

# DESARROLLO SUSTENTABLE

## MIRADAS INTERDISCIPLINARIAS DE EXPERIENCIAS EN CHILE Y BRASIL

RICARDO BARRA RÍOS  
JORGE ROJAS HERNÁNDEZ,  
EDITORES



Universidad de Concepción



Colección VRIM dirigida por  
Jorge Rojas Hernández



Universidad de Concepción, Chile  
Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile  
Facultad de Ciencias Ambientales  
Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM)  
Fondo de Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias (FONDAP)

Universidad de São Paulo, Brasil

Vicerrectoría de Relaciones Institucionales  
y Vinculación con el Medio  
Universidad de Concepción

Ricardo Barra Ríos - Jorge Rojas Hernández, Editores

Desarrollo sustentable. Miradas interdisciplinarias  
de experiencias en Chile y Brasil

© Universidad de Concepción  
Registro de Propiedad Intelectual N° 263.146

ISBN 978-956-227-399-2

Primera edición, marzo de 2016

Vicerrectoría de Relaciones Institucionales  
y Vinculación con el Medio Universidad de Concepción  
Víctor Lamas N° 1140  
Fono (56-41) 2661640  
Concepción - Chile

Edición/producción editorial  
Oscar Lermanda

Ilustración de portada  
Paisaje del Parque Nacional Torres del Paine,  
Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Chile

Derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial, por cualquier medio o  
procedimiento, incluidos la reprografía y el tratamiento informático, sin permiso escrito  
del titular de los derechos.

IMPRESO EN CHILE / PRINTED IN CHILE

# DISMINUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y DE LA POBREZA ENERGÉTICA POR CALEFACCIÓN A LEÑA EN LA CIUDAD DE VALDIVIA

AIR QUALITY IMPROVEMENT AND POVERTY ALLEVIATION IN WOOD FUEL RESIDENTIAL HEATING: COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS IN THE CITY OF VALDIVIA

Alejandra Schueftan<sup>1</sup>, Alejandro González<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile;

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medio Ambiente (INIBIOMA, CONICET y Universidad Nacional del Comahue), Bariloche, Argentina  
alejandraschueftan@gmail.com ; gonzalezad@comahue-conicet.gob.ar

**Resumen:** Se investigó el uso de energía en el sector residencial de la ciudad de Valdivia, situada en el centro-sur de Chile, que por su clima frío utiliza la mayor cantidad de energía en calefacción. La leña es el combustible más económico, con precio por unidad de energía 5 veces menor al gas envasado y 6 veces menor a la electricidad, y el usado por el 95% de los hogares para calefacción. Debido a la falta de aislación térmica en los edificios, y a los diseños y modo de operación de las estufas a leña, la ciudad de Valdivia sufre episodios frecuentes de contaminación del aire por exceso de material particulado (MP) en época invernal. En 2014 la ciudad fue declarada saturada de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$ , lo cual es una emergencia ambiental que conduce a la necesidad de un plan de descontaminación. Existen al presente tres líneas de trabajo: reacondicionamiento térmico de la envolvente de las viviendas, recambio de estufas, y control de la humedad de la leña. En este trabajo investigamos el recambio de estufas en relación a la disminución en el gasto en combustible y en la contaminación. Realizamos un análisis de costo de energía por nivel de ingresos del hogar, y encontramos que el 52% de los hogares gasta por encima del 10% de su ingreso, lo cual los sitúa en pobreza energética. Otro 27% gasta casi 10%, y sólo el 21% no tiene riesgo de pobreza energética. Con nuevos artefactos de calefacción provistos por el programa de recambio, encontramos que la pobreza energética no se aliviaría, aunque la contaminación disminuiría notablemente, si existiera disponibilidad de equipos con las características técnicas propuestas en el recambio. Esto muestra que la renovación de artefactos debe ser acompañada por mejoras térmicas en los edificios, que pueden disminuir a la mitad el consumo, y resolver los dos principales problemas al mismo tiempo.

**Palabras clave:** Calefacción a leña, contaminación del aire, pobreza energética, sector residencial, Valdivia.

**Abstract:** Energy use was investigated in the residential sector of the city of Valdivia, located in south-central Chile, which has a high demand of heating due to its cold climate. Firewood is the cheapest available fuel, with a price per unit of energy 5 times lower than bottled gas and 6 times lower than electricity, and used by 95% of households for heating. Due to the lack of thermal insulation in buildings, and the design and mode of operation of firewood heating devices, Valdivia has regular episodes of air pollution due to excessive particulate matter (PM) in winter, which lasts at least five months. In 2014 the city was declared saturated zone for  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , which is an environmental emergency that leads to the need for a decontamination plan. There are at present three lines of work: thermal retrofit for the envelope of dwellings, replacement of heating devices, and humidity control of firewood. Here we investigate the replacement of heating equipment in relation to the decrease in fuel costs and pollution. We analyzed the energy cost per household in-

come level, and found that 52% of households spend over 10% of their income, which places them in energy poverty. Another 27% spend nearly 10%, and only 21% had no risk of fuel poverty. By including a new heating appliance according to the requirements of the replacement program, we found that energy poverty cannot be alleviated, but pollution would decrease significantly, if there was availability of equipment with the technical features proposed in the replacement program. This shows that the replacement of heating devices must be accompanied by thermal improvements in buildings, which can greatly reduce consumption and solve two major problems at once.

