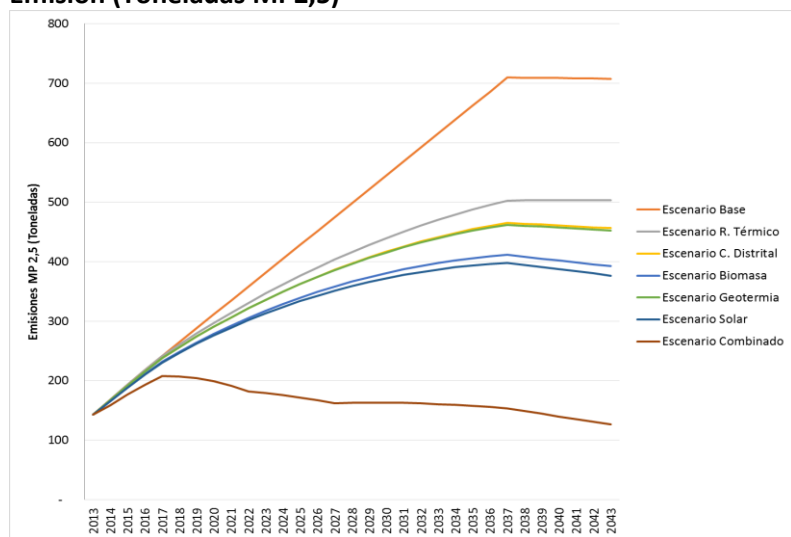
Rancagua





Rengo

Emisión (Toneladas MP_{2,5})

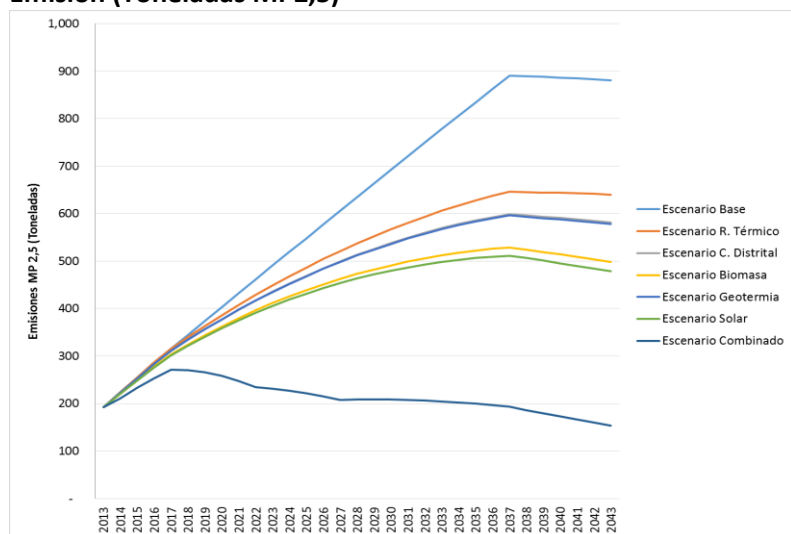


Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 53,1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: S/I
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 262 (E. Combinado)
 - Mín: 25 (E. Distrital)

San Fernando

Emisión (Toneladas MP_{2,5})



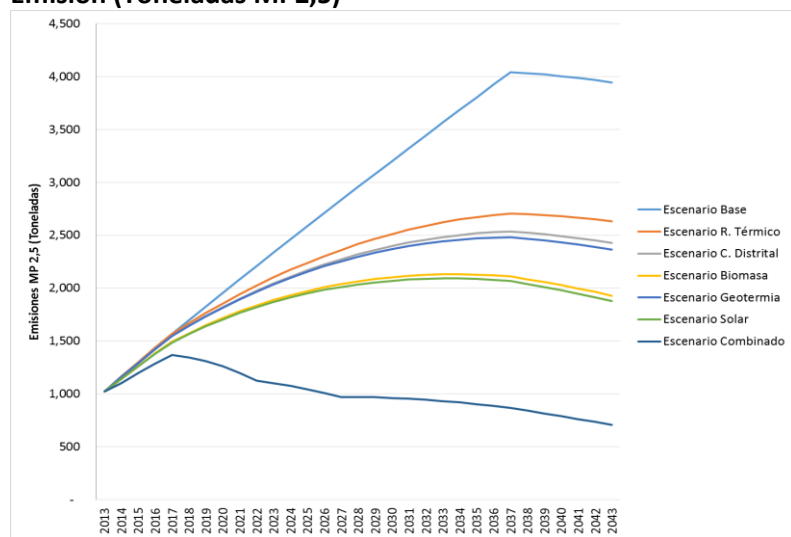
Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 53,1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: S/I
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 453 (E. Combinado)
 - Mín: 42 (E. Distrital)



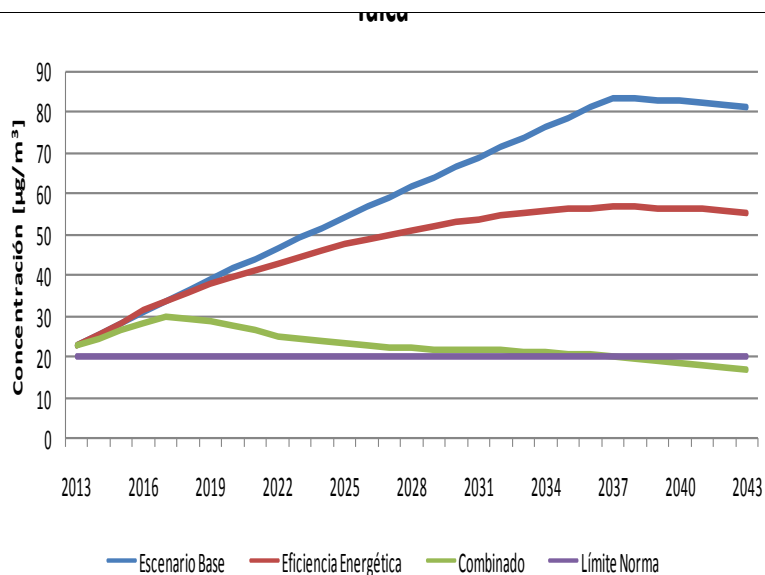
Talca

Emisión (Toneladas MP2,5)



Indicadores

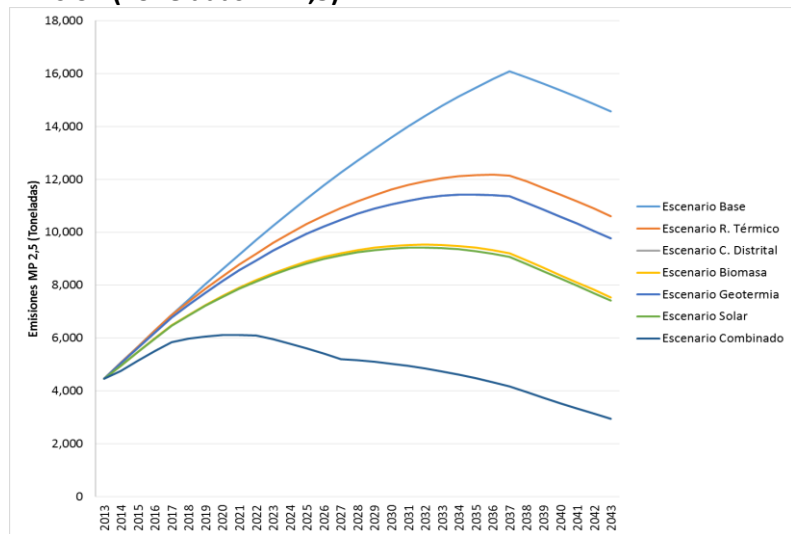
- Factor Emisión Concentración: 49,8 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: 128 [ton]
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 8.275 (E. Combinado)
 - Mín: 636 (E. Distrital)





Chillán

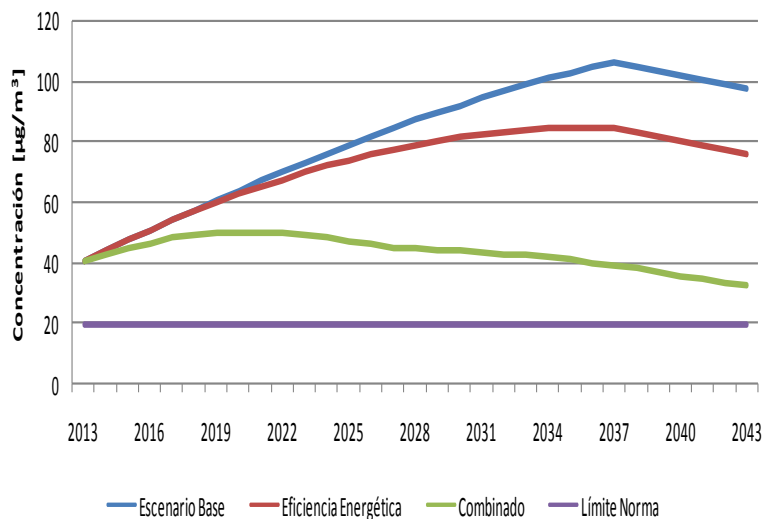
Emisión (Toneladas MP2,5)



Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 178,2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: 2.312 [ton]
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 6.739 (E. Combinado)
 - Mín: 568 (E. Geotermia)

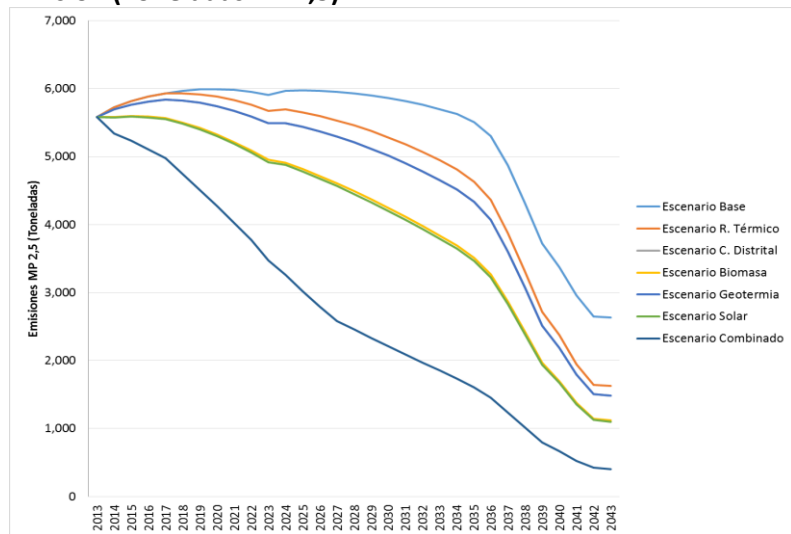
Chillán





Concepción

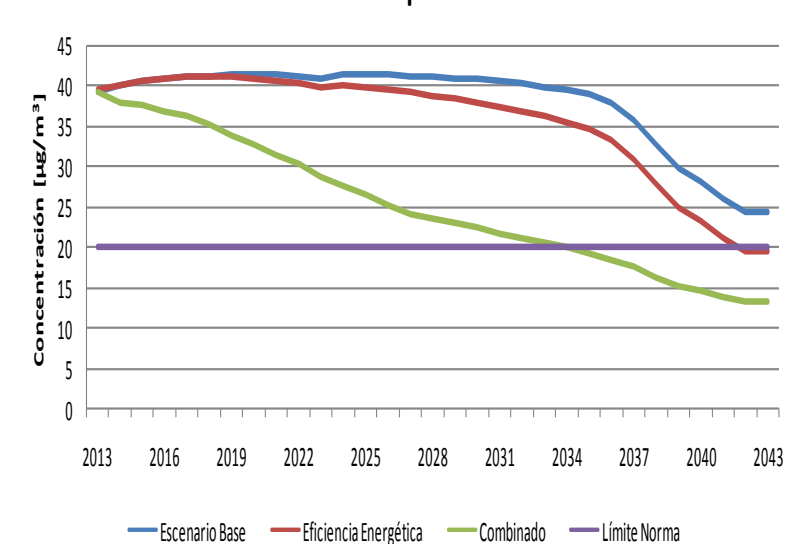
Emisión (Toneladas MP2,5)



Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 198,4 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: 2.234 [ton]
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 2.660 (E. Combinado)
 - Mín: 237 (E. Distrital y E. Geotermia)

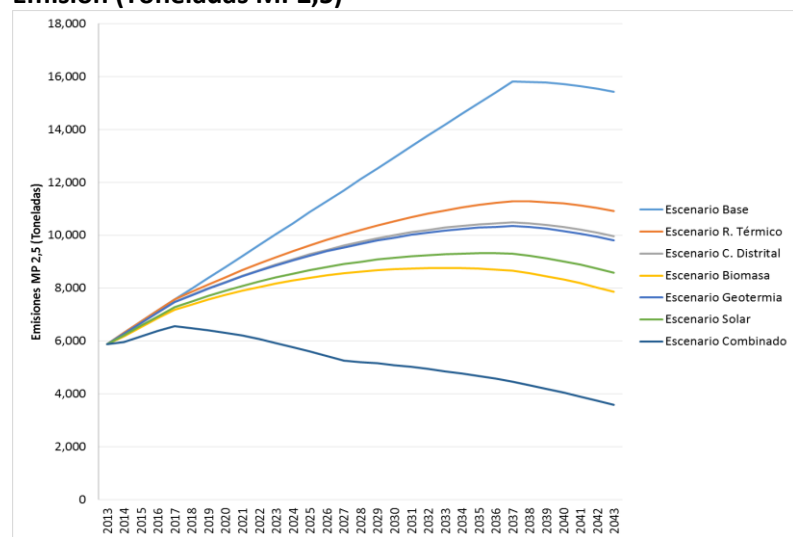
Concepción





Temuco

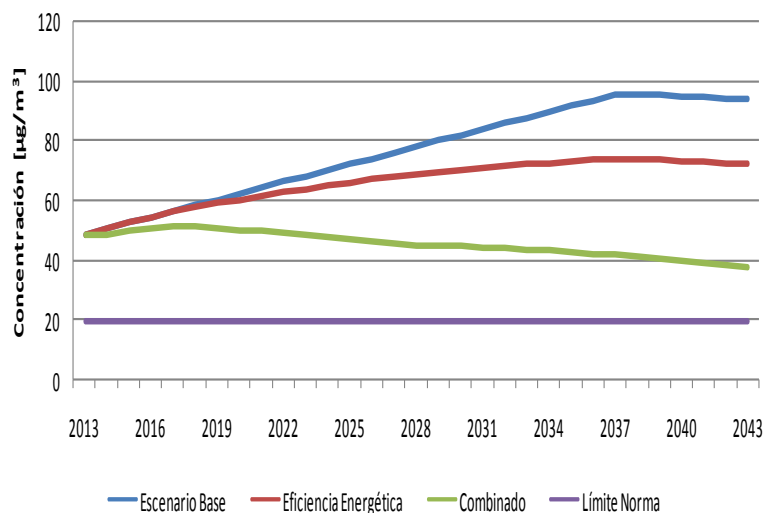
Emisión (Toneladas MP2,5)



Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 211,3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: 4.327 [ton]
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043
 - Máx: 9.547 (E. Combinado)
 - Mín: 966 (E. Distrital)

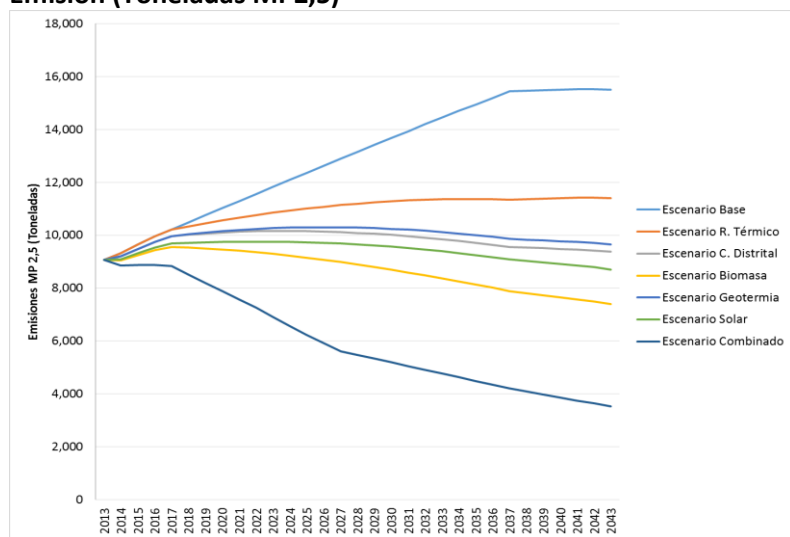
Temuco





Osorno

Emisión (Toneladas MP2,5)

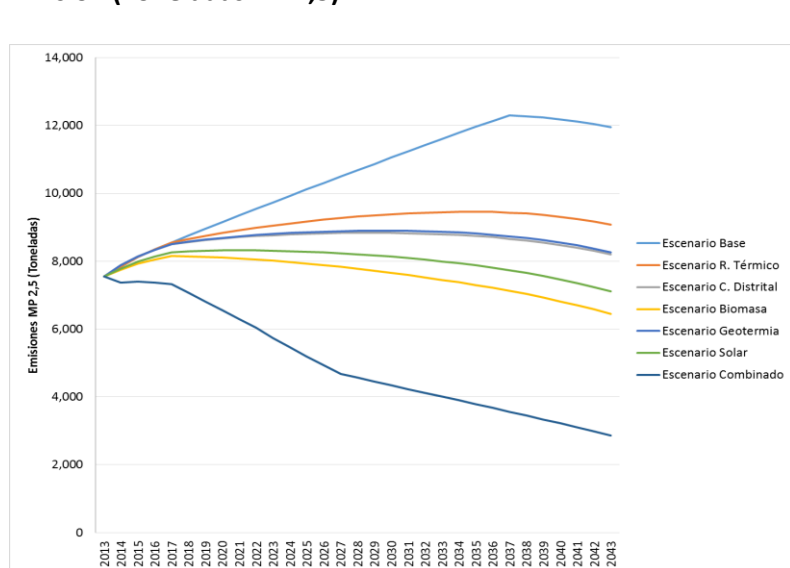


Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 123,9 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: S/I
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043
 - Máx: 8.742 (E. Combinado)
 - Mín: 1.459 (E. Geotermia)

Puerto Montt

Emisión (Toneladas MP2,5)



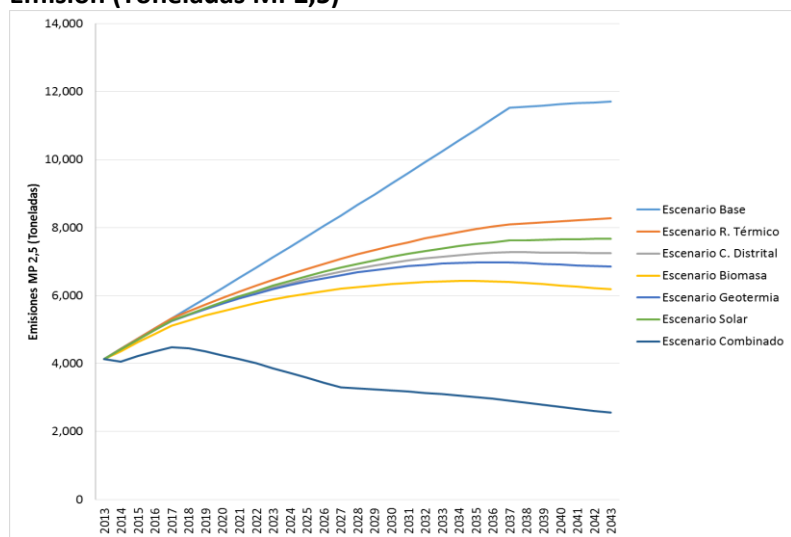
Indicadores

- Factor Emisión Concentración: S/I
- Emisiones Otras Fuentes: S/I
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043: S/I



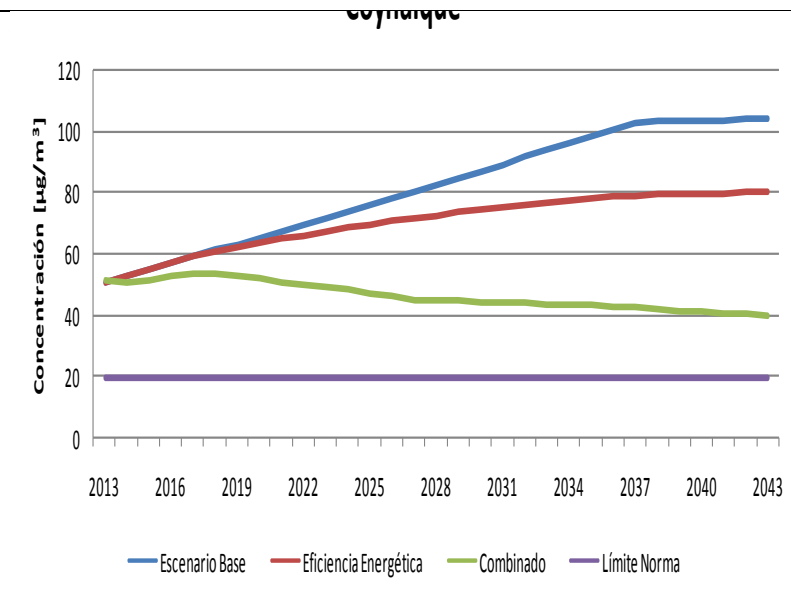
Coyhaique

Emisión (Toneladas MP2,5)



Indicadores

- Factor Emisión Concentración: 142,4 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Emisiones Otras Fuentes: 3.127 [ton]
- Casos de Mortalidad Evitados en Período 2013-2043:
 - Máx: 1.841 (E. Combinado)
 - Mín: 144 (E. Solar)



Las figuras muestran que en sólo dos de las ciudades analizadas es posible alcanzar la meta de 20 [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$] y en el resto, a pesar que hay una reducción respecto al año de referencia 2013, no es posible llegar a dicho nivel. Ni siquiera con el escenario de máximo esfuerzo (combinado) es posible llegar a los niveles de la meta de concentraciones.

En todo caso, si se consideran los beneficios sociales a través de una evaluación según la metodología del Ministerio de Desarrollo Social, dado el alto impacto en reducciones de



mortalidad esperadas, se tiene que todos los escenarios evaluados, incluidos los más exigentes como el de Esfuerzo Máximo, son rentables socialmente. Ello abre un espacio de discusión muy interesante para las posibles inversiones por parte del Estado en algunas de estas iniciativas, en particular las colectivas, como la Calefacción Distrital. El detalle de los resultados de beneficios ambientales se presenta en la siguiente sección.

