



**ELECTRIFICACIÓN DE LA LEÑA EN EL SUR DE CHILE:  
EFECTOS EN EL GASTO Y EN LA POBREZA ENERGÉTICA DE LOS  
HOGARES**

**ACTIVIDAD FORMATIVA EQUIVALENTE PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN POLÍTICAS PÚBLICAS**

**Alumno: Alejandro Andrés Navarro Espinosa  
Profesor Guía: Óscar Landerretche**

**Santiago, junio de 2022**

<b>Electrificación de la leña en el sur de Chile: Efectos en el gasto y en la pobreza energética de los hogares</b>	
<b>Contenido</b>	<b>Resumen</b>
<u>Introducción</u>	El uso de leña para calefacción se encuentra masificado en el sur del país, provocando niveles de material particulado por sobre las normativas internacionales y nacionales, afectando la salud de la población. Para resolver este problema, una de las alternativas posibles es la electrificación de la leña, esto es, suministrar los mismos requerimientos de calor a través de electricidad mediante el uso de bombas de calor, buscando aprovechar el aumento de energías renovables en la matriz de generación y evitando con ello, el uso de combustibles fósiles para el reemplazo de la leña. Sin embargo, al tratarse de un energético de mayor costo que la leña, esta solución puede tener un impacto significativo en el gasto de los hogares.
<u>Antecedentes generales</u>	Para determinar tales impactos, se construyeron perfiles de energía asociados al calor de la leña a nivel mensual para cada nivel socioeconómico y para las cuatro zonas térmicas del sur del país (desde O'Higgins a Magallanes). Dichos perfiles, fueron transformados a consumo de electricidad considerando vectores de temperaturas y curvas de eficiencia de bombas de calor reales. Luego, los consumos eléctricos fueron valorizados usando como referencia las tarifas residenciales de una ciudad representativa por zona térmica, estas fueron Concepción, Temuco, Puerto Montt y Coyhaique. Finalmente, el gasto de las familias por electrificar el calor fue determinado y con ello sus niveles de pobreza energética.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Requerimientos de calor en Chile</li><li>• Fuentes de Energía</li><li>• Pobreza Energética</li></ul>	Los resultados muestran que, de electrificar la leña en el corto plazo, al menos un millón de hogares (aprox. 3.3 millones de personas) destinarían durante al menos 6 meses del año más del 10% de sus ingresos (i.e., condición de pobreza energética) a satisfacer sus requerimientos de energía, llegando a valores superiores al 30% durante los meses de invierno para los niveles socioeconómicos más vulnerables.
<u>Metodología</u>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Identificación del calor a electrificar</li><li>• Determinación de la electricidad requerida</li><li>• Efecto en el gasto y pobreza energética</li></ul>	
<u>Conclusiones</u>	
<u>Bibliografía</u>	
<u>Anexos</u>	

## 1. Introducción

El calentamiento global es probablemente el mayor problema que enfrenta nuestra sociedad, no existiendo dudas sobre su origen antropogénico [1]. El Panel Intergubernamental por el Cambio Climático señala que de no hacer nada, la temperatura promedio de la tierra podría incrementarse en 4°C hacia finales de siglo (sobre los niveles preindustriales), lo que implicará la extinción de especies, inseguridad alimentaria y pocas posibilidades de adaptación [2], esto puede ser evitado si se toman medidas de control de emisiones que limiten el alza de la temperatura promedio a 2°C [3]. En el contexto local, a este desafío global, se suma el hecho del alto uso de leña en el centro y sur de Chile [4]. Si bien, la leña es considerada carbono neutral (bajo el supuesto de la existencia de planes de manejo adecuados) es altamente contaminante en material particulado [5], por lo que, para evitar tales emisiones, el paso a combustibles podría sonar lógico y no tan costoso, sin embargo, tales opciones fósiles deberían ser evitadas producto de la urgencia de la crisis climática. No obstante, se debe tener presente que las emisiones que provocan el calentamiento global provienen mayoritariamente de un conjunto acotado de países (por ejemplo, en 2017 [6] los mayores contribuyentes fueron<sup>1</sup>: 30% China, 15% Estados Unidos, 9% la Comunidad Europea, 7% India y 5% Rusia) y que por tanto, la contribución de países más pequeños como Chile es poco significativa en este contexto global. Esto último, no implica que Chile no deba tomar acciones al respecto, sino que debe evaluar en su justa

<sup>1</sup> Es interesante destacar que, si se consideran las emisiones acumuladas en el periodo de industrialización desde 1850 a la fecha, el principal contribuyente al cambio climático es Estados Unidos, 20.3%, seguido por China, 11.4%, y Rusia, 6.9% (<https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>)

medida, cual es la mejor alternativa que permite disminuir el material particulado asociado a la combustión de la leña y que a su vez permite cumplir los compromisos medioambientales adquiridos con la comunidad internacional.

Así, junto con un potencial cambio desde la leña a combustibles fósiles tales como parafina, gas licuado de petróleo y gas natural, también se pueden analizar mejoras en los procesos de combustión de la leña y mejoras en la aislación de viviendas con tal de minimizar el uso de este combustible. Otra alternativa posible para este desafío y que presenta un menor nivel de emisiones relacionadas con el cambio climático es la electrificación del calor, la cual corresponde al objeto de estudio del presente trabajo.

En particular, la presente investigación busca proporcionar evidencia sobre ¿Cuál es el efecto de la electrificación del calor como reemplazo de la leña en el gasto de las familias del sur de Chile? Esta pregunta nace para contrastar la idea instalada fuertemente en el país que señala que los problemas de emisiones se pueden resolver mayoritariamente a través de la electrificación, esto gracias a la adopción creciente de energías renovables no convencionales en nuestra matriz eléctrica. Esta visión es compartida por gremios y autoridades, tanto porque promueve nuevas inversiones como por sus evidentes beneficios medioambientales. No obstante, tal visión debe ser analizada bajo una lógica cuantitativa, ya que un aumento del consumo eléctrico producto de la electrificación del calor de la leña y su correspondiente aumento de pago, podría llevar a muchas familias a aumentar considerablemente el gasto de calefacción y con esto elevar los niveles de pobreza energética o incluso dejar de calefaccionar sus hogares en forma adecuada, empeorando su calidad de vida [7] y aumentando la probabilidad de enfermedades [8].

Consecuentemente, resulta crucial establecer los efectos de la electrificación del calor de la leña en el gasto de las familias y con ello alimentar el debate público, de manera que se analice si ésta es la mejor forma de reemplazar la leña y por tanto se estudien políticas públicas adicionales para proteger a la población más vulnerable, o se usen los resultados de esta investigación para compararlos con otras alternativas de reemplazo y así determinar e implementar aquellas que sean más costo efectivas.

El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 presenta los antecedentes generales y principales definiciones, luego la sección 3 indica la metodología y sus correspondientes resultados. Finalmente, en la sección 4 se indican las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de este trabajo.

## 2. Antecedentes generales

En esta sección se discuten elementos claves para entender la problemática asociada al reemplazo de la leña, estos son: i) entender los requerimientos de calor del país y la relevancia de la leña para satisfacerlos, ii) conocer el contexto energético que permite comprender por qué puede ser una buena idea electrificar el calor y iii) entender el concepto de pobreza energética y sus implicancias, para considerarlo al analizar una eventual electrificación de la leña.

### 2.1 Requerimientos de Calor en Chile

Si bien la discusión pública está mayoritariamente centrada en la producción, transporte y consumo de electricidad, tanto por sus implicancias para el gasto como por su interacción con el medio ambiente, ésta no es la única fuente de energía que se utiliza para satisfacer los requerimientos de la sociedad. Específicamente, los requerimientos energéticos totales de Chile para el año 2019 fueron suministrados principalmente por derivados del petróleo, seguidos de electricidad y leña, tal como se puede apreciar en la Figura 1. De este gráfico, llama la atención el alto uso de biomasa, combustible que tradicionalmente está relacionado con estadios iniciales de desarrollo económico [9], el cual se define en el Balance Nacional de Energía [10], como “*materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma*”, que puede ser obtenida de la recolección directa en bosques, de los residuos derivados de la construcción, de plantaciones dedicadas a la producción de la leña y de residuos de la industria forestal. Los principales usuarios de esta biomasa corresponden al sector industrial y al sector residencial, representando, respectivamente, el 52% y 47% del consumo durante 2019 [10].



Figura 1: Requerimientos totales de Energía por tipo de suministro – Chile 2019 [10]

En el caso de los hogares de Chile, el uso de leña satisface principalmente los requerimientos de calor (sólo un 5.4% de los hogares cocina aún con leña [11]) y constituye un uso relevante del total del consumo de las viviendas. En particular, el sector residencial satisface el 38% de sus requerimientos totales de energía a partir de biomasa/leña, superando al suministro de electricidad (promedio de 25%) [10]. De esta manera, producto de las diferencias climáticas de Chile, es de esperar que tal promedio provenga de un bajo consumo en el norte y un alto consumo en el sur, situación consistente con la adopción de leña en Chile como se observa en la Figura 2. En ella se indica que el porcentaje de viviendas que consumen leña del total de viviendas de la región es inferior al 7% en la zona norte (regiones I a IV) y alcanza valores superiores al 90% en las regiones de los Ríos, los Lagos y Aysén (regiones XIV, X y XI, respectivamente). Magallanes, aunque de clima frío, no presenta una adopción relevante de leña, lo que se debe al bajo precio del gas en dicha zona, producto de subsidios que son específicos a la región.

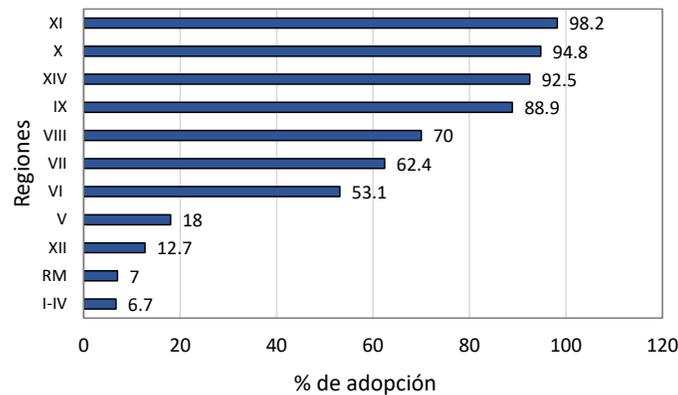


Figura 2: Porcentaje de viviendas con adopción de leña por región [11]

La gran adopción de leña presente en Chile se debe a factores culturales [12] (ej., la idea instalada de que la leña calienta más), a la gran disponibilidad del recurso en el sur del país (oferta del bien) y a su bajo precio en comparación a otros energéticos [11]. Aunque el bajo costo de la leña es beneficioso para muchas familias, es importante señalar que este tipo de provisión de calor puede traer problemas a la salud [13], siendo el problema fundamental la emisión de material particulado, que corresponde a una mezcla de partículas sólidas y líquidas en suspensión que dado su pequeño tamaño (menores a  $10\ \mu\text{m}$ ) no se depositan en la superficie de la tierra por efecto de la gravedad [14] y que por tanto pueden ser absorbidas por las vías respiratorias y torrente sanguíneo causando enfermedades. Entre estas partículas se distingue el material particulado 10 ( $\text{PM}_{10}$ ) cuyo diámetro aerodinámico es menor o igual a  $10\ \mu\text{m}$  y el material particulado 2.5 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) cuyo diámetro aerodinámico es menor o igual a  $2.5\ \mu\text{m}$  [14].