**Keywords:** Firewood Heating, Air Pollution, Energy Poverty, Residential Sector, Valdivia.

## Introducción

LA LEÑA ES UN RECURSO energético renovable; sin embargo, su uso directo en los hogares presenta desafíos en la implementación de sistemas eficientes que eviten la contaminación del aire, derivada del humo de la combustión. En el caso de una estufa hogareña, el tamaño de la leña es de por sí una desventaja, ya que el aire no puede combinarse eficientemente con la masa de combustible. Los combustibles gaseosos son los que más fácilmente se combinan con el aire y producen menos emisiones. Cuando se usan combustibles líquidos se busca primero gasificarlos o pulverizarlos para que aumente la interacción con el aire en la combustión. En el caso de la madera, al presente, la manera menos contaminante de quemarla en estufas es en forma de pellets compuestos por partículas finas adheridas por presión. En la combustión los pellets se disgregan en partículas que tienen una relación alta de superficie a volumen, aumentando la eficiencia de mezcla con el aire y disminuyendo los contaminantes y humo. Para el mismo principio de funcionamiento de una estufa, y para el mismo contenido de humedad, la combustión de pellets genera entre 3 y 6 veces menos humo y contaminantes que la leña (CNE, 2009). Esta forma de utilizar la madera y sus residuos se ha incrementado en Europa y EE.UU., aunque aun es incipiente en la provisión de dendroenergía en Chile; debido a su costo más alto que la leña no hay suficiente demanda para utilizarlos como fuente de energía. Por el procesamiento para su elaboración, el costo del pellet disminuye mucho cuando aumenta la cantidad demandada; aunque el uso actual de pellets y briquetas en Chile es marginal.

En zonas frías la mala calidad térmica de las viviendas produce alta demanda de energía para calefacción (Schueftan y González, 2013 y 2015). También se ha identificado que el tipo de estufas utilizado, con posibilidad de cierre completo del tiraje de aire, aumenta significativamente las emisiones de MP, aun en estufas modernas de buena calidad (Jordan *et al.*, 2005; CNE, 2009). En una encuesta de 1937 hogares que usan estufas a leña en Valdivia, el 68% informó que usa el tiraje cerrado, el 32% semi-cerrado y no hubo respuestas afirmativas de uso del tiraje abierto (MMA, 2012). Una entrada de aire apropiada oxigenaría la combustión adecuadamente y daría la menor contaminación. Este hecho conduce a la aparente paradoja de que la operación de cocinas a leña como calefactores más antiguos, a pesar de su menor rendimiento térmico produce bajas emisiones. Esto es consecuencia de la mayor disponibilidad de aire en la combustión al ser equipos con menor hermeticidad (CNE, 2009). Por otro lado, estos datos

aportados por los diversos estudios citados muestran la vulnerabilidad de las iniciativas de mejoras tecnológicas que dependen de la operación del usuario.

En la combustión de leña en los hogares, entre los elementos identificados como dañinos para la salud humana se encuentran el material particulado (MP) y los compuestos aromáticos policíclicos (PAH por su sigla en inglés) (Sanhueza *et al.*, 2009). El MP se clasifica por su tamaño, el cual determina la incidencia en enfermedades por la penetración que ocurra a través de los pulmones, siendo el de tamaño menor a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{2.5}$ ) el más perjudicial para la salud, y este es el motivo de esfuerzos cada vez mayores para monitorearlo y controlarlo. Una red nacional de monitoreo de MP en Chile brinda resultados en tiempo real online (SINCA, 2014). Las estaciones de monitoreo se encuentran en las ciudades y sectores donde con equipos móviles se han detectado previamente los mayores niveles. El MP a su vez contiene sustancias derivadas de la combustión incompleta (PAHs), las cuales son bioquímicamente activas. En la ciudad de Temuco se midió el MP con detalle espectroscópico, encontrándose que cerca del 8% de este se compone de PAHs considerados cancerígenos (Cereceda-Balic *et al.*, 2012). El trabajo de Cereceda-Balic *et al.* (2012) fue también muy importante para determinar que la mayor parte del MP presente en Temuco en episodios de emergencia atmosférica procede de la leña, con un 93% de contribución de este combustible y corresponde a  $\text{MP}_{2.5}$ , que causa mayor daño a la salud de las personas. La emisión del parque vehicular y la quema de gas y kerosene también aportan MP, aunque en las ciudades del centro-sur puede observarse en el monitoreo que su incidencia es mucho menor en comparación con las emisiones de la quema de leña, con lo cual el problema de calidad del aire en estas regiones es diferente del de ciudades como Santiago de Chile (Cereceda-Balic *et al.*, 2012).