7.4.3. Resultados de Beneficios Ambientales

Los resultados de beneficios resultan ser consistentes. El cuadro siguiente muestra el beneficio unitario medio entre escenarios y dos métricas de dispersión.

Tabla 38: Beneficios Ambientales Promedio e Indicadores de Dispersión

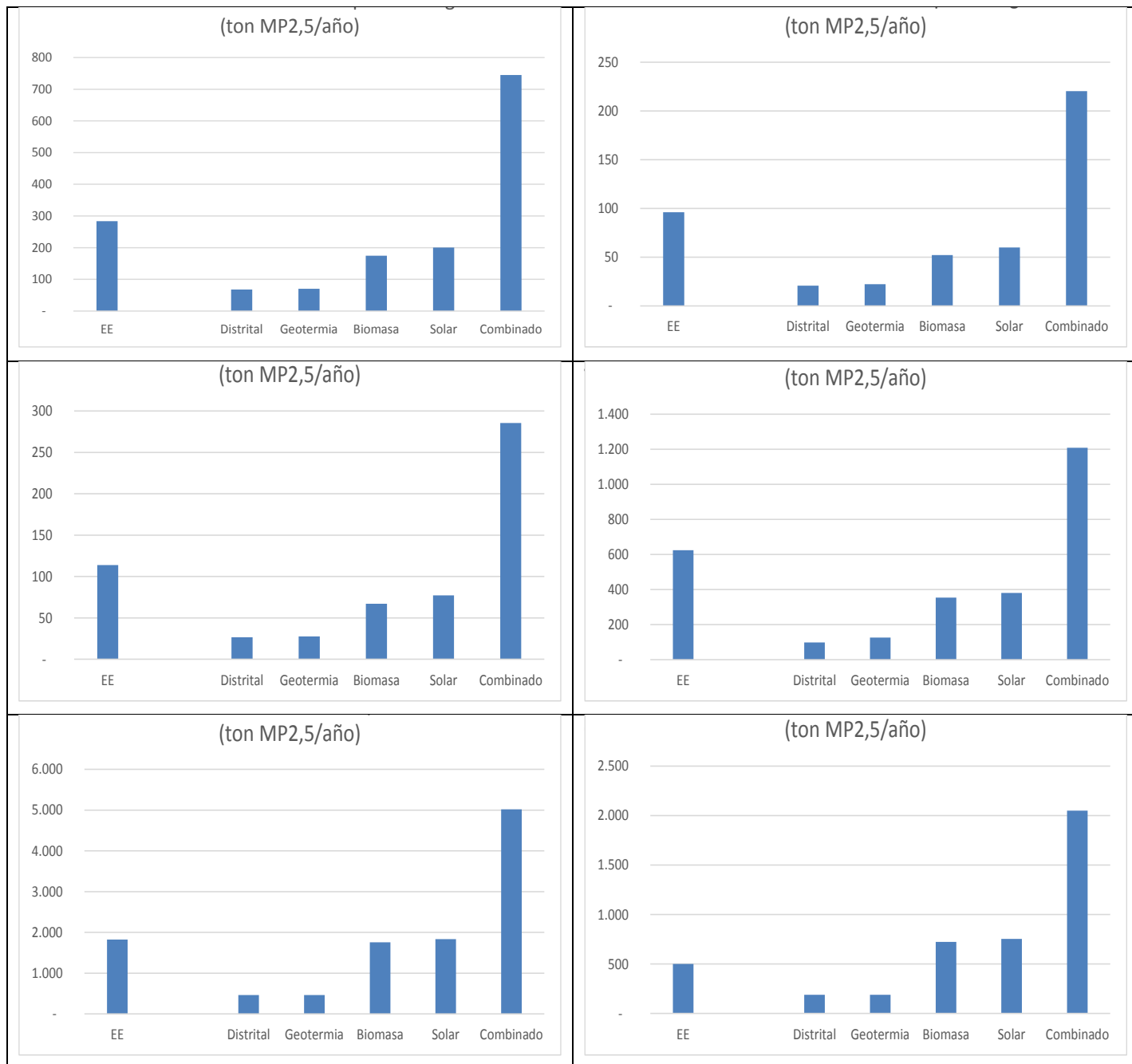
Ciudad/Indicador	Media MM\$/ton MP2,5	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Rancagua	65,93	1,30	2%
Rengo	13,31	0,23	2%
San Fernando	17,61	0,26	1%
Talca	72,47	2,68	4%
Chillán	14,44	0,52	4%
Concepción	14,96	0,20	1%
Temuco	22,85	0,75	3%
Osorno	18,38	0,79	4%
Coyhaique	5,80	0,17	3%

Fuente: Elaboración Propia

Se aprecia que la media es un buen indicador del beneficio unitario por ser relativamente pequeñas ambas métricas de dispersión. En particular, los beneficios unitarios (\$/ton MP2,5 abatido) son relativamente constantes por ciudad a pesar de la no-linealidad del método de la función de daño.

No obstante, es importante recalcar que estos resultados están sujetos a altísima incertidumbre. Fuente de incertidumbre incluye las funciones de daño y valores (aunque ya existe cierto consenso respecto de su uso). Destaca muy especialmente la incertidumbre asociada a los factores de emisión concentración que varían muchísimo de un estudio a otro.

Los beneficios ambientales son mayores mientras mayor es la reducción, por lo que a continuación se presentan para cada ciudad los ahorros de emisiones anuales medios. Se presenta primero siempre el escenario de RT (cuya reducción se considera como base) y luego en orden creciente los escenarios de ERNC (cuyas reducciones se producen por sobre el escenario RT).



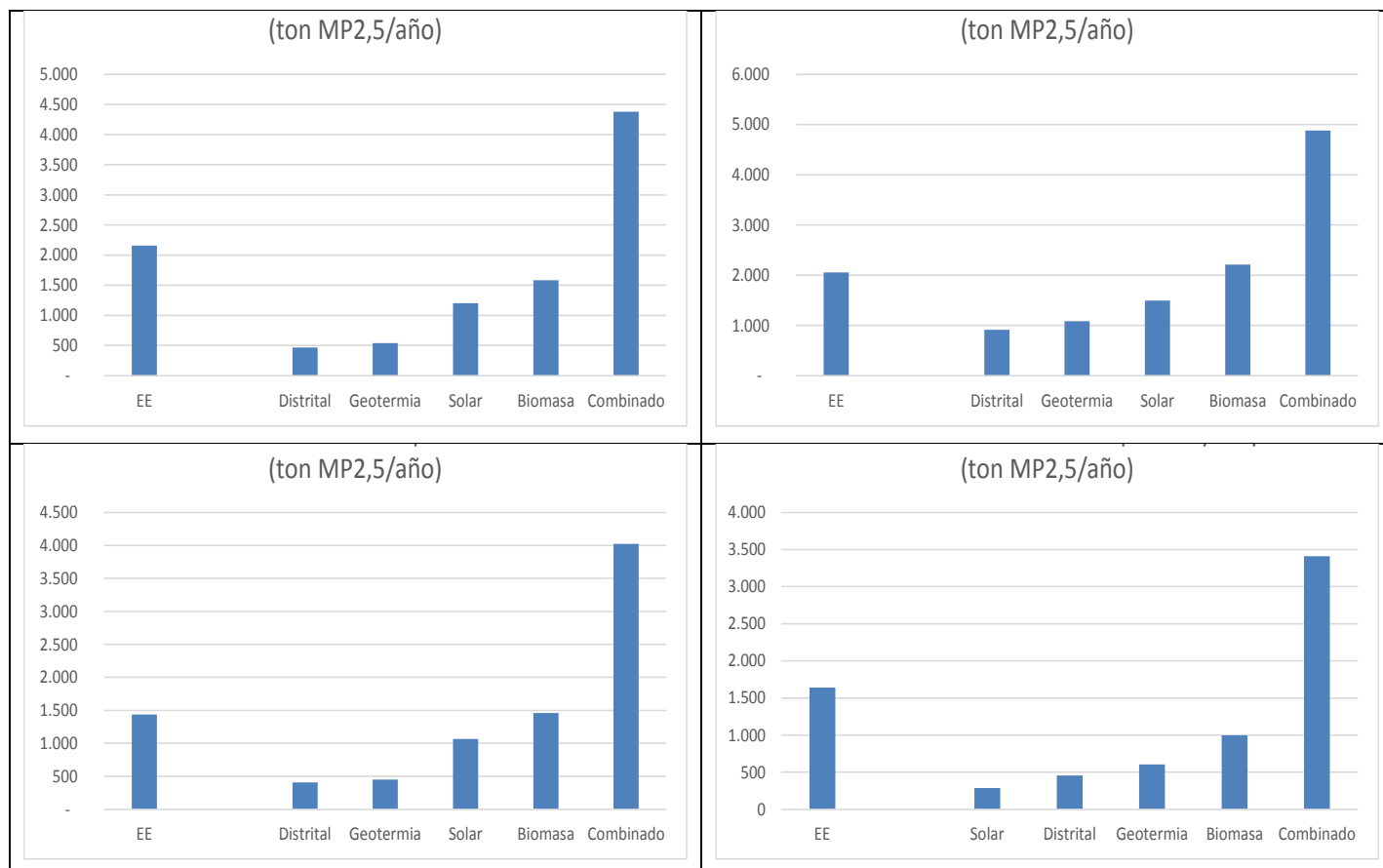


Figura 38: Abatimiento Promedio Anual según Escenario y Ciudad (Ton MP2,5)
Fuente: Elaboración Propia

Se aprecia que los escenarios de calefacción distrital reportan las menores reducciones (y por tanto menores beneficios) en todas las ciudades salvo en Coyhaique donde el escenario solar presenta menor reducción. El escenario combinado presenta la mayor reducción media anual (relativa al caso de RT) en todas las ciudades consideradas.

7.5. Análisis de Resultados de Costo Efectividad y Costo Beneficio

En esta sección se presenta un análisis de los principales resultados por ciudad y escenario. Los indicadores calculados para cada ciudad y escenario se presentan a continuación.



Tabla 39: Detalles Indicadores Calculados

Indicador	Fórmula
Beneficios en Salud / Ton reducida [MM \$CLP/ton]	$\frac{VAN \text{ de todos los beneficios en salud}}{VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}}$
(Costos Combustibles + O&M) / Ton reducida [MM \$CLP/ton]	$\frac{VAN \text{ de Costos de Combustibles y Operación y Mantenimiento}}{VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}}$
Costos Capital / Ton reducida [MM \$CLP/ton]	$\frac{\text{Costos de Inversión}}{VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}}$
Beneficios en Salud [MM \$CLP]	$VAN \text{ de los beneficios en salud}$
Emisiones Reducidas (VPN) [ton]	$VAN \text{ de la reducción de emisiones de } MP_{2.5}$
Emisiones Reducidas (Promedio Anual) [ton]	$\text{Promedio Anual de las reducciones de emisiones de } MP_{2.5}$
Energía Reducida [teracal]	$VAN \text{ de la reducción de energía}$
VPN [MM \$CLP]	$VAN \text{ de costos y beneficios}$
Costos	$VAN \text{ de costos (inversión + combustible + O\&M)}$
Costos Combustibles/Teracal [MM \$CLP/teracal]	$\frac{VAN \text{ de Costos de Combustible}}{VAN \text{ de los consumos de energía reducidos}}$
Emisiones Totales Reducidas [ton]	$VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}$
Costos por tonelada abatida [MM \$CLP/ton]	$\frac{\text{Costos Totales (Inversión + Combustibles + O\&M)}}{VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}}$
Beneficios por Mortalidad [MM \$CLP]	$VAN \text{ de los beneficios por Mortalidad}$
Costo (beneficio) social / Ton reducida [MM \$CLP/ton]	$\frac{VAN \text{ de Costos y Beneficios}}{VAN \text{ de las emisiones de } MP_{2.5} \text{ reducidas}}$

Fuente: Elaboración Propia

En anexo 5.3 se detalla cada uno de los indicadores de abatimiento y costos por escenario ciudad.