Es importante mencionar que el material particulado no sólo influye en la contaminación de la ciudad sino que también permanece al interior del hogar (contaminación intradomiciliaria) ya sea por los mismos procesos de combustión (ej., cocina, calefacción) o por infiltración de partículas desde el exterior al interior del hogar [15]. En efecto, en [5] se muestra como los niveles de  $\text{PM}_{2.5}$ , para una muestra representativa de hogares de Temuco, son similares cuando se comparan las mediciones entre el interior y exterior de dichas viviendas.

Existe evidencia significativa respecto a que el alto contenido de material particulado puede provocar enfermedades cardiovasculares y casos de cáncer [13]. Así, la Organización Mundial de la Salud, OMS, estima que la contaminación intradomiciliaria aumenta al doble el riesgo de neumonía y otras enfermedades respiratorias en niños y niñas menores de 5 años [16]. La misma OMS estima que cerca de 1.3 millones de personas mueren al año por

enfermedades atribuibles a contaminación intradomiciliaria [17]. De hecho, durante el año 2008, hubo en el mundo, más personas fallecidas producto de contaminación intradomiciliaria que de malaria y tuberculosis [9].

En el caso de Chile, se estima que se producen al año cerca de 4000 muertes prematuras producto del alto nivel de material particulado [18]. Estas emisiones están sobre las recomendaciones de la OMS, la cual sugiere que la concentración promedio diaria de material particulado, medida en microgramos por metro cúbico, no sobrepase los  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$  y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , esta métrica se construye para el percentil 99<sup>th</sup> de los días del año, lo que significa que para su cumplimiento, el 99% de los días debe tener un valor menor o igual al estándar señalado [14]. Por su parte, la norma chilena es menos restrictiva, estableciendo estos valores en  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{2.5}$  [19] y en  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  [20], los que se deben cumplir el 98% (percentil 98<sup>th</sup>) de los días del año [19] [20].

A modo de ejemplo y para visualizar su no cumplimiento, en la Figura 3 se presentan los registros de  $\text{PM}_{2.5}$  para la comuna de Padre Las Casas en Temuco y para la ciudad de Coyhaique. Estos datos fueron extraídos del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA [21], para el año 2021. Donde es posible observar que los promedios diarios para ambas localidades están por sobre el nivel recomendado por la OMS y por sobre la normativa nacional. En efecto, para el caso de Padre Las Casas durante el año 2021 hubo 171 días en que no se cumplió la recomendación de la OMS y 81 días en que no se cumplió la normativa nacional. En el caso de Coyhaique estos valores fueron de 133 y 62 días para la recomendación OMS y para el límite local, respectivamente. Estos valores son consistentes con los determinados en [18], donde al analizar el período 2007-2014 para múltiples ciudades de Chile, se encontró que muchas de ellas superaban los 120 días de incumplimiento con respecto al límite de la OMS, estas ciudades fueron Rancagua, Rengo, Curicó, Talca, Chillan, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno, Puerto Montt y Coyhaique [18].

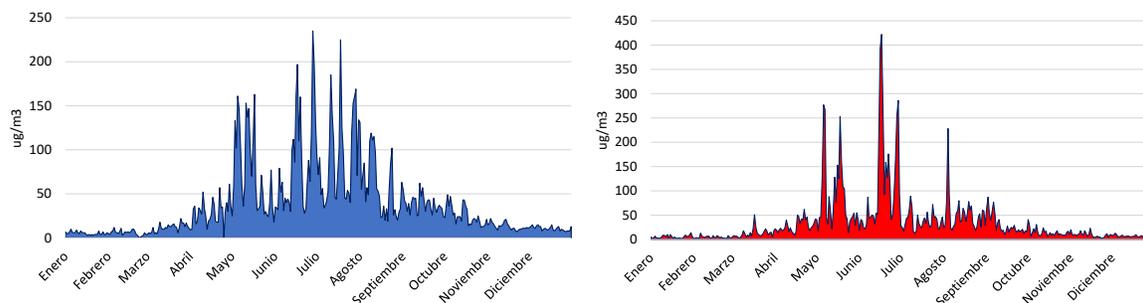


Figura 3: Concentración promedio diaria – Estación Padre Las Casas II (izquierda) y Coyhaique (derecha) año 2021 [21]

Los ejemplos anteriores muestran la urgencia de generar políticas públicas que busquen disminuir las emisiones de material particulado asociadas al uso de leña para calefaccionar las viviendas del sur del país.

## 2.2 Fuentes de Energía: Contexto Global y Local

Para entender por qué la electrificación es vista como una alternativa factible para el reemplazo de la leña, se debe tener presente cuál es el contexto actual del consumo de energía en Chile y el Mundo. Lamentablemente, en las últimas décadas, la participación de los combustibles fósiles en el suministro de los requerimientos totales de energía del planeta (i.e., electricidad, calor, transporte, industria, etc.) se ha mantenido cercana al 80% [22]. Incluso en el año 2020, caracterizado por altos niveles de confinamiento debido a la pandemia y por tanto menores requerimientos de transporte, se tuvo una participación del 29% de petróleo, 24% de gas natural y 26% de carbón, totalizando 79% de la energía consumida (como referencia, el año 2019, éste total llegó a 84% compuesto por 33%, 27% y 24% para petróleo, carbón y gas, respectivamente [23]).

En este contexto de una alta participación de combustibles fósiles, existe amplio consenso en que parte de la solución podría encontrarse en la electrificación del consumo, esto significa que requerimientos de energía que a la fecha son suministrados directamente por combustibles fósiles (ej., transporte y calor) pasen a ser suministrados mediante electricidad. Esta idea se sustenta en que producto de la adopción creciente de energías renovables para la producción de electricidad, existe un menor uso de combustibles fósiles, provocando que la generación eléctrica sea

más limpia. De hecho, en 2020 sólo el 61% de la generación de electricidad a nivel mundial provino de combustibles fósiles [22], cifra menor al 79% si se considera la energía total. La Agencia Internacional de Energía estima que la producción de electricidad irá dejando el uso de combustibles fósiles para llegar a 36% el 2030 y a 4% el 2050 [22].

Por su parte, en Chile, la producción de electricidad por medios renovables también ha ido en aumento, con niveles mayores al promedio mundial. Así, durante el año 2022, el 46% de la electricidad provino de fuentes renovables<sup>2</sup> mientras que el 54% lo hizo desde combustibles fósiles [24]. Se debe destacar el progresivo aumento que ha tenido la energía solar y eólica, pasando de niveles cercanos a 0% el 2007 a 22% de la generación en 2021 [24], crecimiento que se espera se mantenga y ayude a disminuir el uso de combustibles fósiles en la matriz eléctrica nacional.

Es por las razones aquí planteadas, que la electrificación del calor se ve con esperanzas, toda vez que se podría reemplazar la leña no por combustibles fósiles (ej., parafina, gas natural, gas licuado de petróleo) sino que, por electricidad, la que se será cada vez menos contaminante. Sin embargo, este proceso de reemplazo puede encarecer el suministro de calor ya que la electricidad es un energético de mayor costo, pudiendo generar aumento en el gasto de las familias y/o disminución de los requerimientos de calor que pueden ser satisfechos, aumentando los niveles de pobreza energética de los hogares, concepto que será detallado a continuación.

### 2.3 Pobreza Energética

En términos generales, el concepto de pobreza energética se refiere a dos dimensiones. La primera asociada principalmente a países no desarrollados, está vinculada con el acceso, definiéndola como la ausencia de acceso a electricidad y la dependencia de biomasa para cocinar [9], por ejemplo, al año 2012 existían cerca de 1300 millones de personas sin acceso a electricidad y 2700 millones que usaban biomasa para satisfacer sus necesidades básicas de energía [13]. Mientras que la segunda dimensión se refiere a la calidad y suficiencia de los recursos energéticos, definiéndola como la ausencia de oferta en el acceso a servicios energéticos de calidad, confiables, seguros, adecuados, económicos y sustentables para garantizar el desarrollo económico y humano de la población [25].

Así, una vez que los países aumentan sus niveles de electrificación, la pobreza energética pone el acento en la calidad del acceso y en sus costos asociados, consistente con esto y considerando que en Chile más el 99% de los hogares tiene acceso a suministro eléctrico [26], la Red de Pobreza Energética señala que un *“hogar se encuentra en situación de pobreza energética cuando no tiene acceso equitativo a servicios energéticos de alta calidad para cubrir sus necesidades fundamentales y básicas, que permitan sostener el desarrollo humano y económico de sus miembros. Las necesidades fundamentales son aquellas que implican impactos directos en la salud humana; mientras que las necesidades básicas corresponden a aquellos requerimientos energéticos cuya pertinencia depende de las particularidades culturales y territoriales”* [27].

Estas definiciones más complejas y multidimensionales no son fácilmente traducibles a un indicador de pocas variables y por esto una multiplicidad de indicadores de pobreza energética están disponibles [28], sin perjuicio de esto, una dimensión clave y común a todos, tiene que ver con el gasto de las familias para satisfacer sus requerimientos energéticos. En efecto, la primera vez que se utilizó el concepto de pobreza energética<sup>3</sup> fue hace casi 30 años en Reino Unido por Brenda Boardman [29], definiendo que una familia está en condiciones de pobreza energética si emplea más del 10% de sus ingresos en satisfacer sus requerimientos de energía [30].

Se debe tener presente que el concepto de pobreza energética, al estar relacionado con un sector específico de la economía, representa necesariamente una mirada parcial a la realidad de los hogares, puesto que no se refiere a la capacidad de gasto total de dicho hogar, y con esto, medidas destinadas a eliminar la pobreza energética de un hogar podrían terminar siendo contraproducentes desde una perspectiva global. Por un lado, se podrían malgastar recursos al tratar de reducir la pobreza energética en aquellos hogares que en términos globales no están en condiciones de pobreza y que incluso podrían pertenecer a sectores medios o altos de la población. Por otro lado, podría haber familias invisibilizadas a través de una métrica de gasto, ya que hogares muy pobres podrían decidir no gastar más

<sup>2</sup> Esta cifra agrupa la generación renovable no convencional (eólica, solar, geotérmica, mini hidro) e hidráulica de gran tamaño.

<sup>3</sup> Por precisión, es necesario señalar que el término empleado en dicho estudio fue “Fuel Poverty”.

del 10% de sus ingresos en energía para poder destinarlos a necesidades vitales no satisfechas, quedando entonces, fuera del radar de la autoridad.