Las principales ciudades del centro-sur de Chile, entre las cuales se encuentran Temuco, Valdivia y Osorno, han sido declaradas en saturación de MP. Esta condición se determina una vez que los valores medidos de MP han sobrepasado las normas de calidad de aire durante tres años consecutivos, y es el paso previo a la implementación de un plan de descontaminación ambiental. Por otro lado, en las regiones del centro-sur hay preferencia cultural por la leña, debido a la abundante disponibilidad histórica del recurso. Además, en la última década el crecimiento económico en Chile ha permitido que los hogares puedan tener mejores condiciones de confort, incrementando continuamente el uso de energía (Mundaca, 2013). Sumado a estos factores, en estas regiones el precio de la leña es mucho más bajo que las otras alternativas de combustibles. Por ejemplo, por unidad de energía, la leña en la ciudad de Valdivia es 4 veces más barata que el gas y 6 veces más barata que la electricidad (Schueftan y González, 2013). La leña es un recurso energético de producción nacional en Chile, ya sea de bosques nativos como de plantaciones, estas últimas mayormente de pino y eucalipto (INFOR, 2012). Sin embargo, aun en el caso de que se logre manejo sustentable de bosques y plantaciones, los efectos en la salud de la contaminación del aire por combustión de leña hacen que el uso del recurso en las condiciones actuales no sea sustentable (Gómez-Lobo *et al.*, 2006).

Las actuales políticas para reducir la contaminación se enfocan, por un lado, en mejorar la vivienda a través de la normativa térmica y el subsidio de reacondicionamiento térmico de la envolvente y, por otro lado, en mejorar el sistema de calefacción a través

del recambio de estufas y el uso de leña seca. El objetivo de este trabajo es investigar el potencial de mejora en uso de energía y en calidad del aire con el reemplazo de artefactos a leña por los equipos nuevos provistos con el subsidio a recambio de estufas en la ciudad de Valdivia. Se incluye en el estudio el costo del combustible y la evaluación del nivel de pobreza energética, así como también el aumento de temperatura de confort en un escenario de efecto rebote de la mejora en rendimiento térmico y las emisiones de MP para los distintos equipos. Los antecedentes respecto a la calidad constructiva de las viviendas y el potencial de reacondicionamiento de la envolvente fueron estudiados en un trabajo previo (Schueftan and González, 2013).

## Metodología

Se estudió la encuesta de uso de energía en hogares que realizó el instituto Certificación e Investigación de la Vivienda Austral (CIVA) de la Universidad Austral de Chile en Valdivia (140.000 habitantes) para el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2012). Se encuestaron 2025 viviendas unifamiliares, de las cuales 1937 utilizan leña para calefacción. Se obtuvo el detalle del tipo de estufa y modo de operación, consumo de leña y la modalidad de compra, valor de la propiedad, conocimiento acerca de programas y subsidios relacionados a energía en viviendas, calidad de la construcción y artefactos, e intención de renovación en el edificio y/o artefactos. Este trabajo forma parte de un estudio mayor que involucra otras ciudades del centro-sur de Chile, con la intención de conocer la contribución del sector residencial a los altos niveles de material particulado.

En trabajos previos estudiamos algunas variables de una encuesta similar anterior (MMA, 2010) en relación a los programas gubernamentales de subsidio para la mejora de la vivienda y su envolvente (Schueftan y González, 2013). En el presente trabajo analizamos los datos de las 1937 viviendas que usan leña y la reducción en cantidad de combustible y emisiones de MP al aplicar el programa de recambio de calefactores. Este subsidio corresponde al cambio de las cocinas a leña y estufas antiguas por modelos de estufa a leña con un mayor nivel de eficiencia y hermeticidad. Los beneficiarios de este subsidio deben asistir a talleres de capacitación y pagar \$100.000 por la instalación de la estufa, lo que corresponde al 74% del salario mínimo neto. El subsidio aplica solo a casas, no departamentos, y puede ser obtenido una sola vez para cada vivienda. Los equipos entregados deben cumplir con la norma para calefactores a leña que regula la eficiencia y permite emisiones de MP entre 2.5 g/h y 4.5 g/h en condiciones de laboratorio (Chile, 2011). Para una potencia máxima de 8000 kcal/h, estas estufas tendrían emisiones de laboratorio por kg de leña quemada cercanas a 2 g/kg.

Estas condiciones no se consiguen en la operación real de las estufas debido a que son utilizadas con distintos tiraje de aire, cargas de leña variable, períodos de encendido y apagado, y con condiciones variables de humedad de la leña. El Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda realizó diversos estudios de emisiones de estufas a leña en condiciones reales de uso. Para las estufas que en condiciones ideales de laboratorio debían emitir un máximo de 3 g/kg de leña, se obtuvo una media de distintas mediciones en condiciones reales de uso de 13 g/kg leña; es decir entre 4 y 5 veces más emisiones (Scott, 2005). En otro trabajo se investigó una estufa de muy bajas emisiones (1.5 g/kg

leña en laboratorio), para la cual se obtuvo una emisión promedio en condiciones reales de 4.6 g/kg leña con humedad entre 10% y 20% (Kelly *et al.*, 2007). Para el presente trabajo asumimos una emisión en condiciones reales de las estufas existentes de 13 g/kg de leña, y para las estufas del programa de recambio una emisión de 6.5 g/kg de leña para 25% de humedad de la leña como es permitido y habitual en la ciudad de Valdivia. El valor de 6.5 g/kg se obtuvo de la interpolación en la Fig. 2 del trabajo de Kelly *et al.* (2007). Es de notar que estas estufas, que por diseño de fabricación no posibilitan el cierre total de la entrada de aire, no se encuentran aun disponibles en el mercado de Chile, con lo cual el resultado en reducción de emisiones que se obtenga dependerá de la provisión efectiva de estos artefactos.