En esta sección, la presentación de los resultados se realiza a través de curvas de abatimiento que permiten visualizar el costo de cada escenario junto con su potencial de abatimiento.

Una curva de costos marginales de abatimiento se define como un gráfico que indica el costo, en \$/ton MP_{2,5} abatida, asociada con la última unidad (costo marginal) de emisión abatida para distintas cantidades de emisiones reducidas. Los ejes de la curva combinan el costo de abatimiento que representan las medidas técnicas disponibles y su impacto relativo. Este impacto relativo corresponde al potencial de reducción cada escenario o medida considerada. La reducción se mide de manera contrafactual.



La figura siguiente presenta la forma de una curva de costos de abatimiento experta típica. Cada barra/rectángulo se asocia a una medida o escenario (al nivel de agregación definido por el modelador). El ancho de cada barra se interpreta como el potencial de reducción de emisiones asociadas a un escenario dado. El potencial refleja la capacidad instalada de activos total del escenario de abatimiento en el año del análisis, independiente de cuando esta capacidad ha sido construida. La altura de cada barra representa el costo promedio de evitar una tonelada de particulado en el año de análisis para cada oportunidad.

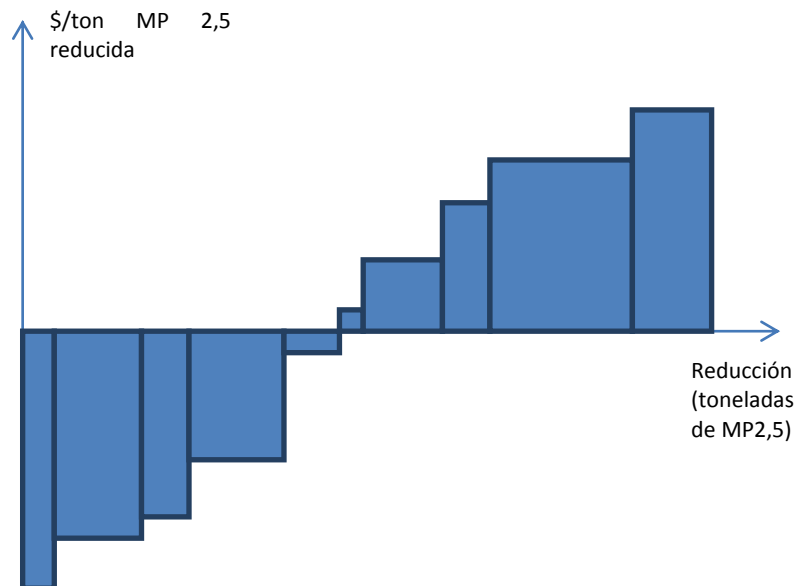


Figura 39: Principales dimensiones de la curva de costos de abatimiento

Fuente: Elaboración Propia

El orden de mérito de los escenarios está basado en los escenarios con los menores costos. A pesar de llamarse curva de costo marginal de abatimiento, el término “marginal” se debe al ordenamiento creciente de los costos. Para cada escenario, en la construcción de una curva de abatimiento experta, se asocia un costo medio que es independiente de la cantidad de emisiones reducida. La aplicación de una curva de abatimiento a escenarios debe interpretarse con cuidado. Esto porque cuando se trata de medidas una podría aplicarse tras otra. En el caso de escenarios, esto no ocurre salvo en el caso de RT (reacondicionamiento térmico) que se evalúa respecto del caso sin reacondicionamiento térmico. Es decir, permite comparar los escenarios pero no afirmar que si se requiere abatir más se implementará un nuevo escenario.



En cada caso se construyen dos curvas de costo marginal de abatimiento. En el primer caso se construye una curva en que solo se consideran los costos de las tecnologías. En este caso el costo de abatimiento se estima siguiendo las metodologías usuales mediante la expresión:

$$CA = \frac{\sum_{t=0}^T (\Delta C_k^t + \Delta C_o^t + \Delta C_f^t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T E_a^t / (1+r)^t}$$

En este caso, ΔC_k^t , ΔC_o^t , ΔC_f^t representan los costo de inversión, operación y combustible en t (del escenario ERNC relativo al de RT). r es la tasa social de descuento que define la autoridad (7%) y E_a^t la reducción de emisiones (abatimiento) del escenario ERNC relativo al de RT. En este caso si el costo es negativo se genera un ahorro social por lo que se perciben beneficios incluso ignorando la externalidad ambiental.

Si se consideran beneficios ambientales entonces la curva de costo de abatimiento se modifica según la expresión siguiente.

$$CS = \frac{\sum_{t=0}^T (\Delta C_k^t + \Delta C_o^t + \Delta C_f^t - B_a^t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T E_a^t / (1+r)^t}$$

Donde B_a^t es el beneficio ambiental asociado a la reducción de emisiones en el periodo t. Esta expresión la denominaremos costo social de abatimiento por ser la métrica más completa al incluir todas las componentes de costos y beneficios analizados. En este caso se perciben beneficios si $CS < 0$.

A continuación se presentan los resultados para la ciudad de Rancagua. Los resultados del escenario reacondicionamiento térmico se estiman respecto del escenario base (sin reacondicionamiento térmico). El resto de los escenarios entrega costos de abatimiento por sobre este último.

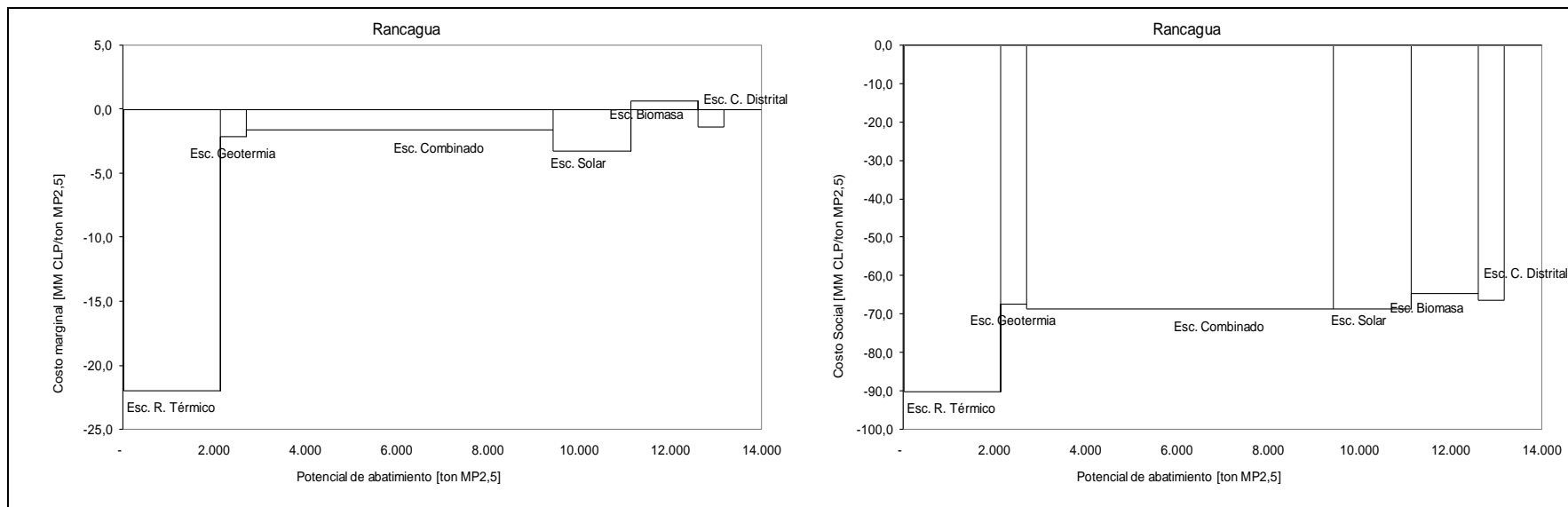


Figura 40: Curva de Costo de Abatimiento para Rancagua. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

Se aprecia que en ambos casos (y sin considerar el escenario de reacondicionamiento térmico) el escenario solar es el que resulta con mayores beneficios. El escenario combinado es aquel que reduce más emisiones en el horizonte de evaluación. Resulta relevante destacar que sin beneficios ambientales sólo el escenario biomasa tiene un costo positivo. Las figuras siguientes presentan los resultados para Rengo.

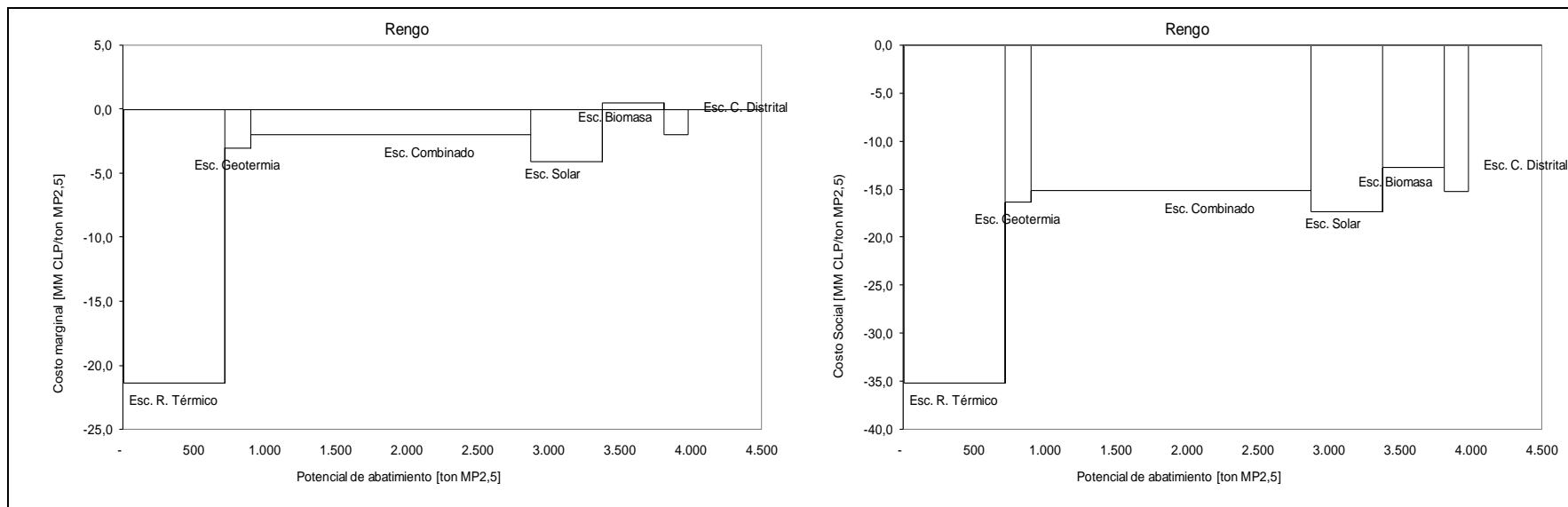


Figura 41: Curva de Costo de Abatimiento para Rengo. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente resulta que todos los escenarios salvo el de biomasa arrojan ahorros sociales (sin considerar beneficios ambientales). En ambos casos los resultados menos costo efectivo se presenta en el escenario de biomasa. Las figuras siguientes presentan los resultados para San Fernando.