En este sentido, la medición de pobreza energética debe ser considerada como una alerta a la hora de discutir políticas públicas en el ámbito de energía, pero en ningún caso la única alerta, sino que otras variables también deben ser incorporadas a la discusión, tales como, niveles de ingreso de los hogares, gastos en otras necesidades básicas, gasto agregado, considerando también, los efectos redistributivos de las medidas a implementar. En ningún caso, sobrepasar la métrica de pobreza energética debe significar tomar medidas instantáneas que mantengan a todo evento el valor bajo un determinado umbral (el cual por construcción siempre será arbitrario o al menos fruto de una decisión política), sino que por el contrario, sobrepasar el umbral debe ser una invitación para incorporar el debate en la agenda pública, analizar el asunto, determinar si se está frente a un problema y en caso de estarlo proponer las políticas públicas correspondientes. Es importante mencionar que la mejor medida a implementar no será necesariamente aquella que deje a todos los consumos bajo el umbral, sino que aquella que, haciendo uso eficiente de los recursos limitados, permita una redistribución real de bienestar entre los miembros de la sociedad, por ejemplo, a través del uso de la curva de Lorenz y del coeficiente de Gini para su análisis [31].

Teniendo en cuenta las limitaciones previamente señaladas, y entendiendo que este índice es una cota inferior de indicadores más complejos, se utilizará esta métrica con el sólo propósito de tener un marco referencial preliminar para entender como los niveles de pobreza energética se podrían ver afectados debido al reemplazo del calor de la leña por electricidad y con esto plasmar la importancia de incluir esta problemática en el debate público.

Se debe considerar que un aumento significativo en el gasto puede llevar a que algunos hogares decidan dejar de calefaccionar sus viviendas en forma adecuada, situación que ya se observa en la ciudad de Santiago, donde satisfacer los requerimientos de calor tiene un costo mayor, producto de la prohibición del uso de la leña y su imposibilidad práctica en zonas más densas (departamentos). De hecho, en [32] se muestra que la temperatura promedio durante 2017, para los tres meses de invierno para una muestra de hogares de la ciudad de Santiago, fue de 18.8°C, 18.0°C, 16.9°C, 14.8°C y 14.2°C para las comunas de Vitacura, Las Condes, Ñuñoa, Puente Alto y Maipú, respectivamente [32], mostrando que comunas de mayores ingresos, sujetas al mismo clima, presentan temperaturas al interior de la vivienda mayores que aquellas de comunas de menores ingresos. Incluso en Valdivia, donde casi la totalidad de las viviendas utilizan leña, se ha observado que hogares de menores ingresos presentan déficit de calefacción [33].

Los datos anteriores muestran que no todos los hogares alcanzan la temperatura mínima de confort recomendada por la OMS, dada por 18°C [34] y considerada como un buen balance para proteger la salud general de la población durante las estaciones frías [34]. Esto significa, que existen hogares en Chile que se calefaccionan por debajo de los niveles requeridos y por tanto pueden enfrentar problemas de salud adicionales en comparación a aquellos que sí logran hacerlo de forma adecuada. Entre las principales complicaciones de salud, que se ven favorecidas en viviendas con ambientes fríos y húmedos, destacan bronquitis y asma. También se debe señalar que existe evidencia respecto a un aumento de la tasa de muertes en invierno en comparación a verano, mayoritariamente en países templados (Reino Unido, Nueva Zelanda, Portugal, España) que en países más fríos [30], probablemente por la menor aislación de las viviendas en el primer grupo. Situación consistente con una mayor tasa de hospitalizaciones en invierno en países con bajos estándares de aislación térmica [30]. La población más afectada corresponde a adultos mayores, quienes en condiciones interiores de bajas temperaturas (menores a 16°C) son más proclives a contraer enfermedades respiratorias, y que en temperaturas aún menores (por debajo de 12°C) pueden presentar aumentos en la presión arterial que deriven en ataques cardíacos y derrames [8]. Por lo tanto, es posible observar que solucionar los problemas de material particulado no puede ser a expensas de la calefacción de los hogares, siendo este dilema un antecedente a considerar en el diseño de las políticas públicas correspondientes [7].

### 3. Metodología

Antes de comenzar, se debe tener presente, que la electrificación del calor es sólo una de las alternativas posibles para la disminución del material particulado y que existen otras opciones tales como: uso de gas natural licuado, utilización de parafina, mejoras en el proceso de combustión de la leña [7] y mejoras en la aislación de viviendas que

redunda en menores requerimientos de energía [35] y por ende en un menor consumo de leña, entre otros. Por lo tanto, la autoridad debe analizar cada una de estas alternativas para determinar el curso de acción más apropiado.

Para alimentar dicho proceso de análisis en este trabajo se analiza el gasto extra que significaría el reemplazo del calor de la leña por electricidad. Para ello se realizarán tres etapas, primero se determinará la cantidad de calor que debe ser electrificado, esto es, la cantidad de calor que hoy es suministrada desde la combustión de la leña, luego de ello se estimará la cantidad de electricidad necesaria para proveer dicho calor. Posteriormente, se debe determinar, en función de las tarifas eléctricas residenciales, el costo de esta energía eléctrica y así estimar el impacto que tal costo adicional representa en el gasto de los hogares y en su condición de pobreza energética. En las siguientes secciones se detallará cada una de estas etapas.

### 3.1 Identificación del calor a electrificar

Como ha quedado de manifiesto a lo largo del documento, el uso de leña en Chile es relevante para satisfacer los requerimientos de calor y se intensifica hacia el sur del país. Es por esta razón que el análisis cuantitativo de este capítulo se concentrará en el territorio comprendido entre la región del Libertador Bernardo O’Higgins y la región de Magallanes, dejando fuera la macrozona norte, debido al bajo consumo de calefacción, y al centro del país, debido a la prohibición de uso de leña en la provincia de Santiago más las comunas de San Bernardo y Puente Alto [36]. Específicamente, se analizarán las zonas térmicas 4, 5, 6 y 7 de acuerdo con la clasificación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, taxonomía utilizada en el último estudio disponible respecto al uso de la energía de los hogares en Chile [37]. Para tener una referencia geográfica de estas zonas, en la Tabla 1 se presentan algunas de las ciudades contenidas en cada una de ellas.

Tabla 1: Ciudades de referencia para zonas térmicas en análisis

Zona Térmica	Ciudades de referencia
Zona Térmica 4 – ZT1	Curicó, Linares, Talca, Los Ángeles, Concepción, Coronel, Angol.
Zona Térmica 5 – ZT1	Freire, Temuco, Villarrica, Osorno, Corral, Los Lagos, Valdivia.
Zona Térmica 6 – ZT1	Pucón, Ancud, Castro, Puerto Montt, Puerto Varas.
Zona Térmica 7 – ZT1	Aysén, Chile chico, Coyhaique, Puerto Natales, Porvenir, Punta Arenas.

Producto de la informalidad del mercado de la leña a nivel de consumidores residenciales, no es posible obtener el consumo desde su facturación. Por esta razón, se deben emplear fuentes indirectas, por ejemplo, a través de encuestas. Afortunadamente, en el año 2010 se realizó por primera vez un estudio de caracterización del consumo de energía de los hogares en Chile [38], el cuál fue realizado nuevamente el año 2018 [37], este último estudio consistió en el levantamiento de datos representativos a partir de la realización de una encuesta presencial de cobertura nacional, buscando recoger resultados que estimen de buena manera a todas las viviendas del país, según zona térmica y nivel socio económico. Para este objetivo, se realizaron 3500 entrevistas completas, que permiten estimaciones de requerimientos energéticos con un 95% de confianza y con un error máximo de +/- 5% para la totalidad de viviendas del país [37]. La base de datos asociada a tales entrevistas [39] ha sido puesta a disposición de la comunidad por parte del Ministerio de Energía y será a partir de ella que se construirán los requerimientos de calor que a la fecha son suministrados por leña en las 4 zonas térmicas bajo análisis.

A partir de esta base de datos y gracias a que los registros (viviendas<sup>4</sup>) están caracterizados por nivel socioeconómico, es posible determinar el consumo promedio de calefacción<sup>5</sup> por zona térmica, ZT, y nivel socioeconómico, NSE, valores que se presentan en la Tabla 2. Se observa que para todas las zonas térmicas, el estrato alto consume más que el nivel socioeconómico más bajo, posiblemente, porque estos últimos no se logran calefaccionar adecuadamente, en tanto que los grupos medios, C2 y C3, también consumen más energía que los estratos más bajos

<sup>4</sup> El parque de viviendas al momento de la encuesta (2018) era de aproximadamente 6.280.475 [37].

<sup>5</sup> Sólo se consideran viviendas con calefactores individuales sin considerar viviendas con calefacción centralizada, puesto que éstas sólo representan el 2.4% de la población, lo que significó contar con menos de 30 registros de este tipo por ZT en la encuesta, impidiendo señalar la representatividad de los datos [37].

(D-E), con la distinción que en algunas zonas consumen incluso más que el estrato C1, lo cual podría estar relacionado con los niveles de aislación de los hogares, ya que una mejor aislación conlleva a menores requerimientos de calor.

Tabla 2: Consumo promedio anual por vivienda por zona térmica y nivel socio económico - construido desde [39]

NSE	ZT4 [kWh]	ZT5 [kWh]	ZT6 [kWh]	ZT7 [kWh]
C1	7371.5	16531.8	22231.3	17936.8
C2	8952.2	14365.1	21570.2	17459.4
C3	8100.3	12428.6	24303.8	16171.7
D-E	6540.5	11663.2	20022.0	17716.4
<b>Ponderado</b>	<b>7216.9</b>	<b>12455.7</b>	<b>21405.1</b>	<b>17429.3</b>

Para comprender la representatividad de la encuesta, en la Tabla 3 se indica el número de hogares asociados a cada combinación de NSE y ZT. Este número se determina como la suma de los factores de expansión<sup>6</sup> de todos los registros pertenecientes a una combinación de NSE y ZT. De esta manera, se puede apreciar que el total de hogares que consume leña en las zonas térmicas bajo análisis corresponde a 1,506,345 (suma de la última fila de la Tabla 3), los cuales representan el 24% del parque de viviendas existentes en Chile al momento del desarrollo del estudio y el 76% del parque que consume leña para calefacción en el país.

Tabla 3: Número de viviendas por zona térmica y nivel socio económico - construido desde [39]

NSE	ZT4 #	ZT5 #	ZT6 #	ZT7 #
C1	13,248	25,321	13,390	1,317
C2	50,448	47,652	21,013	2,736
C3	230,915	136,179	77,626	7,713
D-E	434,036	240,376	173,198	31,178
<b>Total</b>	<b>728,647</b>	<b>449,528</b>	<b>285,227</b>	<b>42,943</b>

En virtud que los requerimientos de calor no son constantes a lo largo del año, es importante tener una granularidad mensual de estos, sobre todo si se considera que tales consumos son electrificados, por lo que el aumento del gasto podría ser substantivo en comparación al ingreso de los hogares en algunos meses. Por lo tanto, es importante separar el consumo anual por vivienda de forma mensual. Para lograr este objetivo, se utilizará la información proporcionada en la encuesta bajo estudio [39], en donde se solicitaba indicar el número de horas promedio al día que se mantenía encendido el artefacto de calefacción para cada uno de los meses del año. Con esta información y considerando el factor de expansión de cada registro (vivienda), fue posible determinar el uso promedio horario diario para cada uno de los meses para las cuatro zonas bajo análisis, resultados que se resumen en la Figura 4.