El consumo de leña se obtuvo de la encuesta CIVA (MMA, 2012), en función del valor de la vivienda. Dado que la encuesta no relacionó los datos con niveles de ingreso del hogar, asumimos que el valor de la vivienda es proporcional al ingreso. Esta suposición es válida por la homogeneidad de la muestra estudiada, que incluye viviendas unifamiliares de valor menor a USD50000. Los consumos de gas y electricidad fueron obtenidos de la Cámara Chilena de la Construcción (CDT, 2010). Esta información corresponde a promedios de todo Chile, que consideramos válidos para Valdivia en el caso analizado de hogares con calefacción a leña, dado que éste es el consumo principal en la región. En la muestra analizada el gas (Gas Licuado de Petróleo, en la región no existe provisión de gas natural) se usa para cocción de alimentos y para agua caliente sanitaria, y la electricidad para artefactos domésticos e iluminación. Los niveles de ingreso por hogar fueron tomados del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE, 2013).

## Resultados

### *Consumos y pobreza energética*

En la Tabla 1 se resumen los resultados del costo energético anual de hogares en Valdivia, de acuerdo a niveles de ingreso familiar. El uso de leña se cuantificó en m<sup>3</sup>st por año (m<sup>3</sup>st=m<sup>3</sup> estéreo, medida de volumen de leña en la compra, en promedio 1 m<sup>3</sup>st equivale a 1540 kWh de poder calorífico superior) (MMA, 2012), con un costo de \$30000 /m<sup>3</sup>st., el cual incluye \$5000 de mano de obra de corte y almacenamiento en el lugar designado en la vivienda. En todo este trabajo \$ significa Pesos de Chile.

Para el gas envasado se tomó el precio para el balón de 15 kg (\$18000) y un equivalente energético de 13.6 kWh/kg de gas basado en el poder calorífico superior, resultando el costo de gas \$88 /kWh. El costo de electricidad es de \$122 /kWh, incluyendo impuestos y gastos fijos para el servicio residencial.

En la Tabla 1 se observa que para todos los niveles de ingreso el gasto en leña es el más alto de los 3 vectores energéticos analizados, aun cuando el costo del kWh de leña es cercano a los \$20, muy por debajo del gas y la electricidad. Esto es característico de las regiones frías que utilizan la mayor parte de energía en calefacción. Se identificaron 5 grupos según nivel de ingresos, con el ABC1 siendo el más alto y E el más bajo, según la clasificación comúnmente utilizada en Chile.

**Tabla 1.** Consumo y costo anual de energía en hogares de Valdivia de acuerdo a nivel de ingreso del hogar.

Nivel de ingreso del hogar	ABC1	C2	C3	D	E
Leña consumo (m <sup>3</sup> st./año)	18	13.4	12.3	10.7	10
Leña costo	\$ 540000	\$ 400800	\$ 370200	\$ 319500	\$ 298500
Gas consumo (kWh/año)	2056	2427	2419	1985	1861
Gas costo	\$ 181314	\$ 214065	\$ 213333	\$ 175061	\$ 164106
Electricidad (kWh/año)	2882	2150	1736	1495	1311
Electricidad costo	\$ 351543	\$ 262337	\$ 211804	\$ 182414	\$ 159881
Total costo energía/año	\$ 1072857	\$ 877202	\$ 795337	\$ 676975	\$ 622487
Ingreso del hogar	\$ 38543556	\$ 15136296	\$ 8066988	\$ 4440756	\$ 2024256
% del ingreso en energía	2.8%	5.8%	9.9%	15.2%	30.8%
% of hogares del nivel de ingreso	6%	15%	27%	37%	15%

Las últimas dos filas de la Tabla 1 indican el porcentaje del ingreso total del hogar que se dedica a pagar el costo energético, y el porcentaje de hogares en ese nivel de ingreso, respectivamente. Los niveles más bajos D y E dedican 15.2% y 30.8% del ingreso en energía. En diversos estudios se considera que con un gasto mayor al 10% del ingreso el hogar se encuentra en pobreza energética (Howden-Chapman *et al.*, 2012). Esto no significa que no pueda afrontar el gasto, sino que ese nivel de gasto no permitirá adquirir otros recursos y servicios necesarios para satisfacer las necesidades básicas, y que, por lo tanto, con un costo de energía superior a 10% del ingreso existe riesgo de no disponer de la cantidad de energía necesaria para el mínimo confort. Esta situación fue estudiada por Bustamante *et al.* (2009), quienes informan temperaturas entre 14°C y 15°C en el interior de las viviendas del centro-sur de Chile en niveles socioeconómicos bajos. Del análisis anterior se deduce que 52% de las viviendas se encuentra en pobreza energética, y el nivel C3, con una incidencia muy relevante de 27%, se encuentra con un gasto energético en el límite del 10% del ingreso familiar. Puede observarse que sólo el 21% de las viviendas se encuentran claramente fuera del riesgo de pobreza energética.