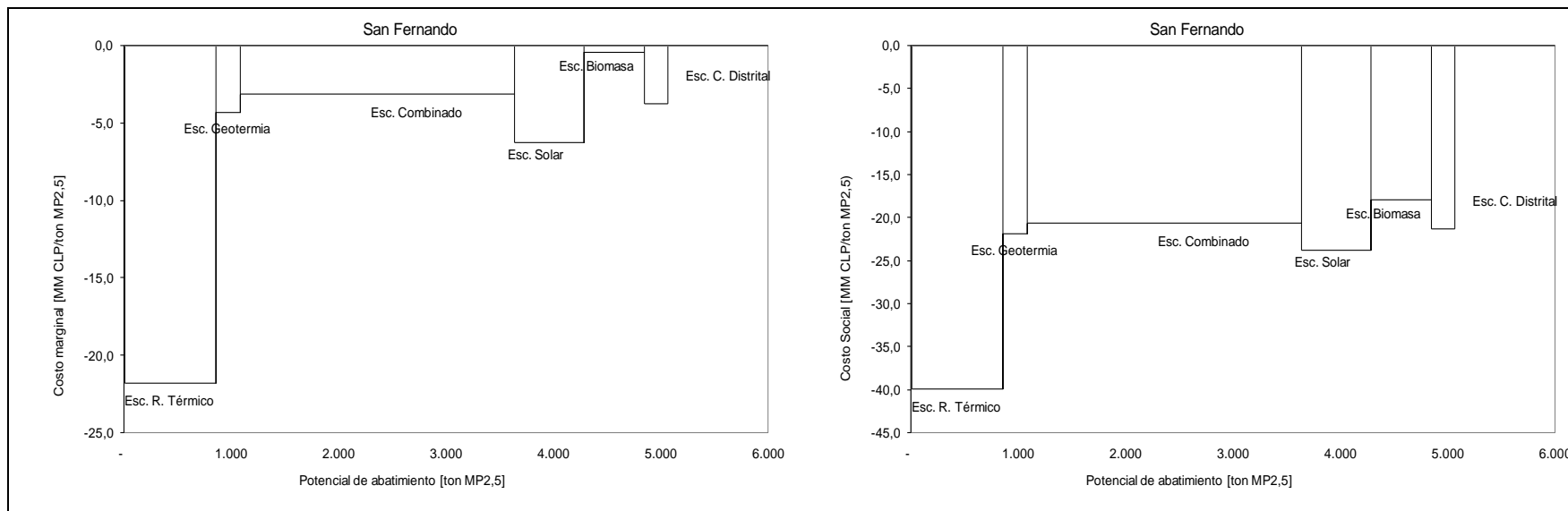


Figura 42: Curva de Costo de Abatimiento para San Fernando. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

En este caso se aprecia que considerando o no beneficios ambientales, todos los escenarios logran abatir con beneficios. Nuevamente es el escenario solar que logra el abatimiento a menor costo. A continuación se presentan los resultados de Talca.

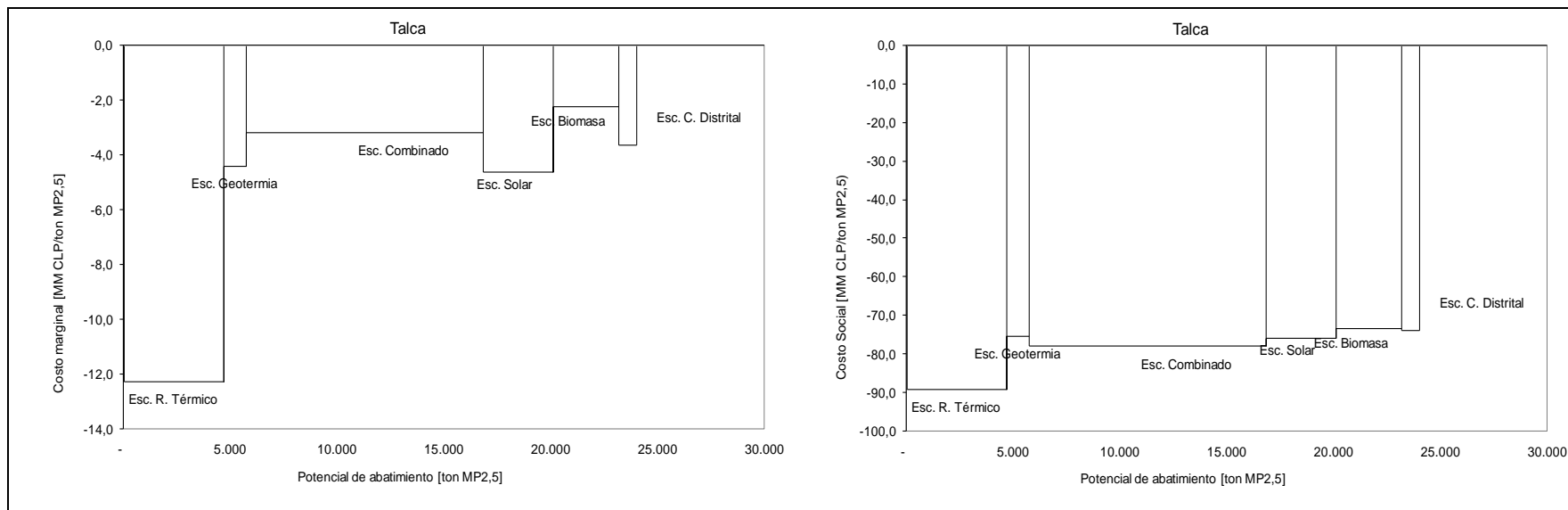


Figura 43: Curva de Costo de Abatimiento para Talca. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente todos los escenarios se asocian a beneficios. Sin embargo, sin considerar beneficios resulta que el escenario solar es el más costo efectivo mientras que al incluirlos el escenario combinado pasa al primer lugar.

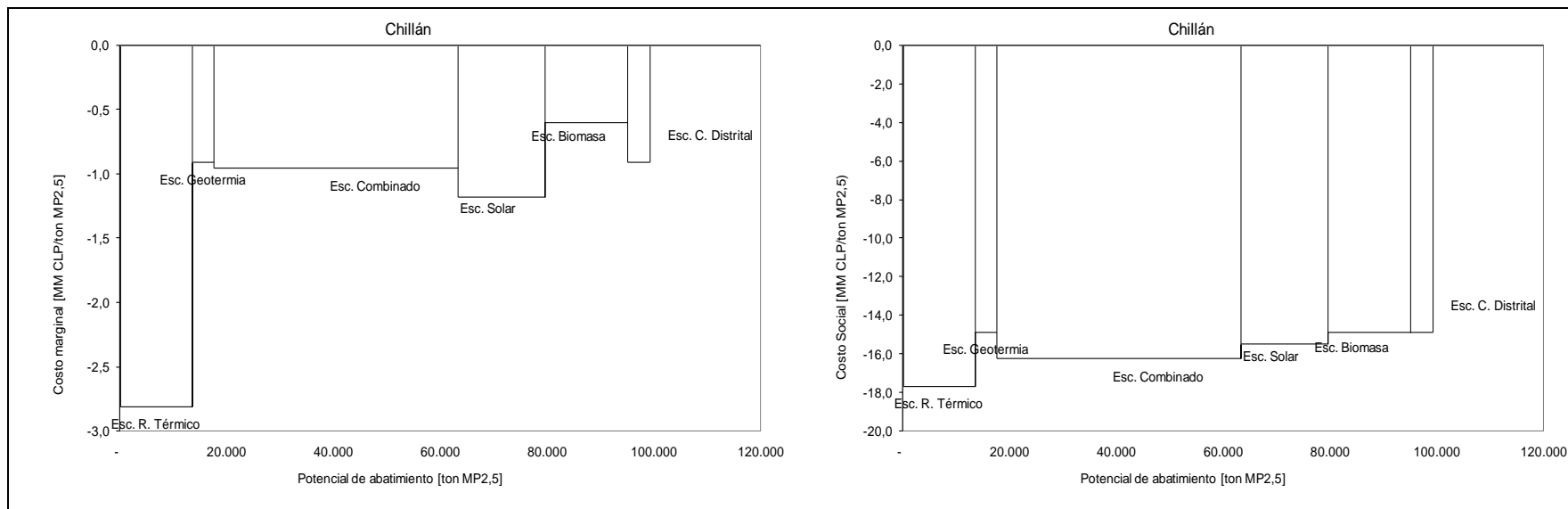


Figura 44: Curva de Costo de Abatimiento para Chillán. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente todos los escenarios se asocian a beneficios. Sin embargo, sin considerar beneficios resulta que el escenario solar es el más costo efectivo mientras que al incluirlos el escenario combinado pasa al primer lugar. A continuación se presentan los resultados para la ciudad de Concepción.

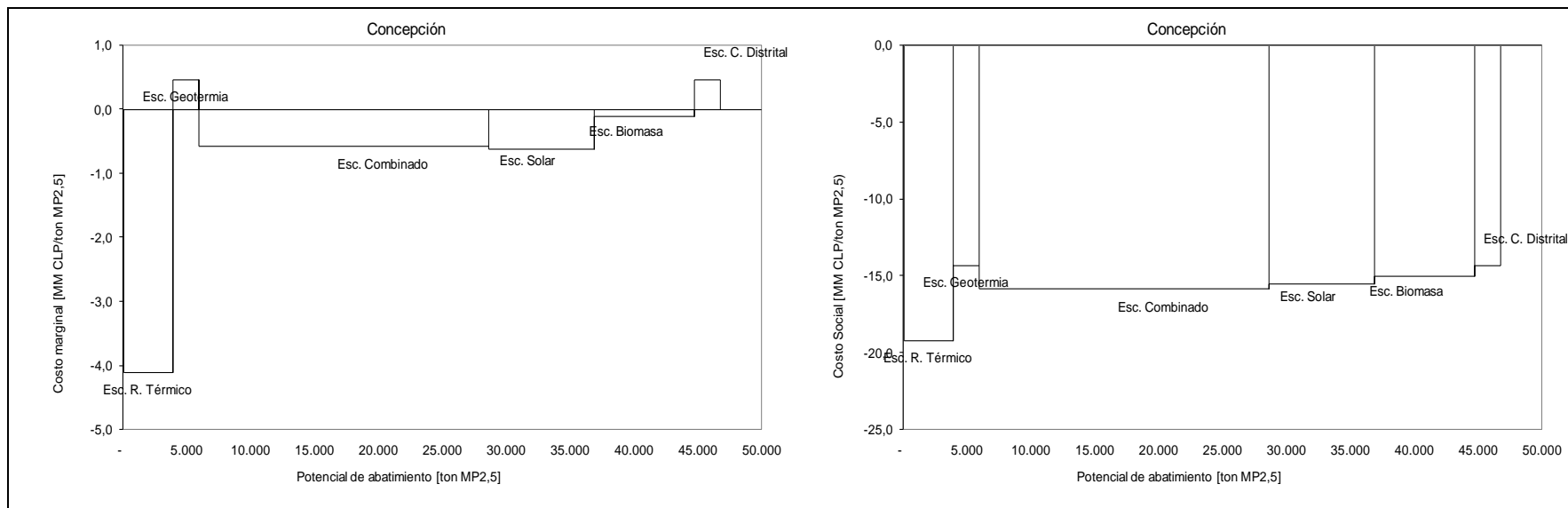


Figura 45: Curva de Costo de Abatimiento para Concepción. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

En Concepción se repite que el ranking cambia según si se incluyen o no beneficios. Sin embargo, sin considerar beneficios ambientales resulta que el escenario solar es el más costo efectivo mientras que al incluirlos el escenario combinado pasa al primer lugar. En este caso, y sin considerar beneficios ambientales, los escenarios de calefacción distrital y geotermia presentan costos estrictamente positivos. A continuación se presentan los resultados de la ciudad de Temuco.