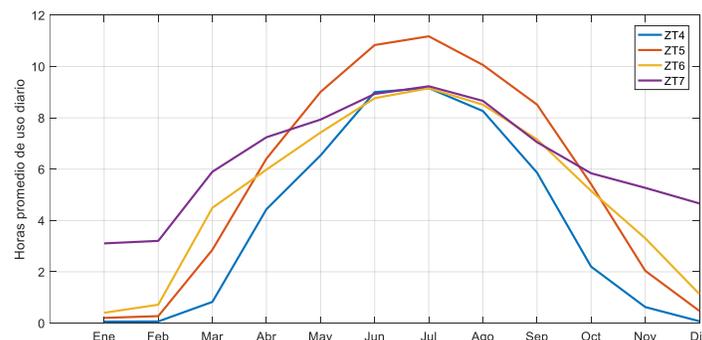


Figura 4: Horas de uso diarias de calefacción por mes y zona térmica – construido desde [39]

<sup>6</sup> El factor de expansión corresponde al número de viviendas que son representadas por una vivienda que efectivamente fue encuestada, en otras palabras, corresponde al conjunto de viviendas que se espera tengan un comportamiento esperado similar a la vivienda cuyas respuestas fueron registradas.

A partir de las curvas de uso mensual para cada ZT presentadas en la Figura 4, se asignó a cada uno de los meses una parte del consumo anual, en forma proporcional al número de horas de uso del artefacto de calefacción. Estos resultados se resumen en el Anexo 1. Con estos valores será posible determinar el costo mensual de electrificar la calefacción de leña, para así estimar el aumento en el gasto de energía en los hogares del sur del país.

### 3.2 Determinación de la electricidad requerida

Una vez que se determinan los requerimientos energéticos de calor se deben convertir a electricidad. Este proceso de conversión dependerá de la tecnología empleada para electrificar, de esta manera, si se utilizan simplemente calefactores resistivos, la conversión es automática, puesto que se requerirá una unidad de electricidad para satisfacer una unidad de calor, por ejemplo, el consumo promedio anual de calefacción para la ZT6 es de 21,405 kWh (ver Tabla 2), lo que implicaría un consumo de electricidad de 21,405 kWh al año, sólo para tener una referencia, si se considera que la tarifa eléctrica para un cliente residencial en Santiago es del orden de 121 \$/kWh [40] (se usa este valor como ejemplo ya que es el más barato del país<sup>7</sup>), se requiere en promedio, anualmente cerca de 2.6 millones pesos para electrificar el calor de la leña por hogar para dicha zona térmica (ZT6).

Producto del alto costo que significaría la conversión uno a uno de los requerimientos de calor en requerimientos de electricidad, es que se precisa utilizar medios más eficientes para tal conversión. Afortunadamente, hoy existen las bombas de calor, que son máquinas térmicas que a través de un ciclo termodinámico cerrado son capaces de mover calor de un medio de menor temperatura a uno de mayor temperatura. Específicamente, un compresor hace circular un fluido refrigerante entre un evaporador, donde el refrigerante absorbe calor desde el medio con baja temperatura, y un condensador, donde se libera el calor absorbido al medio de mayor temperatura [41].

Para la operación del compresor se utiliza electricidad, no obstante, se realiza de forma eficiente, puesto que por cada unidad de electricidad se puede mover más de una unidad de calor, a esta relación (i.e., calor suministrado/electricidad requerida) se le denomina COP (por sus siglas en inglés, Coefficient of Performance) y su valor está, en condiciones ideales, entre dos y cuatro si se trata de bombas de calor aerotérmicas<sup>8</sup> y entre tres y cinco si se trata de bombas de calor geotérmicas<sup>9</sup> [41]. Por lo tanto, un COP igual a tres significa que por cada unidad de energía eléctrica usada en el compresor (1 kWh) se pueden mover tres unidades de calor para calefaccionar el hogar (3 kWh). Se debe señalar que en este trabajo se utilizarán bombas de calor del tipo aerotérmicas ya que son más fáciles de instalar en viviendas ya construidas y presentan un menor costo que las bombas de calor geotérmicas, las que requieren de obras civiles importantes para instalar los intercambiadores de calor bajo tierra, trabajos que muchas veces son inviables en viviendas ya construidas.

Es importante destacar que el COP varía de acuerdo con la temperatura del medio desde donde se extrae calor y del medio que se quiere calefaccionar, sin embargo, dado que el medio a calefaccionar (vivienda) busca temperaturas de confort que no varían significativamente, la principal variable que determina el COP es la temperatura ambiente. Este efecto se puede apreciar en la Figura 5, donde se indica la potencia eléctrica consumida y la potencia térmica entregada para distintas temperaturas ambiente para una bomba de calor residencial [42]. Desde esta figura es posible determinar que el COP a 20°C es 3.41 y 0°C es 1.92. Esto implica que para transformar los requerimientos de calor identificados en la sección 3.1 en electricidad se debe determinar la variación del COP a lo largo del año (meses más fríos tendrán un menor COP). Para realizar este procedimiento, el primer paso es contar con datos de temperatura para cada una de las zonas térmicas bajo análisis, dado que son regiones amplias, de manera referencial se tomará una ciudad representativa desde cada zona, y para cada una de ella se extraerán datos de temperatura ambiente para luego calcular el COP.

<sup>7</sup> Este valor no considera cargo por energía de invierno y corresponde al precio de tramo 1 (consumos mensuales del orden de 200 kWh) para una zona de tendido eléctrico aéreo de Santiago (en particular se utiliza la comuna de Cerrillos como referencia)

<sup>8</sup> Aquellas en que el intercambio de calor se realiza con el aire que circunda el hogar.

<sup>9</sup> Aquellas en que el intercambio de calor se realiza debajo de la superficie de la tierra.

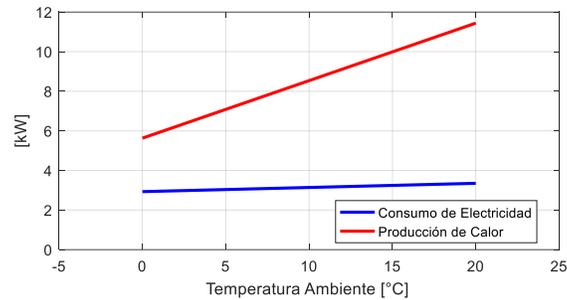


Figura 5: consumo eléctrico y suministro de calor para bomba de calor aerotérmica - Calorex AW9002 [42]

**Paso 1: Determinación de vectores de temperatura**

Las ciudades utilizadas como referencia para el análisis de temperatura son Concepción, Temuco, Puerto Montt y Coyhaique para las zonas térmicas 4, 5, 6 y 7, respectivamente. Para cada ciudad se descargan los archivos mensuales con datos de sensores con un minuto de resolución desde la Dirección Meteorológica de Chile. Así, los datos para Concepción son obtenidos desde la Estación Carriel Sur [43], los de Temuco desde la Estación Maquehue [44], para Puerto Montt desde la Estación El Tepual [45] y finalmente para Coyhaique desde la Estación Teniente Vidal [46].

En particular, se utilizan para el desarrollo de este trabajo, los valores disponibles para el año 2021, de esta manera, para cada estación, luego de la descarga de sus 12 archivos, se genera un perfil anual de temperaturas que contiene 525,600 datos (1 min de resolución), estos datos son procesados automáticamente para detección de errores de medidas, en ventanas de 15 minutos, dando origen a un vector anual de 35,040 datos (15 minutos de resolución), obteniendo así, para cada ciudad representativa, una adecuada aproximación respecto a la variación de la temperatura durante el año y con esto lograr una mejor representación de la eficiencia de las bombas de calor.

**Paso 2: Determinación del COP mensual**

El siguiente paso es utilizar los perfiles de temperatura para construir los COP mensuales que serán utilizados para transformar los requerimientos de calor en electricidad. Para determinar el COP para cada registro de temperatura desde el vector anual de 15 minutos, se aplica la ecuación 1, la que indica que, para cada registro de temperatura,  $T_i$ , se determina el calor entregado a partir de la curva de suministro de calor,  $F_c(T_i)$ , y la electricidad consumida a partir de la curva de consumo,  $F_e(T_i)$ , ambas indicadas en la Figura 5, realizando la división entre ambos y obteniendo el COP para cada registro,  $COP_i$ . Para evitar sobreestimar el COP, se filtraron aquellas temperaturas mayores a 17°C, asumiendo que por sobre esa temperatura no se utilizará el sistema de calefacción en el hogar.

$$COP_i = \frac{F_c(T_i)}{F_e(T_i)} \quad \forall i = 1 \dots 3540 \Leftrightarrow T_i \leq 17^\circ C \quad \text{Ecuación 1}$$

Finalmente, a partir del vector de COP construido desde los registros de temperatura, se determina el COP promedio para cada uno de los meses para cada una de las zonas térmicas (ciudades representativas), los que se presentan en la Tabla 4, donde es posible observar que los menores COP se concentran en el periodo de junio y agosto.

Tabla 4: COP promedio mensual para cada zona térmica

ZT	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>ZT1</b>	2.94	2.96	2.92	2.87	2.80	2.73	2.62	2.71	2.75	2.79	2.86	2.93
<b>ZT2</b>	2.79	2.82	2.76	2.76	2.67	2.54	2.43	2.53	2.58	2.64	2.75	2.79
<b>ZT6</b>	2.79	2.82	2.78	2.79	2.64	2.42	2.47	2.50	2.60	2.64	2.74	2.82
<b>ZT7</b>	2.74	2.80	2.75	2.73	2.40	2.09	2.33	2.28	2.49	2.58	2.70	2.80

**Paso 3: Determinación de los requerimientos de electricidad**

El último paso consiste en utilizar los COP de cada zona térmica (Tabla 4) y los consumos de energía para calefacción por ZT y NSE (Anexo 1) en la ecuación 2, consiguiendo los requerimientos de electricidad correspondientes.

$$E_{i,j}^k = \frac{Calor_{i,j}^k}{COP_i^k} \quad \forall (i,j,k) \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 4 \dots 7 \in ZT \\ j = 1 \dots 4 \in NSE \\ k = 1 \dots 12 \in Meses \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,  $E_{i,j}^k$  representa el consumo de electricidad promedio por vivienda para la zona térmica  $i$  del nivel socioeconómico  $j$  para el mes  $k$ .  $Calor_{i,j}^k$  representa el consumo promedio por vivienda de calefacción a partir de la combustión de leña para la zona térmica  $i$  del nivel socioeconómico  $j$  para el mes  $k$  y finalmente  $COP_i^k$  corresponde al coeficiente de eficiencia promedio mensual para la zona térmica  $i$  durante el mes  $k$ . Utilizando la expresión anterior se determinan los consumos eléctricos para cada mes. A modo de ejemplo, en la Tabla 5 se presentan los consumos de electricidad mensuales por NSE para la ZT6 (el resto de las ZT se puede encontrar en el Anexo 2), observando que los requerimientos de electricidad son mayores en inviernos por el doble efecto de un mayor requerimiento de calor (meses más fríos) y un peor COP (aunque siempre mayor a dos) producto de las menores temperaturas.