#### *Recambio de calefactores*

En la muestra estudiada, 1072 hogares disponen de estufas modernas de combustión lenta (en promedio de 7 años de antigüedad), y éstos consumen en promedio 11.5 m<sup>3</sup>st de leña/año; mientras que 814 hogares disponen de cocinas a leña y 51 hogares de salamandras para calefacción, con un promedio de antigüedad de 12 años. El consumo de leña en el grupo que dispone de salamandras es el menor con 7.5 m<sup>3</sup>st, y el grupo que utiliza cocinas promedia un consumo de 10.5 m<sup>3</sup>st/año.

Las estufas existentes son similares a las ensayadas en 2006 por SERPRAM en Chile, para las cuales se encontró un rendimiento térmico de 61.4%, promedio de cinco

modelos. Para las cocinas a leña, tanto en los estudios en Chile como en Nueva Zelanda se encontraron rendimientos térmicos cercanos a 51% (CNE, 2009), y asumimos este mismo rendimiento para salamandras. Los nuevos modelos propuestos para el recambio de calefactores deberían certificarse a 74% de rendimiento térmico. Este es un valor declarado de eficiencia térmica que aun no ha sido confirmado por ensayos de laboratorio. Para utilizar valores reales de eficiencia de calefactores usamos datos del estudio de 35 modelos de calefactores a leña en Nueva Zelanda, que se obtuvieron para verificar las prestaciones declaradas por los fabricantes (NZ, 2008). En esos estudios, para calefactores de más del 70% de eficiencia declarada, el promedio de valores reales obtenidos fue de 66.7%, el cual utilizaremos en este trabajo como rendimiento real de las nuevas estufas a leña (NZ, 2008). Los resultados obtenidos no pierden generalidad debido a que el valor de eficiencia asumido podrá ser modificado en el futuro cuando se cuenten con ensayos de las estufas entregadas en los programas de recambio vigentes en Chile.

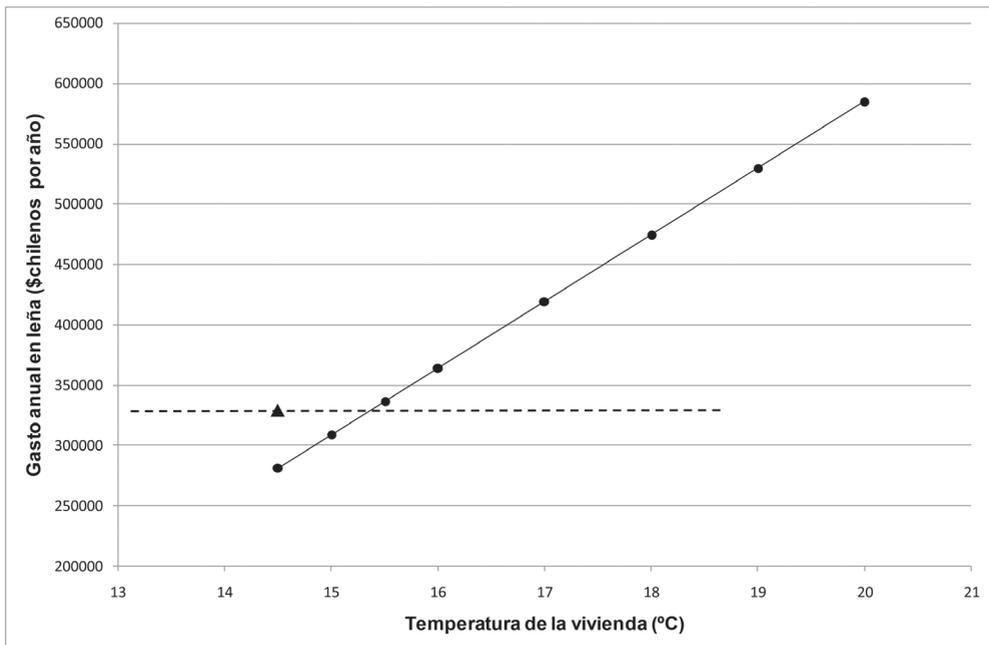
Nótese que el consumo actual de leña para hogares con calefactores más modernos es mayor que para aquellos con cocinas o salamandras. Esto puede deberse a que corresponden a los hogares de más bajos ingresos y con menor posibilidad de adquirir el combustible para llegar a un nivel de confort adecuado (Howden-Chapman *et al.*, 2009).

Cuando se mejora la eficiencia de artefactos o envolventes, se observa en general un efecto rebote (“rebound effect”, en las publicaciones en inglés). Este ya fue observado en otros casos en diversos programas de mejora energética (MINVU, 2013). Es de notar que en la muestra analizada los sectores que usan cocinas y salamandras son los que menos leña utilizada reportan, y este hecho sugiere que habría efecto rebote en consumo una vez reemplazadas por una estufa moderna. El efecto rebote es consecuencia de un mayor nivel de confort térmico debido a la mayor eficiencia de los equipos, pero que finalmente origina consumos iguales o mayores a los que se tenían con anterioridad a los reemplazos.