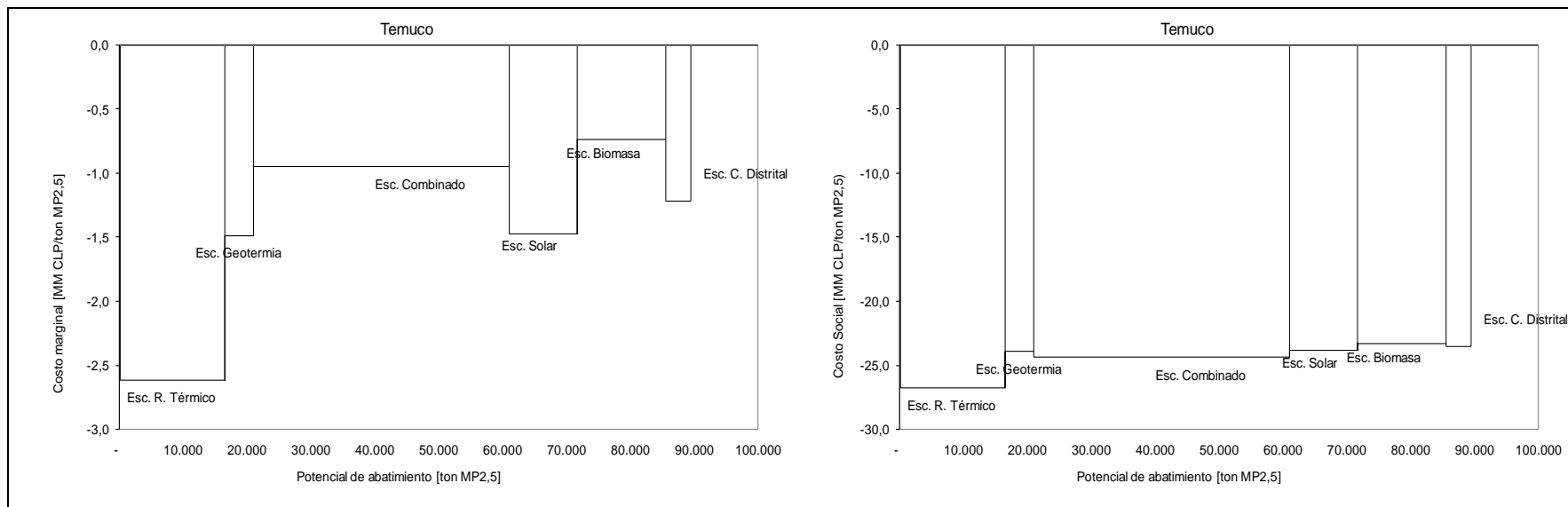


Figura 46: Curva de Costo de Abatimiento para Temuco. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

En Temuco nuevamente todos los escenarios se asocian a beneficios. Sin beneficios ambientales el escenario solar encabeza el ranking mientras que considerándolos es el escenario combinado. En ambos casos el mayor costo se presenta en el escenario biomasa. A continuación se presentan los resultados de Osorno.

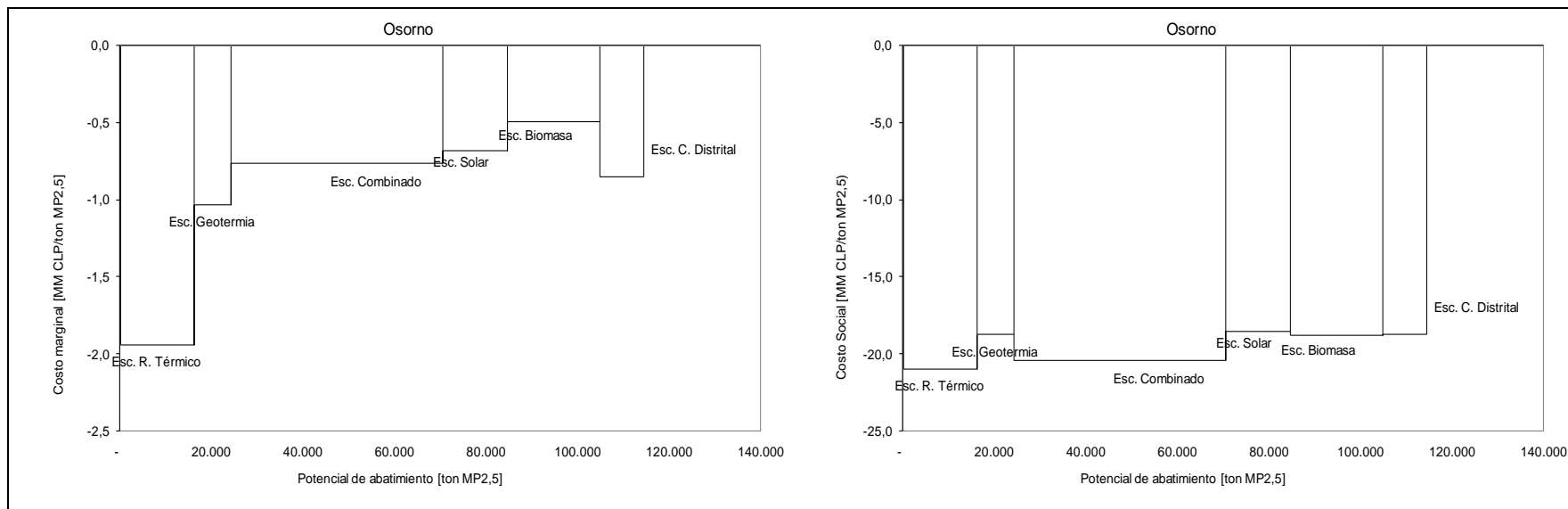


Figura 47: Curva de Costo de Abatimiento para Osorno. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

En Osorno el ranking de costo efectividad lo encabeza el escenario de geotermia sin beneficios ambientales y el escenario combinado al considerarlos. El escenario de calefacción distrital presenta el mayor costo en ambos casos. Todos los escenarios se asocian a beneficios netos.

A continuación se presentan los resultados de Puerto Montt. En este caso no se cuenta con beneficios ambientales por lo que sólo se cuenta con la curva de la izquierda.

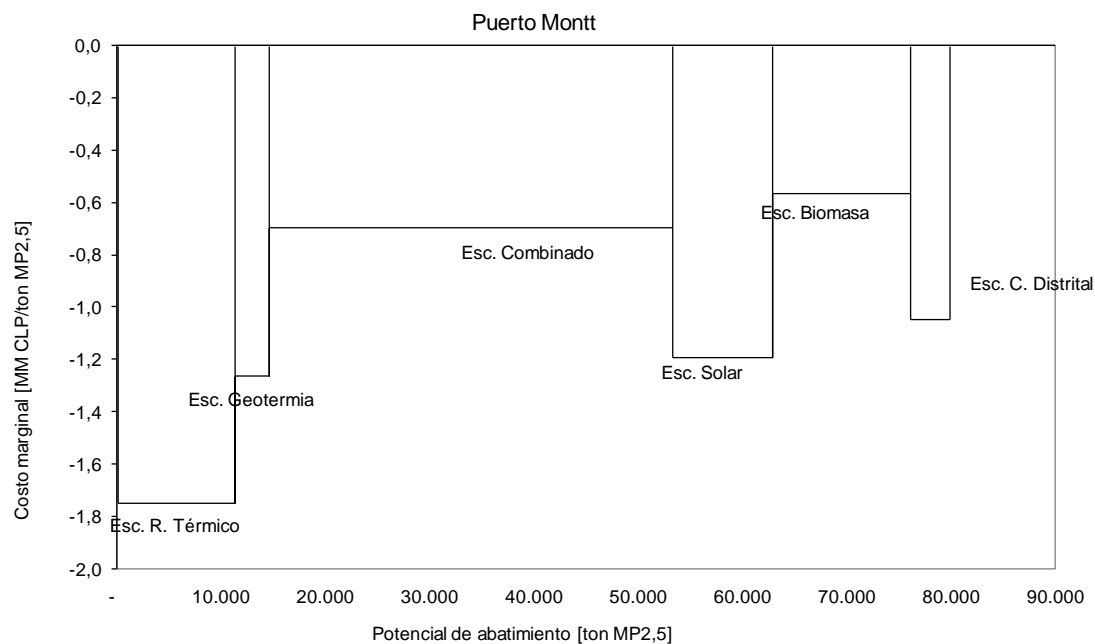


Figura 48: Curva de Costo de Abatimiento para Puerto Montt (costo de Tecnología)
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados muestran que el escenario de geotermia es el más costo efectivo mientras que el de biomasa resulta ser el más costoso. En todo caso, todos los escenarios están asociados a beneficios. Finalmente se presentan los resultados de Coyhaique:

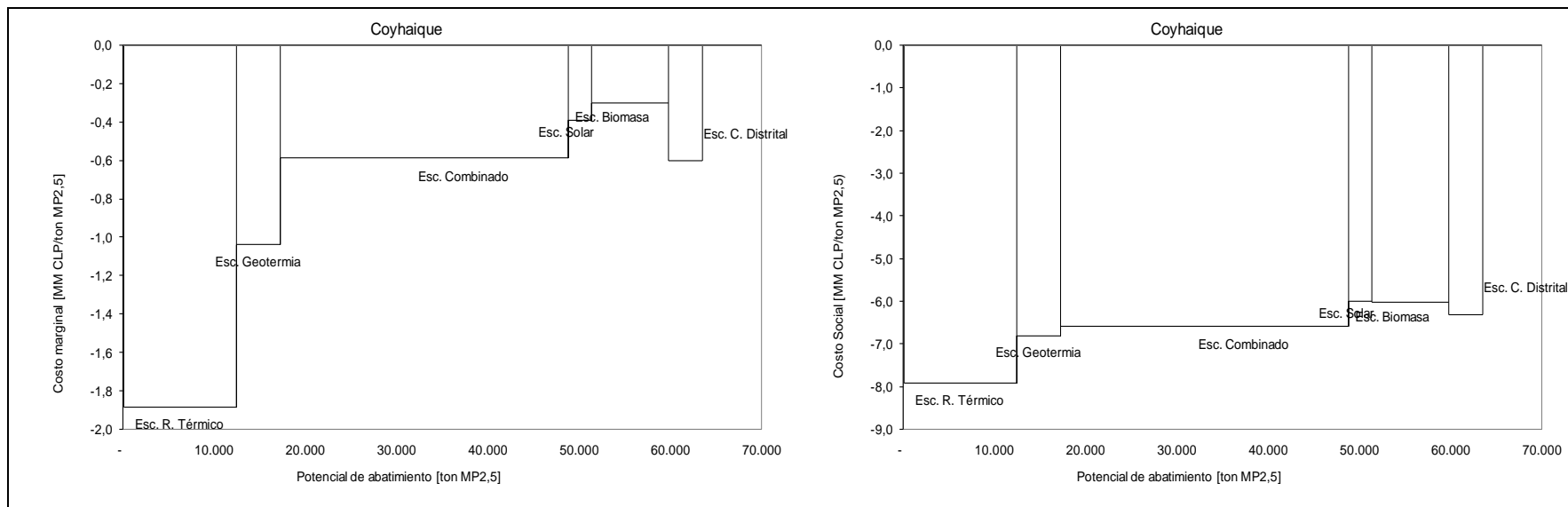


Figura 49: Curva de Costo de Abatimiento para Coyhaique. Izquierda: costo de Tecnología; Derecha: costo social
Fuente: Elaboración Propia

En Coyhaique todos los escenarios presentan beneficios. Con y sin beneficios ambientales encabeza el ranking el escenario de geotermia mientras que el de calefacción distrital es el que presenta mayor costo.