Tabla 5: Electricidad promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 6

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>C1</b>	51.7	91.1	577.7	766.3	1005.3	1294.3	1324.3	1216.6	983.9	697.4	431.4	144.1
<b>C2</b>	50.1	88.4	560.5	743.5	975.5	1255.8	1284.9	1180.4	954.7	676.6	418.6	139.8
<b>C3</b>	56.5	99.6	631.6	837.7	1099.1	1414.9	1447.7	1330.0	1075.6	762.4	471.6	157.5
<b>D-E</b>	46.5	82.1	520.3	690.1	905.4	1165.7	1192.7	1095.7	886.1	628.1	388.5	129.8

**3.3 Efecto en el gasto y pobreza energética**

En esta sección se determinará el costo extra que significa electrificar la leña para cada combinación de NSE y ZT, para luego revisar el impacto que tiene esto en el gasto de los hogares y en su condición de pobreza energética.

**Paso 1: Determinación del costo adicional por electrificación de la leña**

El costo adicional por electrificación estará dado por la diferencia entre el costo de los nuevos requerimientos de electricidad para satisfacer el calor provisto por la leña y el costo actualmente pagado por calefacción suministrada a través de la combustión de la leña. En este sentido, lo primero a realizar es determinar el costo de los nuevos requerimientos de electricidad, para lo cual, y dado que ya se determinó la cantidad, se debe determinar el precio. Las viviendas, desde la perspectiva de la legislación nacional eléctrica, corresponden a clientes regulados, lo que significa que es la autoridad la que fija las tarifas que pueden cobrar las distribuidoras eléctricas. Estas tarifas son informadas públicamente por cada distribuidora a sus clientes a través de los denominados pliegos tarifarios, donde para cada tipo de cliente y zona abastecida se indican los cobros respectivos.

Con motivo de este cálculo se utilizarán como referencia las mismas ciudades anteriores. Así, para el caso de Concepción (ZT4) se obtiene la información de precios desde la empresa CGE [47], para Temuco (ZT5) y Puerto Montt (ZT6) desde el grupo SAESA (FRONTEL [48] y SAESA [49], respectivamente) y para Coyhaique (ZT7) desde la empresa EDELAYSSEN [50]. En particular, se utilizará como referencia la tarifa BT1 que concentra a la casi totalidad de los hogares del país y cuya estructura consta de un cargo fijo, un cargo variable (en función de la energía consumida) asociado al transporte de energía, un cargo variable asociado al consumo de energía base y un cargo variable asociado al consumo de invierno, los cuales se presentan en la Tabla 6, en ella no se indican los cargos fijos, puestos que estos ya son pagados por las distintas viviendas en su consumo eléctrico actual y no dependen del consumo.

Es importante destacar que el cargo por transporte se cobra a toda la energía independiente del monto o período de uso, en tanto que el cargo base se aplica para todo el consumo en el período de octubre a marzo sin condiciones y para todo el consumo de abril a septiembre siempre y cuando el consumo mensual sea menor o igual a 430 kWh, por el contrario, en aquellos meses en que el consumo mensual es mayor a 430 kWh dentro del periodo abril-

septiembre, se aplica el cargo base sólo para el consumo que no sobrepasa el límite de invierno, mientras que al consumo por sobre tal límite se le aplica el correspondiente cargo de invierno [51].

Tabla 6: Estructura tarifaria de clientes residenciales en las ciudades analizadas

Zona Térmica	Ciudad de Referencia	Costo de Transporte [\$/kWh]	Costo de Energía [\$/kWh]	Costo de Energía de invierno [\$/kWh]
ZT4	Concepción	20.78	123.99	160.57
ZT5	Temuco	20.78	141.56	196.64
ZT6	Puerto Montt	20.88	137.96	194.60
ZT7	Coyhaique	0.51	144.14	220.31

El límite de invierno es único por hogar y se calcula para cada año como el promedio del consumo de energía entre el 1 de octubre del año anterior y el 31 de marzo, este valor se incrementa en un 20% y se compara con 350 kWh, escogiendo como límite, el mayor de estos valores. A partir de los valores presentados en [37] y en su encuesta respectiva [39], es posible determinar el consumo de electricidad anual promedio para un hogar del país que corresponde a 2074 kWh, lo que equivale a un promedio mensual de 173 kWh. Con los datos disponibles, este ejercicio se repite para cada combinación de NSE y ZT analizada en este trabajo, permitiendo determinar el límite de invierno para cada grupo y el consumo eléctrico actual, esto es importante para determinar el consumo eléctrico total (incluyendo electrificación de la leña), para saber si se aplica o no el cargo de invierno. Así, los pasos para determinar el costo de operación por electrificar el calor de la leña son los siguientes:

1. Determinación del consumo total de electricidad, es decir la suma del consumo actual de electricidad más la electrificación de la leña, esto permitirá ver qué meses del período abril-septiembre presentan un consumo superior a los 430 kWh y por tanto tendrán un cargo por energía base y un cargo por energía de invierno.
2. Estimación del límite de invierno para cada consumo, tomando los valores anuales disponibles en [39], calculando el promedio mensual, y con dicho valor aplicar la fórmula del límite de invierno.
3. Determinar el costo de transporte de la electrificación del calor, esto es, tomar los datos presentados en la sección de requerimientos de electricidad y multiplicarlos por el costo de transporte de cada ciudad.
4. Para los períodos de enero-marzo y octubre-diciembre, y para los meses que no superan los 430 kWh en el período abril-septiembre, determinar el costo de energía, multiplicando los requerimientos de electricidad para reemplazo de la leña por el costo de energía base de la ciudad correspondiente.
5. Para los meses del período de abril-septiembre cuyo consumo es mayor a 430 kWh, el cargo de energía será la suma del costo de la energía base y del costo de la energía de invierno. Esto significa, por ejemplo, que si el límite de invierno es 350 kWh y su consumo de electricidad actual es 173 kWh (sin electrificación de la leña), quiere decir que el monto de electricidad usada para electrificación de la leña se cobrará a cargo base por los primeros 177 kWh (diferencia entre 350 kWh y 173 kWh) y los siguientes se cobrarán a costo de energía de invierno.
6. El costo de suministrar el calor de la leña a través de electricidad será la suma de los valores calculados en los pasos 3, 4 y 5 para cada combinación de NSE y ZT.
7. Finalmente, para determinar el costo adicional, se debe restar el costo que actualmente pagan los hogares por leña, para esto, se utiliza un valor de 20 \$/kWh (actualizándolo a marzo 2022), precio promedio indicado por el Ministerio de Energía en [52] y que es consistente con los rangos de precios de 14 \$/kWh a 24 \$/kWh (promedio 18 \$/kWh) indicados en [37].

Los pasos anteriores se resumen en la siguiente expresión:

$$C_{i,j}^k = \begin{cases} E_{i,j}^k \cdot P_i^T + EB_{i,j}^k \cdot P_i^B + EP_{i,j}^k \cdot P_i^P - Calor_{i,j}^k \cdot P^L & \forall k \in \{4, \dots, 9\} \Leftrightarrow ET_{i,j}^k > 430 \text{ kWh} \\ E_{i,j}^k \cdot P_i^T + E_{i,j}^k \cdot P_i^B - Calor_{i,j}^k \cdot P^L & e. o. c \end{cases} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde las variables, no mencionadas en las ecuaciones previas, corresponden a:  $C_{i,j}^k$  es el costo adicional por electrificar el calor de la leña para la vivienda promedio de la zona térmica  $i$  del nivel socioeconómico  $j$  para el mes  $k$ .  $P_i^T$ ,  $P_i^B$ ,  $P_i^P$  representan los precios por transporte, energía base y energía de invierno, respectivamente, para la

zona térmica  $i$ , mientras que  $P^L$  corresponde al precio de la leña.  $EB_{i,j}^k$  corresponde a la parte de la energía requerida para electrificar la leña que se paga a precio base (menor al límite de invierno) y  $EP_{i,j}^k$  aquella que se paga a tarifa de invierno, para la zona térmica  $i$  del nivel socio económico  $j$ . Finalmente,  $ET_{i,j}^k$  representa el consumo total de electricidad (consumo base más electrificación de la leña) para la zona térmica  $i$  del nivel socioeconómico  $j$  del mes  $k$ , el cual debe ser mayor a 430 kWh para que se active el cargo de invierno. Aplicando la fórmula anterior es posible obtener el gasto adicional por electrificación de la leña, valores que se presentan en forma detallada en el Anexo 3.

Los resultados encontrados indican que los sobrecostos por electrificación del calor de la leña durante los meses de invierno son significativos, oscilando entre los 50 a 200 mil pesos (Anexo 3), estando siempre sobre los 100 mil pesos adicionales en los meses de junio a agosto en las zonas térmicas 5, 6 y 7. Si se concentra el análisis entre los hogares más vulnerables, D-E, indicados en la Figura 6, se tiene que la zona térmica 6 presenta un mayor sobre costo por electrificación del calor de la leña, llegando en los meses de junio y julio a 180 mil pesos, valor que de no mediar política alguna, haría que parte importante de los requerimientos de calor de dichos hogares no sean satisfechos.

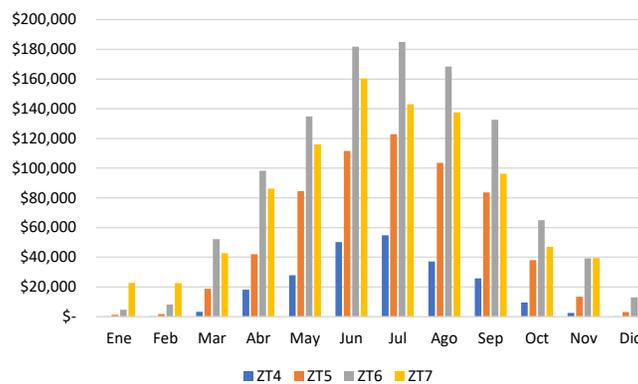


Figura 6: Costo adicional [\$\$] por electrificación de la leña para segmento D-E por zona térmica

Se debe considerar que los resultados aquí presentados constituyen una cota inferior de los sobrecostos promedios, por nivel socioeconómico y zona térmica, producto de la electrificación de la leña, ya que no consideran una potencial alza de tarifas (se asume que la mayor demanda no afecta a las tarifas actuales) ni tampoco el costo de inversión e instalación asociado a la compra de las bombas de calor<sup>10</sup>. El incremento posible de las tarifas se debe a que el aumento del consumo eléctrico provocado por la electrificación del calor implicará requerimientos adicionales de infraestructura para transportar dicha energía a través del sistema eléctrico, así como también requerimientos adicionales de generación para satisfacerlos.