En el caso de Valdivia, para el promedio de consumo de leña de 11 m<sup>3</sup>st., la temperatura interior de las viviendas sociales actuales resulta de 14.5°C en invierno. Bustamante *et al.* (2009) han observado temperaturas interiores similares en otras localidades del centro-sur de Chile. Entonces, para evaluar las mejoras en el consumo y el efecto rebote al disponer del recambio de estufas, consideramos una temperatura de base de 14.5°C y la configuración de artefactos y consumos de la encuesta CIVA detallada más arriba.

La Figura 1 muestra (círculos llenos) el costo de la leña en función de la temperatura interior al implementar el programa de recambio de calefactores. El triángulo lleno muestra la situación actual de consumo promedio y temperatura de la vivienda en invierno. Se observa el aumento en la temperatura para el mismo consumo de leña (marcado con la línea segmentada que intercepta la línea de círculos), el cual es cercano a 1°C en la temperatura de la casa. Se asume que los hogares tomarán esta mejora en confort manteniendo el consumo (gasto); sin embargo, estimamos que es poco probable que se aumente el consumo de leña luego del recambio del equipo debido a la situación de pobreza energética expuesta anteriormente.

Por otro lado, manteniendo la temperatura interior en 14.5°C el recambio de estufa produciría una disminución en el consumo de leña de 17%, con lo cual los grupos D y E no saldrían de la situación de pobreza (ver Tabla 1).

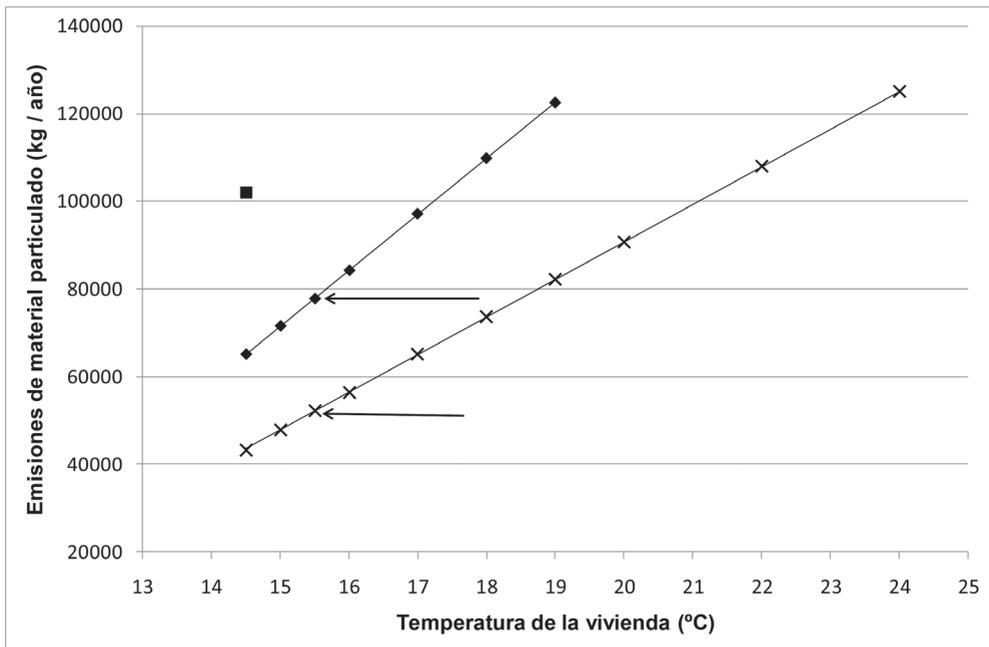


**Figura 1.** Consumo de leña por año en función de la temperatura interior de la vivienda.

En la Figura 2 se grafica la relación entre emisiones y temperatura interior al aplicar el recambio de calefactores. Para contar con distintos escenarios de reducción, consideramos dos niveles de emisiones para las nuevas estufas: i) el nivel más bajo de emisiones en operación real, de 6.5 g/kg de leña quemada (Kelly *et al.*, 2007), corresponde a las estufas de muy bajas emisiones (laboratorio 1.5 g/kg) y que no permiten el bloqueo de la entrada de aire; ii) un nivel de emisiones en operación real de 9.7 g/kg de leña quemada, que corresponde a un nivel intermedio entre el equipo propuesto por el programa de recambio y los equipos disponibles actualmente. La alternativa i) se indica en la Figura 2 con cruces, y la alternativa ii) con rombos llenos.