Finalmente, en el cuadro siguiente se presenta un resumen de algunos indicadores económicos, energéticos y ambientales identificados para cada tecnología por separado (aisladas respecto a los escenarios, los cuales mezclan tecnologías).

Tabla 40: Indicadores por tecnología

Indicador	Pellets		C. Distrital		Bombas de Calor		Solar	
Potencia Instalada Total (kW)	4.804	14.762	1.080	12.083	158	9.093	4.815	56.637
Inversión total (KUS\$)	1.261	3.875	1.393	16.405	101	5.804	4.232	48.042
Inversión actualizada (KUS\$)	515	1.472	383	5.769	28	1.704	1.962	19.719
Inversión por Emisión MP2,5 (US\$/Ton MP2,5)	67	959	320	4.515	131	173	254	3.176
Inversión por Concentración MP2,5 (US\$/ug/Nm3 MP2,5)	11.330	50.906	ND	ND	24.597	24.597	ND	168.631
Inversión por Energía Reemplazada/(US\$/Tcal)	2.109	4.213	9.369	18.788	3.903	4.634	7.584	16.210

Fuente: Elaboración Propia

Se identifica el valor máximo y mínimo encontrado en las distintas ciudades en que se aplica la tecnología. Las variaciones se deben a variables como el tipo de vivienda que predomina en la ciudad, los factores de emisión de las tecnologías existentes en la línea base y los factores de emisión concentración que se han estimado para la zona.



8. Análisis de resultados y conclusiones finales

8.1. Análisis de resultados

Los resultados de este estudio permiten establecer que tanto los recursos renovables, como las tecnologías limpias, se encuentran disponibles para satisfacer la demanda de calefacción de la zona centro-sur de Chile. En este sentido, el mix de recursos es muy interesante y resalta las ricas condiciones que posee el país, las cuales han sido muy incipientemente explotadas hasta ahora.

Se ha evaluado una serie de escenarios tecnológicos factibles de ser implementados en el país, los que presentan interesantes resultados de costos y reducciones de emisiones, como se ha presentado previamente. A modo de resumen:

- En el caso del reacondicionamiento térmico (RT), para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 4 y 25 millones de dólares en todo el período, VPN entre -29 y -108 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 100 y 2.000 toneladas promedio anual con respecto al escenario base.
- En el caso del escenario de biomasa, para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 1 y 12 millones de dólares en todo el período, VPN entre 2 y -19 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 50 y 2.200 toneladas promedio anual con respecto al escenario RT.
- En el caso del escenario solar, para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 1 y 20 millones de dólares en todo el período, VPN entre -2 y -36 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 60 y 1.800 toneladas promedio anual con respecto al escenario RT.
- En el caso del escenario de geotermia, para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 1 y 5 millones de dólares en todo el período, VPN entre 2 y -16 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 20 y 900 toneladas promedio anual con respecto al escenario RT.
- En el caso del escenario de calefacción distrital, para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 1 y 7 millones de dólares en todo el período, VPN entre 2 y -15 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 20 y 1.000 toneladas promedio anual con respecto al escenario RT.

Se ha incluido un escenario de alto esfuerzo (combinado), con criterios más bien exploratorios, para visualizar el efecto en las emisiones y en los costos que se podrían alcanzar. Para este escenario combinado, para las ciudades analizadas se estima un costo de inversión entre 9 y 36 millones de dólares en todo el período, VPN entre -7 y -82 millones de dólares y reducciones de $MP_{2,5}$ entre 220 y 4.900 toneladas promedio anual con respecto al escenario RT.



8.2. Recomendaciones y conclusiones

Si bien se ha intentado llevar a cabo análisis robustos, dados los recursos disponibles, existen diversas falencias que escapan del alcance de este estudio y que impiden asignar un 100% de confiabilidad a algunos de los indicadores resultantes y que por lo tanto, en estas condiciones, pueden ser un aporte sólo referencial a la toma de decisiones en materia de contaminación atmosférica. Entre los temas a destacar se encuentran los siguientes:

Incertidumbre respecto a la información de Leña

La disponibilidad y uso de la biomasa forestal y sus implicancias a nivel local, problema no resuelto hasta ahora por ninguna de las instancias que considera este energético (Balance de Energía, Encuesta CASEN; otros) es una fuente de incertidumbre muy grande, por lo que se requiere urgentemente una mejora en la calidad de la información, para poder regularlo adecuadamente. Existen diversos estudios que entregan información, pero no se dispone de uniformidad respecto a la misma y la autoridad energética no ha entregado hasta ahora cifras confiables que puedan ser utilizadas oficialmente. Dado que este energético es el principal responsable de las emisiones de MP en el sur del país, la incertidumbre en su disponibilidad no permite tener estimaciones de demanda y de emisiones que sean confiables.

Se recomienda desarrollar una estrategia a nivel nacional (sur del país) para cuantificar el uso de la leña a nivel de cada ciudad y complementarlo con un trabajo de detalle con encuestas en viviendas representativas.

Incertidumbre y falta de uniformidad en los inventarios de emisiones

Se ha detectado una importante falta de uniformidad en la información y las metodologías utilizadas para la construcción de los inventarios de emisiones de las ciudades revisadas.

En la revisión de dichos inventarios se encontraron áreas en las cuales es posible mejorar la calidad de la información de base. Específicamente en la parte residencial, claramente existe información primaria que es necesario estudiar más profundamente, en lo que se relaciona con el conocimiento real respecto de los consumos de leña de estas ciudades, la calidad del combustible usado y el comportamiento de los usuarios frente a sus artefactos de combustión (especialmente operación en tiraje cerrado). Es importante poder hacer un chequeo de estos consumos, con los consumos energéticos destinados a calefacción de las viviendas, de tal manera de poder tener un segundo control de la información.

En lo referido a las metodologías usadas en los inventarios, existe espacio de mejoras respecto a estandarizar u homogeneizar la forma de utilizar la información de nivel de actividad y los factores de emisión, de tal manera de tener comparabilidad entre los distintos inventarios. En algunos



casos se pudo observar el uso de distintos factores de emisión que, al momento que se hacían los cruces con el consumo de energía asociado, no permitían una comparabilidad entre ciudades.

Se recomienda hacer una revisión metodológica de los inventarios realizados hasta la fecha, de manera de identificar las mejores prácticas y supuestos utilizados en cada uno de ellos, para de esta forma corregir estos antecedentes y uniformar las estimaciones en los futuros inventarios de emisiones que se lleven a cabo en las ciudades que aún no disponen de ellos.

Incertidumbre en los usos finales de energía

Se requiere una mejora en la identificación del mix de consumo de tecnologías/energéticos a nivel local. Si bien se dispone del dato por zonas para el año 2009 del estudio CDT (2010), no existe un aterrizaje a nivel de ciudades y con valores más actualizados que permita aportar en los inventarios de emisión y los planes de descontaminación.

Se recomienda una revisión de los datos levantados por el estudio CDT (2010) a nivel de las ciudades saturadas y latentes, de manera de tener una mejor representación de su mix energético.

Otras recomendaciones

A la hora de desarrollar o mejorar los planes de descontaminación de las ciudades se recomienda llevar a cabo un análisis de la evolución de las emisiones de las principales fuentes de la ciudad (no sólo el sector residencial), al menos en un horizonte de 20 años. Esto permite mejorar las opciones de mitigación y las exigencias que se pueden definir a nivel local, considerando de una manera integrada a todas las fuentes emisoras involucradas.

Se sugiere explorar las opciones colectivas (calefacción distrital) de una manera más agresiva. En este caso de análisis no se consideró como opción la intervención en el casco urbano consolidado, por la poca factibilidad que arrojaron los análisis. Sin embargo, dada la posibilidad de lograr altas rentabilidades sociales con este tipo de proyectos, el invertir en esta área puede ser compensado con las mejoras en calidad del aire y salud de las personas. Igualmente, es recomendable estudiar un modelo de negocios para este tipo de soluciones tecnológicas, de manera de contar con antecedentes para determinar si este tipo de tecnologías podrían consolidarse a través de la inversión privada.

Respecto a las estadísticas e información a levantar, se recomienda mantener antecedentes confiables y homogéneos respecto al uso de artefactos y consumo de energía, que permitan hacer modelos correctos para el seguimiento de las emisiones atmosféricas y otros impactos del uso de calefacción a nivel residencial. Es importante que las distintas estadísticas de inventarios y de uso de la energía mantengan las mismas variables y criterios de modo que sean agregables y



comparables. Esto dado que las fuentes de información consultadas presentaban distintos valores, variables, niveles de desagregación y factores utilizados, lo que complica la realización de modelos y proyecciones.

Por último, respecto a la aplicación de políticas de fomento de tecnologías ERNC, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Antes de fomentar el uso de equipos renovables se debe fomentar el reacondicionamiento térmico y uso eficiente de la energía, de modo de primero reducir la demanda de energía y luego modificar la oferta y conversión de energía. En el caso contrario, el tamaño y cantidad de equipos de tecnologías ERNC será sobredimensionado, generando costos mayores que los necesarios.
- El fomento a las ERNC puede llevarse a cabo mediante la aplicación de programas de recambio de equipos e incentivos en el precio de estos.
- En el caso de los equipos a pellets, el fomento a su instalación requiere el desarrollo del mercado, pues en la actualidad no existe una oferta suficiente que sea capaz de cubrir la demanda asociada a la instalación masiva de estufas en el futuro. En este caso también se requiere de información que permita definir un modelo de negocios para la producción y distribución de pellets a nivel local.
- En el caso de los sistemas de calefacción distrital, el fomento a su instalación requiere que se propicie la construcción de viviendas en conjuntos habitacionales ordenados (por ejemplo, a través de condominios) y se trabaje en un modelo de concesión para su distribución. Se recomienda adicionalmente que los sistemas de calefacción distrital aprovechen la instalación de sistemas de cogeneración para la oferta de energía eléctrica, la cual si bien ha quedado fuera del alcance del presente estudio, presenta mayores eficiencias respecto al caso en que se suministre calefacción y electricidad por separado.



9. Bibliografía

Acevedo, Ricardo. 2013. La geotermia se convierte en la gran promesa. *La Tercera*. 03 de Agosto de 2013.