#### Paso 2: Efecto en el gasto y en la pobreza energética de los hogares

Para determinar qué tan significativos son los costos extras asociados a la electrificación del calor de la leña, se comparan, de manera referencial, los costos determinados en el paso anterior con el ingreso monetario promedio mensual para cada uno de los niveles socio económicos a partir de los valores proporcionados en la Encuesta CASEN 2020 [53], los que se pueden apreciar en la Figura 7. Dado que los costos asociados a la electrificación del calor fueron calculados utilizando las tarifas vigentes, los valores de la CASEN son actualizados por IPC a marzo del 2022.

<sup>10</sup> Para proporcionar un rango factible de los costos de inversión e instalación de bombas de calor, a continuación, se presenta un ejercicio simplificado. Primero se toma un rango de precios de inversión a partir de bombas de calor referenciales reales, \$2.299.990 y \$6.299.990, obtenidos desde el proveedor KALTEMP (www.kaltemp.cl), luego estos valores se incrementan en un 30% para considerar el costo de instalación. Este 30% representa el valor mediano de costos de instalación obtenidos desde [58]. Finalmente, con estos costos y considerando una vida útil de 15 años y una tasa de descuento de 6% anual (tasa social de descuento usada por el Ministerio de Desarrollo Social) se obtiene un rango de pagos mensuales equivalente entre \$24.975 y \$68.410.

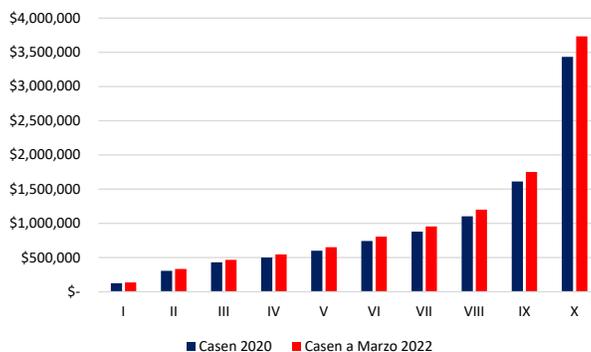


Figura 7: Ingreso monetario promedio por decil de ingreso autónomo – Casen 2020

Los ingresos mensuales promedio se encuentran identificados por decil, mientras que los análisis realizados en este trabajo están por NSE (C1, C2, C3 y D-E), esto ya que la base de datos utilizada como fuente principal de información emplea dicha clasificación [37]. Por tanto, para identificar el porcentaje de los ingresos mensuales que se usarán debido a la electrificación de la leña, es necesario hacer una equivalencia aproximada entre los deciles de la Encuesta CASEN y los grupos socioeconómicos empleados en este trabajo. Para ello se comparan los ingresos promedio obtenidos desde la encuesta CASEN con los valores de ingreso promedio informados por la Asociación de Investigadores de Mercados y Opinión Pública de Chile [54] para cada NSE<sup>11</sup>, agrupando niveles de ingresos similares. Así, los deciles 1, 2, 3 y 4 (promedio de ingreso de 370 mil pesos para este grupo) se aproximan al segmento D-E, los deciles 5, 6 y 7 (promedio de ingreso de 804 mil pesos) al segmento C3, el decil 8 (promedio de ingreso de 1.2 millones de pesos) al segmento C2 y el decil 9 y 10 (promedio de ingreso de 2.7 millones de pesos) al segmento C1. A manera de resumen, los valores de ingreso monetario promedio por nivel socioeconómico se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Ingreso promedio de referencia por nivel socioeconómico

	D-E	C3	C2	C1
Ingreso Monetario promedio mensual	\$ 370,043	\$ 804,249	\$ 1,200,064	\$ 2,741,440

Luego de conocer la base de ingreso monetario de cada nivel socioeconómico, este valor es utilizado como denominador para comparar el gasto adicional de electrificación de la leña calculado en el paso anterior. Estos resultados se presentan en la Tabla 8, la cual, logra condensar en una única imagen los resultados obtenidos a partir del presente trabajo, ya que permite comparar el porcentaje de los ingresos destinados a la electrificación de la leña entre los distintos niveles socioeconómicos, así como también entre las distintas zonas térmicas analizadas. Por ejemplo, en la Tabla 8 se observa que para la zona térmica 4 y nivel socioeconómico D-E, durante el mes de julio, un 15% de los ingresos monetarios mensuales son destinados a pagar el costo adicional de electrificación de la leña.

En esta tabla, las barras rojas muestran la magnitud del porcentaje de gasto y su tamaño es proporcional al mayor porcentaje, esto significa que cada celda de la tabla tendrá una mayor superficie en rojo entre más grande sea el porcentaje del ingreso destinado a electrificación, lo que permite visualizar de inmediato que los mayores porcentajes se presentan para los estrados D-E de la zona térmica 6 durante los meses de invierno. De hecho, se tiene que, durante el mes de julio, los hogares del segmento D-E deberían gastar en promedio el 50% de sus ingresos en calefacción. Adicionalmente se destaca en amarillo las celdas mayores a 10%, es decir aquellos hogares que destinan más del 10% de sus ingresos a satisfacer los requerimientos de calor, esto en línea con la definición clásica de Pobreza Energética [29] revisada en la sección 2.3. En este sentido, se observa que en todas las zonas térmicas existen meses en que los hogares del segmento D-E dedican más del 10% de sus ingresos para electrificar la leña.

<sup>11</sup> Es importante señalar que la clasificación socioeconómica realizada en [54] no sólo considera el ingreso, sino que también otras variables tales como educación de los sostenedores del hogar, ocupación, sistema de salud, posesión de tarjeta bancaria, vehículo particular y contrato de telefonía celular. Por lo tanto, la equivalencia realizada en este trabajo basada únicamente en el ingreso es sólo referencial.

Tabla 8: Porcentaje del gasto en electrificación de la leña con respecto al ingreso del hogar por NSE y ZT

ZT	NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4	C1	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	1%	0%	0%	0%
	C2	0%	0%	0%	2%	4%	6%	6%	5%	3%	1%	0%	0%
	C3	0%	0%	1%	3%	4%	8%	9%	7%	4%	1%	0%	0%
	D-E	0%	0%	1%	5%	8%	14%	15%	10%	7%	3%	1%	0%
5	C1	0%	0%	1%	3%	5%	6%	7%	5%	4%	2%	1%	0%
	C2	0%	0%	2%	6%	9%	12%	13%	11%	9%	4%	1%	0%
	C3	0%	0%	2%	6%	11%	15%	16%	14%	11%	5%	2%	0%
	D-E	0%	0%	5%	11%	23%	30%	33%	28%	23%	10%	4%	1%
6	C1	0%	0%	2%	4%	6%	7%	8%	7%	5%	3%	2%	1%
	C2	0%	1%	5%	9%	12%	16%	17%	15%	12%	6%	4%	1%
	C3	1%	1%	8%	15%	21%	28%	28%	26%	20%	10%	6%	2%
	D-E	1%	2%	14%	27%	36%	49%	50%	46%	36%	18%	11%	3%
7	C1	1%	1%	2%	3%	4%	6%	5%	5%	4%	2%	1%	1%
	C2	2%	2%	4%	7%	10%	13%	12%	11%	8%	4%	3%	3%
	C3	3%	3%	5%	10%	13%	18%	16%	15%	11%	5%	4%	4%
	D-E	6%	6%	12%	23%	31%	43%	39%	37%	26%	13%	11%	9%

Es importante señalar que la Tabla 8 representa una cota inferior para la condición de pobreza energética, toda vez que las familias no solo gastarán parte de sus ingresos en el calor electrificado, sino que también en sus consumos actuales de electricidad (i.e., iluminación, electrodomésticos, etc.) y en sus requerimientos de energía para cocinar. Para tener una idea del orden de magnitud que significaría la incorporación de estos costos en el gasto de los hogares y con ello en su condición de pobreza energética, se utilizan los consumos de electricidad previos a la electrificación de la leña, para las mismas viviendas utilizadas en los análisis de este trabajo, valorizando dichos consumos en función de las tarifas eléctricas indicadas en la Tabla 6 para cada una de las ciudades representativas. De los mismos registros de la encuesta [39] se extraen los consumos de gas licuado de petróleo, GLP, el cuál es usado mayoritariamente para cocinar y proveer agua caliente sanitaria. De [37] es posible observar que los requerimientos promedios de GLP para un hogar, descontando su uso para calefacción, que en este análisis se provee a través de bombas de calor, son de 1236 kWh por vivienda por año. Para valorizar este GLP en los hogares analizados se utiliza el valor de 95 \$/kWh presentado en [52] por el Ministerio de Energía, valor que por consistencia es actualizado a marzo de 2022.

Considerando lo anterior, es posible determinar el gasto total en energía para las viviendas que reemplazan la leña por bombas de calor, esto se realiza sumando el costo de electricidad original, más el costo de electrificación de la leña, más el costo de GLP para cocinar y agua caliente sanitaria. Este valor es calculado mes a mes por NSE y ZT, el cual se divide por el ingreso monetario promedio por nivel socioeconómico, estos resultados se resumen en la Tabla 9. En ella se indica el porcentaje del ingreso monetario de los hogares que es utilizado para satisfacer sus requerimientos totales de energía, lo que sí corresponde a la definición clásica de pobreza energética [29].

Estos resultados, sin duda, constituyen una alerta, puesto que, si se decide electrificar el calor de la leña en el corto plazo, esto significará que todas las viviendas del estrato D-E para las zonas térmicas 4, 5, 6 y 7 estarán en condición de pobreza energética durante casi todos los meses del año y que los hogares del estrato C3 estarán en tal condición al menos en los meses de invierno también para todas las zonas térmicas estudiadas. Lo anterior supone que los requerimientos energéticos seguirán siendo satisfechos, pero probablemente debido al significativo aumento del gasto y en función del resto de las necesidades básicas de las familias (vivienda, alimentación, etc.), muchas de ellas podrían reducir su consumo de calor por debajo del óptimo y consecuentemente, provocar viviendas más frías y húmedas que pueden ocasionar enfermedades, tal y como se discutió en la sección 2.3.