La opción de operación con el tiraje de aire totalmente cerrado no está incluida en las opciones consideradas aquí. Aunque es una modalidad frecuente (68% de los hogares declara usar el tiraje cerrado en la encuesta CIVA en Valdivia), las emisiones en estos casos son muy variables de acuerdo a las prácticas del usuario y no se cuenta ni con datos precisos de la cantidad de aire que alimenta la combustión con tiraje cerrado ni con ensayos específicos. A modo de referencia de la magnitud de las variaciones, podemos citar la investigación de Jordan y Seen (2005) en Australia, quienes compararon las emisiones de una estufa moderna de bajas emisiones con una más antigua. Se encontró que las estufas más modernas, con emisiones muy bajas (2.6 g/kg) para tiraje abierto, producen 35 g/kg de MP con el tiraje de aire cerrado. Es importante observar que con los calefactores de mayor antigüedad se obtuvieron cantidades similares de MP con el tiraje cerrado (33 g/kg), aun cuando en las mejores condiciones de combustión con el tiraje abierto emiten 13.5 g/kg (véase tabla 2 en Jordan y Seen, 2005). Este gran aumento

de emisiones con tiraje cerrado fue también medido en estufas chilenas ensayadas en Suiza (ver Tabla 3, pág. 31, en CNE, 2009), y debería ser tenido en cuenta en el diseño de las políticas de reducción de emisiones a través del recambio de estufas. Si no se cambia el diseño de las entradas de aire, la posibilidad de una operación errónea del calefactor puede anular las potenciales reducciones de emisión de las estufas nuevas. Por el contrario, como se mostró en trabajos previos, las mejoras en la eficiencia térmica de la vivienda no dependen de la operación del usuario, y son entonces más confiables como estrategias de reducción de emisiones de MP (Schueftan y González, 2015).



**Figura 2.** Emisiones de la muestra de 1937 viviendas en Valdivia en función de la temperatura interior de la vivienda: los rombos indican estufas de la opción ii), las cruces la opción i), y el cuadrado lleno la situación actual (ver texto).

En cualquiera de estos escenarios, con los nuevos equipos propuestos las emisiones son considerablemente más bajas que la situación actual graficada con el cuadrado lleno. En la opción i) aumentando la temperatura a 21.5°C se llega a los actuales niveles de emisiones; y con la opción ii) el efecto rebote debería llevar la temperatura de la casa a 17.5°C para igualar las emisiones actuales. En la Figura 2, las flechas muestran, en cada escenario, las emisiones a las que se llega con el mismo consumo de leña actual y una temperatura de 1°C de efecto rebote (obtenida de la Figura 1). En estas condiciones, las emisiones se reducen aproximadamente a un 51% de las emisiones actuales para la opción i), y a un 76% de las emisiones actuales para la opción de estufas ii).

## Conclusiones

Se investigó el uso de energía en viviendas de Valdivia, y las consecuencias en uso de leña y emisiones de material particulado (MP) del recambio de estufas y cocinas a leña por modelos mejorados. Se encontró que el 52% de la población utiliza más del 15% de su ingreso en gasto energético hogareño, por lo cual se encuentran en niveles de pobreza energética. Un 27% adicional tiene un gasto cercano al 10% de sus ingresos, y solamente el 21% se encuentra claramente fuera de riesgo de pobreza energética.

El recambio de estufas mejora moderadamente el rendimiento térmico y disminuiría el consumo de leña de la muestra en 17%, por lo cual el recambio no ataca el problema de pobreza energética que afecta a la mayoría de la población en Valdivia, ni tampoco resolvería la baja temperatura interior observada en las viviendas en invierno. Por otro lado, estimamos que existiría un efecto rebote, que como mínimo mantendría el consumo actual aumentando la temperatura interior de las viviendas en cerca de 1°C. Este aumento produciría una mejora moderada en la calidad de vida. A pesar del aumento de la temperatura interior (de 14.5°C a 15.5°C), ésta se mantendría muy por debajo de los niveles recomendados (más de 18°C), lo que afecta la salud de las personas, ya que las enfermedades generadas en invierno no solo son consecuencia de los altos niveles de MP, sino también de las bajas temperaturas al interior de las viviendas. Además, el hecho de que la estufa se ubique solo en una de las habitaciones de la vivienda hace que los ambientes tengan diferencias de hasta 3°C.

En cualquier caso, el recambio de estufas genera una importante reducción entre 36% y 58% de las emisiones de MP para las mismas condiciones de temperatura interior actuales, y entre 24% y 49% de reducción si se considera el mismo consumo actual con un efecto rebote en aumento de la temperatura interior 1°C. Este rango de resultados corresponde a la utilización de un equipo disponible con características similares a las propuestas para el subsidio de recambio de calefactores, y a otro que cumple las exigencias más estrictas pero aun no se encuentra en el mercado. Es importante que estos equipos no permitan el cierre completo de la entrada de aire para la combustión, como ocurre en la actualidad. Reducir el aire en la combustión aumenta la duración de la leña (combustión lenta), pero por debajo de cierto nivel puede producir aumento de emisiones en diez veces. Por otro lado, las emisiones ideales que se consignan en las prescripciones para estos equipos se refieren a condiciones de laboratorio, es necesario realizar ensayos en condiciones reales de uso, las cuales dependen fuertemente de la operación del usuario, incluyendo la elección de la provisión de aire a la combustión y la calidad de la leña utilizada.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con apoyo de CONICYT (Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Chile, proyecto 21120989), LACEEP (Latin American and Caribbean Environmental Economics Program, proyecto IDEA-006), y CONICET (Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, proyecto 3646/14).