AIE. 2009. *Renewable Energy Essentials: Solar Heating and Cooling*. Agencia Internacional de Energía. s.l. : AIE, 2009. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_heating_cooling.pdf.

Ambiente Consultores Ltda. - PRIEN Universidad de Chile. 2007. *Programa de Inversión Pública para Fomentar el Reacondicionamiento Térmico del Parque Construido de Viviendas*. Santiago : s.n., 2007.

Ambiente Consultores Ltda. 2007b. *Análisis Técnico-Económico de la Aplicación de una Norma de Emisión para Artefactos de Uso Residencial que Combustionan Aplicación de una Norma de Emisión para Artefactos de Uso Residencial que Combustionan*. Santiago, Chile : s.n., 2007b.

Ambiosis. 2009. *Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos y Definición de Área de Influencia de las Emisiones que Causan el Efecto de Saturación por MP10 en la Ciudad de Talca*. Santiago : s.n., 2009.

Amesti. 2013. [En línea] 11 de Noviembre de 2013. <http://www.amesti.cl/>.

Anwo. 2013. Listado de Productos Anwo Aerotermia. [En línea] 4 de Noviembre de 2013. http://www.anwo.cl/site_2/listado_de_productos.html?unit=8&category_id=c2231f2b5f27716fe89556a443afe2f0.

—. **2013.** Listado de Productos Geotermia. [En línea] 4 de Noviembre de 2013. http://www.anwo.cl/site_2/listado_de_productos.html?unit=8&category_id=a22414e574d8bead2c3b5ecc257d0f05.

Aravena D. 2013. *Desarrollo de metodología para la estimación de potencial geotérmico explotable en la Región del Maule, Zona Volcánica Sur, Chile*. Santiago, Chile : s.n., 2013.

Biblioteca del Congreso de Chile. Biblioteca del Congreso de Chile. [En línea] www.BCN.cl.

Bosca. 2013. [En línea] 11 de Noviembre de 2013. www.bosca.cl.

CDT. 2011. *Estudio de Usos Finales y Curva de la Oferta de la Conservación de la Energía en el Sector Residencial*. 2011.

CENMA. 2008. *Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en las Comunas de Temuco y Padre Las Casas*. Temuco : s.n., 2008.

—. **2010.** *Actualización del Inventario de Emisiones de Temuco y Padre Las Casas*. Santiago : s.n., 2010.

CNE. 2009. *Caracterización preliminar del mercado de energías renovables en Chile para aplicaciones industriales y comerciales no eléctricas*. 2009.

Departamento de energía y cambio climático, Reino Unido. 2013. Policy Increasing the use of low-carbon technologies. *Gobierno del Reino Unido*. [En línea] 2013. <https://www.gov.uk/government/policies/increasing-the-use-of-low-carbon-technologies/supporting-pages/renewable-heat-incentive-rhi>.



- Dictuc. 2008.** *Estudio diagnóstico plan de gestión de calidad del aire VI Región.* Santiago : s.n., 2008.
- Dirección Meteorológica de Chile, Departamento de Climatología y Meteorología. 2001.** *Climatología Regional.* 2001.
- District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. Rezaie, Behnaz y Rosen, Marc. 2012.** 2012, Applied Energy, Vol. 93, págs. 2-10.
- Eisentraut, Anselm. 2013.** Agencia Internacional de Energía (AIE). [En línea] 5 de Abril de 2013. [Citado el: 3 de Enero de 2014.] http://www.iea.org/media/training/presentations/Day_2_Renewables_4_Heat.pdf.
- Enviromodelling Ltda. 2009.** *Análisis de Emisiones Atmosféricas en Coyhaique.* 2009.
- Enviros Consulting Ltd. 2008.** *Barriers to Renewable Heat.* 2008. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/42956/1_20090501125156_e____1ExecutiveSummaryv10.pdf.
- EPA. 2012.** *US EPA AP-42 1.6 Open Combustion, Wood Residue Combustion in Boilers.* 2012.
- Euroheat & Power. 2013.** *Heat Roadmap Europe.* 2013.
- Fridleifsson, Ingvar B. 1998.** *Direct use of geothermal energy around the world.* 1998.
- Gawell K., Bates D. . 2004.** *Geothermal Literature Assessment: Environmental Issues.* Washington, D.C. : s.n., 2004.
- Geofísica Universidad de Chile. 2012.** Explorador de Energía Eólica. [En línea] 2012. [Citado el: 15 de Noviembre de 2013.] <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>.
- . **2012.** Explorador de Energía Solar. [En línea] 2012. [Citado el: 15 de Noviembre de 2013.] <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>.
- GEOHERMAL DISTRICT HEATING IN REYKJAVÍK, ICELAND. Gunnlaugsson, Einar. 2004.** 2004. International Geothermal Days POLAND 2004.
- Grupo Bera. 2011.** *La Microcogeneración con Biomasa.* 2011.
- IEA. 2012.** *Energy Technology Perspectives 2012.* 2012.
- . **2011.** *Technology Roadmap - Energy Efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment.* 2011.
- IEA-ETSAP-IRENA. 2013.** *Heat Pumps Technology Brief.* 2013.
- IIASA. 2014.** Fuel combustion in stationary sources. [En línea] 24 de Abril de 2014. <http://www.iiasa.ac.at/~rains/PM/docs/documentation.html>.
- INE.** [En línea] [Citado el: 21 de Octubre de 2013.] <http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KCOM&MAIN=WebServerMain.inl>.
- . **2013.** *Demográficas y Vitales - Productos Estadísticos.* [En línea] 2014 de 01 de 2013. http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php.
- . **2006.** *Encuesta CASEN 2006.* 2006.
- . **2013.** *RESULTADOS XVIII CENSO DE POBLACIÓN 2012.* 2013.
- INFOR. 2004.** *Propuesta de una Metodología para el Estudio de la Demanda de Leña en Coyhaique y Puerto Aysén.* Santiago : s.n., 2004.



- Instituto de Normalización.** *Norma Chilena NCh 1079 Of. 77: Arquitectura y Construcción - Zonificación Climático Habitacional para Chile y Recomendaciones para el Diseño Arquitectónico.* —. 2011. *Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP2,5.* Santiago : s.n., 2011.
- John O'Ryan Surveyors S.A.** 2011. *Estudio Comparación de Precios y Calidad de la Leña en Época de Invierno en Valdivia, Temuco y Gran Concepción.* Santiago : s.n., 2011.
- Lahsen A.** 2006. *Desarrollo de la Energía Geotérmica en Chile.* Octubre de 2006.
- MAPS.** 2013. *Escenario Línea Base de Emisiones de GEI del Sector Comercial, Público y Residencial, Fase 1 Proyecto MAPS - Fundación Chile.* Santiago : s.n., 2013.
- MINENERGIA, GEF, PNUD CDT.** 2010. *Sistemas Solare Térmicos II.* Santiago : s.n., 2010.
- NASA.** NASA Surface meteorology and Solar Energy: Daily Averaged Data. *NASA Surface meteorology and Solar Energy: Daily Averaged Data.* [En línea] [Citado el: 25 de Octubre de 2013.] <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/daily.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>.
- National Renewable Energy Laboratory.** PVWatts Calculator. [En línea] [Citado el: 04 de Noviembre de 2013.] <http://pvwattsbeta.nrel.gov/>.
- Observatorio Habitacional MINVU.** Permisos de Edificación, Permisos por sistema de agrupamiento y comuna 2002-2012. [En línea] [Citado el: 21 de Octubre de 2013.] http://www.observatoriahabitacional.cl/opensite_20080122171157.aspx.
- OMNI Environmental Services Inc.** 2005. *PM2.5 Emission Reduction Benefits of Replacing Conventional Uncertified Cordwood Stoves with Certified Cordwood Stoves or Modern Pellet Stoves.* Estados Unidos : s.n., 2005.
- Pacific Tool.** 2013. [En línea] 11 de Noviembre de 2013. http://pacifictoolcompany.com/index.php?main_page=index&cPath=120_180_183.
- Piensa en Geotermia.** Piensa en Geotermia. [En línea] [Citado el: 01 de Noviembre de 2013.] <http://piensageotermia.com/archives/17278>.
- Poyry.** 2009. *The potential and costs of district heating systems.* Oxford : s.n., 2009.
- PPEE.** 2009. *Encuesta Industrial de demanda y eficiencia energética.* 2009.
- PROGEA.** 2013. *Estudio de caracterización del uso de nuevas tecnologías de calefacción basadas Pellets de madera .* Santiago : PROGEA, 2013.
- Q. Ma, Elsevier – Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 2008. *A review on transportation of heat energy over long distance: Exploratory Development.* 2008.
- RETSscreen.** 2005. *Ground-Source Heat Pump Project Analysis.* 2005.
- . 2012. Heating Project Load and Energy Calculation. [En línea] 29 de Agosto de 2012. [Citado el: 14 de Noviembre de 2013.] http://www.retscreen.net/ang/heating_project_load_and_energy_calculation.php#a5.
- . 2013. <http://www.retscreen.net>. *RETSscreen International.* [En línea] 14 de Noviembre de 2013. <http://www.retscreen.net>.
- . 2005. *RETSscreen Biomass Heating Project.* 2005.



- Revista Electricidad. 2013.** Revista Electricidad. [En línea] 14 de Junio de 2013. [Citado el: 27 de Marzo de 2014.] <http://www.revistaei.cl/2013/06/14/uc-presento-el-atlas-solar-de-chile-2013-2/>.
- Saldivia, Miguel. 2011.** *Barreras de entrada a la geotermia en Chile*. Santiago : s.n., 2011. Tesis.
- . **2011.** *Taller de Memoria: Instrumentos para la Elaboración de una Política Eenergética Sustentable*. 2011.
- SINCA, Ministerio de Medio Ambiente.** Sistema Nacional de Calidad del Aire. [En línea] [Citado el: 16 de Septiembre de 2013.] <http://sinca.mma.gob.cl/>.
- SolEnergy. 2013.** [En línea] 11 de Noviembre de 2013. <http://www.solenergy.cl/>.
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles. 2010.** SEC. SEC. [En línea] 26 de Mayo de 2010. [Citado el: 20 de Enero de 2014.] http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/PRODUCTOS/COLECTORES_SOLARES/RES_REGISTROS_CST.PDF.
- . **2012.** SEC. SEC. [En línea] 16 de mayo de 2012. [Citado el: 27 de Marzo de 2014.] http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/LENA/LEY_20586_2012.PDF.
- Technical Committee CEN/TC 228 “Heating systems in buildings”.** *Heating systems in buildings, Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies, Part 4-6 Space heating generation systems, the performance of other renewables heat and electricity*.
- UCT. 2009.** *Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas de Concepción Metropolitano VIII Región*. Temuco : s.n., 2009.
- ULLOA P., CONTRERAS C.G., COLLADOS. 2010.** *Medidas costo-efectivas para reducir la contaminación del aire generada por la combustión de leña en ciudades del sur de Chile*. 2010.
- Universidad Austral de Chile. 2013.** *Explorador de Bioenergía Forestal*. 2013.
- Universidad Austral. 2013.** Noticias Universidad Austral. [En línea] 25 de Octubre de 2013. [Citado el: 27 de Marzo de 2014.] <http://noticias.uach.cl/principal.php?pag=noticia-externo&cod=65207>.
- Universidad de Concepción. 2013.** *Evaluación de soluciones tecnológicas térmicas y eléctricas, marco regulatorio e instrumentos*. 2013.