Tabla 9: Porcentaje del gasto total en energía con respecto al ingreso del hogar por NSE y ZT

ZT	NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4	C1	1%	1%	1%	2%	2%	3%	4%	3%	2%	2%	1%	1%
	C2	3%	3%	3%	5%	7%	9%	9%	8%	6%	4%	3%	3%
	C3	5%	5%	5%	7%	9%	12%	13%	12%	8%	6%	5%	5%
	D-E	10%	10%	11%	15%	17%	23%	25%	20%	17%	12%	10%	10%
5	C1	1%	2%	2%	4%	6%	7%	8%	7%	6%	3%	2%	2%
	C2	3%	3%	5%	9%	12%	15%	16%	14%	12%	7%	5%	4%
	C3	5%	5%	7%	10%	16%	20%	21%	19%	16%	10%	7%	5%
	D-E	11%	11%	16%	22%	33%	41%	44%	39%	33%	21%	14%	11%
6	C1	2%	2%	4%	5%	7%	9%	9%	8%	7%	4%	3%	2%
	C2	4%	4%	8%	12%	15%	20%	20%	18%	15%	9%	7%	4%
	C3	6%	6%	13%	20%	25%	33%	33%	31%	25%	15%	11%	7%
	D-E	12%	13%	25%	37%	47%	60%	60%	56%	46%	28%	21%	14%
7	C1	2%	2%	3%	5%	6%	7%	7%	6%	5%	3%	3%	3%
	C2	5%	5%	7%	10%	13%	16%	15%	14%	11%	7%	6%	6%
	C3	7%	7%	9%	14%	18%	23%	21%	20%	15%	10%	9%	8%
	D-E	16%	16%	21%	33%	41%	53%	48%	47%	36%	22%	20%	19%

Finalizando, es importante recordar a cuantos hogares representan en forma aproximada estos valores. Para ello, se debe considerar que la encuesta base utilizada para este trabajo estima para cada una de las viviendas encuestadas el número de hogares a los que representa, información que se presentó en la Tabla 3. Al relacionar esta información con los resultados de pobreza energética de la Tabla 9, se tiene que los hogares que están en esta condición, durante los doce meses del año, corresponden a 878,787 hogares, los que, si se toma el número promedio de personas por hogar de 3.0 de acuerdo con CASEN 2020 [53] representarían a casi 2.6 millones de personas, número que llega a cerca de 1.1 millones de hogares y 3.3 millones de personas si se consideran aquellos en condición de pobreza energética por al menos seis meses en el año.

#### 4. Conclusiones

En virtud de los problemas de salud asociados a la abundancia de material particulado en el sur del país, generado principalmente desde la combustión de leña usada para calefacción, es que en este trabajo se estudian los efectos de electrificar dicho calor, es decir, reemplazar la leña que satisface requerimientos de calor por electricidad a través de bombas de calor (i.e., medio más eficiente para alcanzar tal propósito). La idea de electrificar el calor nace porque junto con la eliminación de material particulado, permite evitar el uso intensivo de combustibles fósiles para el reemplazo de la leña y con ello, no aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> de nuestro país. No obstante, se debe prestar atención a que el uso intensivo de leña en los hogares del sur de Chile, no sólo se explica por su bajo costo (aunque es una causa importante) sino que también por factores culturales [55] que no corresponden necesariamente a atributos técnicos, tales como la impresión de mayor capacidad calorífica y confort térmico asociado [56] [57], así como también el gusto personal y la costumbre por parte de las comunidades [57], no se debe olvidar que la humanidad vienen haciendo uso de este combustible desde tiempos inmemoriales y aun, actualmente, muchas familias acceden a este recurso a través de la recolección y el autoabastecimiento [4]. Por tanto, estos antecedentes se deben tener en consideración a la hora de pensar un eventual reemplazo del uso de leña para calefacción, cualquiera sea el nuevo energético a utilizar.

De esta manera, se construyeron los perfiles de requerimientos de energía asociados al calor de la leña a nivel mensual para cada nivel socioeconómico (C1, C2, C3, D-E) para las cuatro zonas térmicas del sur del país (de la región de O'Higgins a Magallanes). Dichos perfiles, fueron transformados a consumo de electricidad considerando vectores de temperaturas anuales con resolución de 15 minutos y curvas de eficiencia de bombas de calor reales. Una vez determinados los perfiles de consumo eléctrico, estos fueron valorizados usando como referencia las tarifas residenciales de una ciudad representativa por zona térmica, utilizando las ciudades de Concepción, Temuco, Puerto

Montt y Coyhaique. Finalmente, considerando este consumo eléctrico adicional, el gasto de las familias por electrificar el calor de la leña fue determinado y con ello sus niveles de pobreza energética.

Es importante insistir que los valores determinados en este trabajo corresponden sólo a los costos operacionales de la electrificación y por tanto constituyen una cota inferior, toda vez que los costos de inversión en la bomba de calor no fueron considerados. Sin perjuicio de ello, los resultados obtenidos permiten concluir que la electrificación de la leña es hoy altamente costosa, en efecto, los costos adicionales oscilan entre los 50 mil a 200 mil pesos por vivienda promedio, encontrándose siempre sobre los 100 mil pesos para el estrato D-E durante los meses de junio, julio y agosto para las zonas térmicas 5, 6 y 7.

Si se considera el costo adicional por electrificación de la leña más el costo actual por electricidad (i.e., iluminación, electrodomésticos, etc.) y los requerimientos energéticos para cocinar, se tiene que todos los hogares del estrato D-E estarían en condiciones de pobreza energética (más del 10% de los ingresos destinados a consumo energético) durante los doce meses del año para las zonas térmicas 5, 6 y 7, esto es cerca de 880 mil hogares. Adicionalmente, si se agregan los hogares que estarían al menos 6 meses en condiciones de pobreza energética, se llegaría a la cifra de 1.1 millones de viviendas las que representan aproximadamente cerca de 3.3 millones de personas.

Los valores aquí determinados suponen que se satisfacen completamente los requerimientos actuales de calor, sin embargo, dado los altos costos que esto significaría, es probable que parte importante de estos requerimientos no sean satisfechos, poniendo en riesgo la salud de los miembros del hogar, o incluso, que los hogares prefieran volver al uso de leña para no pasar frío, poniendo igualmente en riesgo la salud de sus integrantes. Consecuentemente, los resultados de esta investigación deben ser cotejados con otras alternativas para combatir el material particulado sin aumentar considerablemente las emisiones de carbono y/o con los mecanismos de financiamiento necesarios, de manera que las decisiones de política pública se tomen a la luz de la mejor información disponible sin dejarse llevar por presiones tecnológicas que parecen buenas ideas pero que a la larga pueden provocar daño en la población.

## 5. Bibliografía

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *climate change 2021 - The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*. 2021.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, "Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policymakers," 2014.
- [3] United Nations, "Paris Agreement on Climate Change," *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2016. [Online]. Available: [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php).
- [4] A. Gómez Lobo, J. L. Lima, C. Hill, and M. Meneses, "Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile preparado para la Comisión Nacional de Energía," Dpto.de Economía, Universidad de Chile, 2006.
- [5] H. Jorquera, F. Barraza, J. Heyer, G. Valdivia, L. N. Schiappacasse, and L. D. Montoya, "Indoor PM2.5 in an urban zone with heavy wood smoke pollution: The case of Temuco, Chile," *Environ. Pollut.*, vol. 236, pp. 477–487, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.01.085.
- [6] T. Boden, G. Marland, and R. Andres, "National CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2014," 2017.
- [7] R. Reyes, H. Nelson, F. Navarro, and C. Retes, "The firewood dilemma: Human health in a broader context of well-being in Chile," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 28, pp. 75–87, 2015, doi: 10.1016/j.esd.2015.07.005.
- [8] Collins. KJ, "Low Indoor Temperatures and Morbidity in the Elderly," *Age Ageing*, no. 15, pp. 212–220, 1986.
- [9] B. K. Sovacool, "The political economy of energy poverty: A review of key challenges," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 3, pp. 272–282, 2012, doi: 10.1016/j.esd.2012.05.006.
- [10] Ministerio de Energía Gobierno de Chile, "Informe Balance Nacional de Energía 2019," Santiago, 2021.
- [11] CDT, "Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera," 2015.
- [12] RedPE, "Caracterización del mercado de la leña y sus barreras para la transición energética," Documento

- de trabajo N°7, 2020.
- [13] M. González-Eguino, “Energy poverty: An overview,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 377–385, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.013.
  - [14] World Health Organization, “WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,” Geneva, 2021.
  - [15] Á. Hofflinger, À. Boso, and C. Oltra, “The Home Halo Effect: how Air Quality Perception is Influenced by Place Attachment,” *Hum. Ecol.*, vol. 47, no. 4, pp. 589–600, 2019, doi: 10.1007/s10745-019-00100-z.
  - [16] World Health Organization, “Household Energy and Health Household Energy and Health,” 2006.
  - [17] World Health Organization, “Global Health Risks: Mortality and burden of disease attributable to selected major risks,” 2009.
  - [18] C. Molina, R. Toro, R. Morales, C. Manzano, and M. Leiva-Guzmán, “Particulate matter in urban areas of south-central Chile exceeds air quality standards,” *Air Qual. Atmos. Heal.*, vol. 10, no. 5, pp. 653–667, 2017, doi: 10.1007/s11869-017-0459-y.
  - [19] Ministerio de Medio Ambiente, *Decreto 12: Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP 2.5*. Santiago, 2011.
  - [20] Ministerio Secretaria General de la Presidencia, *Decreto 59: Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10*. Santiago: Comisión Nacional de Medioambiente, 1998.
  - [21] Sistema de Información de Calidad del Aire - SINCA, “Datos de Calidad del Aire PM2.5.” [Online]. Available: <https://sinca.mma.gob.cl/>. [Accessed: 20-Feb-2022].
  - [22] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2021,” 2021.
  - [23] BP, “Statistical Review of World Energy 2020,” London, 2020.
  - [24] Coordinador Eléctrico Nacional, “Reporte de sostenibilidad 2020,” Santiago, 2021.
  - [25] J. Masud, D. Sharan, and B. N. Lohani, *Energy For All: Addressing the Energy, Environment, and Poverty Nexus in Asia*. Asian Development Bank, 2007.
  - [26] Ministerio de Energía, “Mapa de Vulnerabilidad Energética: Síntesis Metodológica y Resultados,” Santiago, 2019.
  - [27] C. Amigo, R. Calvo, A. Cortés, and A. Urquiza, “Pobreza Energética. El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile,” *Policy Pap.*, vol. 3, p. 59, 2019.
  - [28] R. Calvo, N. Álamos, M. Billi, A. Urquiza, and R. Contreras Lisperguer, “Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe,” *Ser. Recur. Nat. y Desarro. N°207*, p. 85, 2021.
  - [29] B. Boardman, *Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth*. London: Belhaven Press, 1993.
  - [30] P. Howden-Chapman, H. Viggers, R. Chapman, D. O’Dea, S. Free, and K. O’Sullivan, “Warm homes: Drivers of the demand for heating in the residential sector in New Zealand,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 3387–3399, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.12.023.
  - [31] A. Gómez-Lobo, “Affordability of public transport: A methodological clarification,” *J. Transp. Econ. Policy*, vol. 45, no. 3, pp. 437–456, 2011.
  - [32] M. Becerra, A. Jerez, M. Valenzuela, H. O. Garcés, and R. Demarco, “Life quality disparity: Analysis of indoor comfort gaps for Chilean households,” *Energy Policy*, vol. 121, no. June, pp. 190–201, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.06.010.
  - [33] R. Reyes, A. Schueftan, C. Ruiz, and A. D. González, “Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses?,” *Energy Policy*, vol. 124, no. October 2018, pp. 301–311, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.10.022.
  - [34] World Health Organization, *WHO Housing and health guidelines*. 2018.
  - [35] A. Schueftan and A. D. González, “Reduction of firewood consumption by households in south-central Chile associated with energy efficiency programs,” *Energy Policy*, vol. 63, pp. 823–832, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.08.097.
  - [36] Ministerio de Medio Ambiente, *Decreto 31: Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica*

- para la región Metropolitana de Santiago. Santiago, Chile, 2016, pp. 1–5.
- [37] in - Data SpA, CDT, *Usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile - 2018*. Santiago: Ministerio de Energía, 2019.
- [38] Corporación de Desarrollo Tecnológico - CDT, *Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial*. Gobierno de Chile - Programa Eficiencia Energética, 2010.
- [39] Corporación de Desarrollo Tecnológico - CDT, “BBDD Estudio Caracterización Residencial 2018,” 2019. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/documentos/bbdd-estudio-caracterizacion-residencial-2018>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [40] Enel distribución, “Pliego Tarifario Enel Distribución 2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.enel.cl/content/dam/enel-cl/es/personas/informacion-de-utilidad/tarifas-y-reglamentos/tarifas/tarifas-vigentes/vigentes/Tarifas Suministros Clientes Regulados 8T - Marzo 2022.pdf>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [41] I. Jofré, J. Fuster, E. Soto, and S. Harfagar, *Bombas de Calor: Una Guía para el Usuario*, Deutsche G. 2020.
- [42] A. Navarro-Espinosa and P. Mancarella, “Probabilistic modeling and assessment of the impact of electric heat pumps on low voltage distribution networks,” *Appl. Energy*, vol. 127, pp. 249–266, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.026.
- [43] Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, “Datos Meteorológicos Estación Carriel Sur, Concepción Ap. (360019),” 2022. [Online]. Available: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/360019>. [Accessed: 05-Feb-2022].
- [44] Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, “Datos Meteorológicos Estación Maquehue, Temuco Ad. (380013).” [Online]. Available: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/380013>.
- [45] Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, “Datos Meteorológicos Estación El Tepual Puerto Montt Ap. (410005).” [Online]. Available: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/410005>.
- [46] Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos, “Datos Meteorológicos Estación Teniente Vidal, Coyhaique Ad. (450004).” [Online]. Available: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/450004>.
- [47] Compañía General de Electricidad CGE, “Pliego Tarifario CGE 2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2022/03/Tarifas-Suministro-CGE-Marzo-2022.pdf>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [48] Grupo Saesa, “Pliego Tarifario FRONTEL - Grupo Saesa - 2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.gruposaes.cl/frontel/tarifas-vigentes/>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [49] Grupo SAESA, “Pliego Tarifario SAESA - Grupo SAESA -2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.gruposaes.cl/saes/tarifas-vigentes/>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [50] Grupo Saesa, “Pliego Tarifario EDELAYSEN - Grupo Saesa - 2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.gruposaes.cl/edelayesen/tarifas-vigentes/>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [51] Ministerio de Energía, *Decreto 1T-2012: Fija fórmulas tarifarias aplicables a los suministros sujetos a precios regulados*. Santiago, 2013.
- [52] Ricardo Irarrazabal - Subsecretario de Energía, “Transición energética: Desafíos para el futuro de Chile,” in *Megatendencias de la transición Energética: Desafíos para el Futuro de Chile - Universidad Federico Santa María*, 2019, p. 23.
- [53] Ministerio de Desarrollo Social y Familia, “CASEN 2020 en Pandemia,” 2021. [Online]. Available: <http://casenpandemia2020.cl/>.
- [54] Asociación de Investigadores de Mercado, “Nueva metodología de segmentación y clasificación socioeconómica,” Santiago, 2018.
- [55] A. Schueftan and A. D. González, “Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution

control in south-central Chile,” *Energy Policy*, vol. 79, pp. 48–57, 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.01.008.

- [56] C. Amigo, “Cultura y vulnerabilidad energética territorial: el problema de la contaminación en Coyhaique,” Departamento de Antropología, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile, 2019.
- [57] R. Reyes and E. Neira, *Leña, energía renovable para la conservación de los bosques nativos de Chile*. Valdivia: Agrupación de Ingenieros Forestales Por El Bosque Nativo, 2012.
- [58] GIZ and Ministerio de Energía, “Índice de Precios – Bombas de Calor Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile,” 2020. [Online]. Available: [https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/indice-de-precios\\_bombas\\_de\\_calor\\_2020.pdf](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/indice-de-precios_bombas_de_calor_2020.pdf).

## 6. Anexos

### **Anexo 1: Consumo promedio mensual de calefacción por nivel socioeconómico y zona térmica**

Tabla 10: Consumo promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 4, construido a partir de [39]

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	9.1	10.4	129.5	694.5	1022.6	1408.3	1432.6	1292.9	917.4	344.2	98.1	11.8
C2	11.0	12.7	157.3	843.4	1241.9	1710.3	1739.8	1570.2	1114.2	418.0	119.2	14.3
C3	9.9	11.5	142.3	763.2	1123.7	1547.6	1574.2	1420.7	1008.1	378.2	107.8	13.0
D-E	8.0	9.3	114.9	616.2	907.3	1249.6	1271.1	1147.2	814.0	305.4	87.1	10.5

Tabla 11: Consumo promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 5, construido a partir de [39]

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	50.4	67.1	702.2	1575.0	2214.2	2662.9	2746.4	2472.2	2092.4	1330.3	501.4	117.4
C2	43.8	58.3	610.1	1368.6	1924.0	2313.9	2386.4	2148.2	1818.2	1155.9	435.7	102.0
C3	37.9	50.4	527.9	1184.1	1664.6	2001.9	2064.7	1858.6	1573.1	1000.1	377.0	88.2
D-E	35.6	47.3	495.4	1111.2	1562.1	1878.7	1937.6	1744.2	1476.2	938.5	353.7	82.8

Tabla 12: Consumo promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 5, construido a partir de [39]

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	144.2	256.9	1606.0	2137.9	2654.1	3132.2	3270.9	3041.5	2558.2	1841.1	1182.0	406.3
C2	139.9	249.3	1558.3	2074.4	2575.2	3039.0	3173.6	2951.1	2482.1	1786.3	1146.9	394.2
C3	157.6	280.9	1755.7	2337.2	2901.5	3424.2	3575.8	3325.0	2796.7	2012.7	1292.2	444.2
D-E	129.8	231.4	1446.4	1925.5	2390.3	2820.9	2945.8	2739.2	2304.0	1658.1	1064.6	365.9

Tabla 13: Consumo promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 7, construido a partir de [39]

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	723.6	746.2	1373.5	1686.4	1846.8	2079.5	2149.1	2016.3	1641.8	1359.6	1227.6	1086.3
C2	704.3	726.4	1336.9	1641.5	1797.7	2024.2	2091.9	1962.7	1598.1	1323.4	1194.9	1057.4
C3	652.4	672.8	1238.3	1520.5	1665.1	1874.9	1937.7	1817.9	1480.2	1225.8	1106.8	979.4
D-E	714.7	737.1	1356.6	1665.7	1824.1	2053.9	2122.7	1991.6	1621.6	1342.9	1212.5	1073.0

### **Anexo 2: Consumo electricidad bombas de calor por nivel socioeconómico y zona térmica**

Tabla 14: Electricidad promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 4

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	3.1	3.5	44.4	242.0	365.2	515.9	546.8	477.1	333.6	123.4	34.3	4.0
C2	3.7	4.3	53.9	293.9	443.5	626.5	664.0	579.4	405.1	149.8	41.7	4.9
C3	3.4	3.9	48.7	265.9	401.3	566.9	600.9	524.3	366.6	135.6	37.7	4.4
D-E	2.7	3.1	39.4	214.7	324.0	457.7	485.2	423.3	296.0	109.5	30.4	3.6

Tabla 15: Electricidad promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 5

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	18.1	23.8	254.4	570.7	829.3	1048.4	1130.2	977.2	811.0	503.9	182.3	42.1
C2	15.7	20.7	221.1	495.9	720.6	911.0	982.1	849.1	704.7	437.8	158.4	36.6
C3	13.6	17.9	191.3	429.0	623.5	788.2	849.7	734.6	609.7	378.8	137.1	31.6
D-E	12.8	16.8	179.5	402.6	585.1	739.6	797.4	689.4	572.2	355.5	128.6	29.7

Tabla 16: Electricidad promedio mensual (kWh) por vivienda por NSE para Zona térmica 7

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	264.1	266.5	499.4	617.7	769.5	995.0	922.4	884.4	659.4	527.0	454.7	388.0
C2	257.0	259.4	486.2	601.3	749.0	968.5	897.8	860.8	641.8	513.0	442.6	377.6
C3	238.1	240.3	450.3	557.0	693.8	897.1	831.6	797.3	594.5	475.1	409.9	349.8
D-E	260.8	263.2	493.3	610.1	760.0	982.8	911.0	873.5	651.3	520.5	449.1	383.2

### Anexo 3: Costo adicional por electrificación de la leña por nivel socioeconómico y zona térmica

Tabla 17: Costo adicional [miles de \$] por electrificación del calor de la leña por vivienda por NSE para Zona térmica 4

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	0.3	0.3	3.7	20.4	31.4	57.5	62.6	52.9	29.0	10.6	2.9	0.3
C2	0.3	0.4	4.5	24.8	47.9	71.2	77.4	65.6	35.2	12.9	3.5	0.4
C3	0.3	0.3	4.1	22.5	34.5	63.8	69.4	58.8	31.9	11.7	3.2	0.4
D-E	0.2	0.3	3.3	18.1	27.9	50.3	54.8	37.2	25.8	9.4	2.6	0.3

Tabla 18: Costo adicional [miles de \$] por electrificación del calor de la leña por vivienda por NSE para Zona térmica 5

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	1.9	2.5	26.6	81.2	124.0	162.2	178.3	150.8	122.6	53.9	19.1	4.4
C2	1.6	2.1	23.1	69.3	106.5	139.7	153.6	129.7	105.3	46.8	16.6	3.8
C3	1.4	1.8	20.0	44.8	90.8	119.6	131.6	110.9	89.8	40.5	14.3	3.3
D-E	1.3	1.7	18.7	42.0	84.6	111.6	122.9	103.5	83.6	38.0	13.5	3.1

Tabla 19: Costo adicional [miles de \$] por electrificación del calor de la leña por vivienda por NSE para Zona térmica 6

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	5.2	9.1	58.0	110.2	150.9	203.1	206.6	188.2	148.3	72.1	43.7	14.4
C2	5.0	8.8	56.3	106.6	146.1	196.7	200.2	182.3	143.5	70.0	42.4	13.9
C3	5.7	9.9	63.4	121.4	165.9	222.9	226.8	206.7	163.0	78.8	47.8	15.7
D-E	4.7	8.2	52.3	98.2	134.9	181.9	185.1	168.5	132.5	64.9	39.4	12.9

Tabla 20: Costo adicional [miles de \$] por electrificación del calor de la leña por vivienda por NSE para Zona térmica 7

NSE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1	23.0	22.9	43.4	87.5	117.6	162.5	145.0	139.4	97.6	47.7	40.0	33.3
C2	22.4	22.3	42.2	84.8	114.1	157.9	140.8	135.4	94.7	46.4	38.9	32.4
C3	20.7	20.6	39.1	77.6	104.7	145.2	129.4	124.4	86.7	43.0	36.0	30.0
D-E	22.7	22.6	42.9	86.3	116.0	160.4	143.1	137.6	96.3	47.1	39.5	32.9