AG agradece el apoyo de la Universidad Austral de Chile en su estadía de año sabático, en la cual se comenzó esta investigación.

## Referencias bibliográficas

- Bustamante, W. *et al.* (2009). Eficiencia energética en la vivienda social, un desafío posible. En: *Camino al Bicentenario, propuestas para Chile* (pp. 253-282). Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en:[http://politicaspUBLICAS.uc.cl/cpp/static/uploads/adjuntos\\_publicaciones/adjuntos\\_publicacion.archivo\\_adjunto.a4363393f53cc273.436170c3ad74756c6f20395f3039202d204566696369656e63696120656e657267c3a97469636120656e2076697669656e646120736f6369616c2e706466.pdf](http://politicaspUBLICAS.uc.cl/cpp/static/uploads/adjuntos_publicaciones/adjuntos_publicacion.archivo_adjunto.a4363393f53cc273.436170c3ad74756c6f20395f3039202d204566696369656e63696120656e657267c3a97469636120656e2076697669656e646120736f6369616c2e706466.pdf)
- CDT, Corporación de Desarrollo Tecnológico; CChC, Cámara Chilena de la Construcción (2010). *Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial*. Santiago, Chile. 404p.
- Cerededa-Balic, F. *et al.* (2012). Obtaining PAHs Concentration Ratios and Molecular Markers for Residential Wood Combustion: Temuco, a Case Study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(1), 44-51.
- Chile (2011). DS N° 39. Establece Norma de Emisión de Material Particulado, para los Artefactos que Combustionen o puedan Combustionar Leña y Derivados de la Madera. [http://www.leychile.cl/Consulta/listado\\_n\\_sel?\\_grupo\\_aporte=&sub=512&agr=1020&comp=acceso](http://www.leychile.cl/Consulta/listado_n_sel?_grupo_aporte=&sub=512&agr=1020&comp=acceso) Junio 2014.
- Comisión Nacional de Energía (CNE) (2009). Certificación de artefactos a leña. Lic. 610-7-LE09. Informe final, Ambiente Consultores.
- Gómez-Lobo, A. *et al.* (2006). Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile. Informe Final preparado para la Comisión Nacional de Energía de Chile. Santiago: Centro Micro Datos, Departamento de Economía, Universidad de Chile.
- Howden-Chapman, P. *et al.* (2009). Warm homes: Drivers of the demand for heating in the residential sector in New Zealand. *Energy Policy*, 37(9), 3387-3399.
- Howden-Chapman, P., Viggers, H., Chapman, R., O'Sullivan, K., Barnard, L., & Lloyd, B. (2012). Tackling cold housing and fuel poverty in New Zealand: A review of policies, research, and health impacts. *Energy Policy*, 49, 134-142.
- INE, Instituto Nacional de Estadísticas (2013). VII Encuesta de Presupuestos Familiares. Septiembre.
- INFOR, Instituto Forestal, Valdivia (2012). Estudio de Consumo Domiciliario Urbano de Material Leñoso en Valdivia. <http://www.combustiblesolidosag.cl/index.php/descarga-documentos>
- Jordan, T. B.; Seen A. J. (2005). Effect of Airflow Setting on the Organic Composition of Wood heater Emissions. *Environmental Science and Technology*, 39(10), 3601-3610, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15952364>
- Kelly, C. *et al.* (2007). Warm Homes Technical Report. Real Life Emissions Testing of Wood Burners in Tokoroa. Ministry for the Environment, New Zealand, acceso julio 2014 <http://www.mfe.govt.nz/publications/energy/emissions-testing-wood-burners-tokoroa-jun07/emissions-testing-wood-burners-tokoroa-jun07.pdf>
- MINVU, Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, y Ministerio de Energía (2013). Evaluación Independiente del Programa de Reacondicionamiento Térmico. Informe Final. ARQ Energía / ENER Solutions. <http://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=do>

- cumentos/10221.1/37394/1/24\_Evaluaci%C3%B3n%20Independiente%20del%20Prog%20de%20Reacondicionamiento%20T%C3%A9rmico\_Soluciones%20Energ%C3%A9ticas\_584105-18\_LP11.pdf , acceso junio 2014.
- MMA, Ministerio de Medio Ambiente (2012). Evaluación Técnica y Económica de Viviendas más Incidentes en Demanda Térmica en el Radio Urbano de la Ciudad de Valdivia.
- Mundaca, T. L. (2013). Climate change and energy policy in Chile: Up in smoke? *Energy Policy*, 52, 235-248.
- NZ. National Wood Burner Performance Review, Phase 2. Ministry for Environment, New Zealand Government. 2008, <http://202.36.137.86/publications/air/national-wood-burner-performance-review-phase-2>
- Sanhueza P. A. *et al.* (2009). Particulate Air Pollution and Health Effects for Cardiovascular and Respiratory Causes in Temuco, Chile: A Wood-Smoke Polluted Urban Area. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59, 1481-1488.
- Scott, A. J. (2005). Real-life emissions from residential wood burning appliances in New Zealand. Ministry for the Environment New Zealand, <http://ecan.govt.nz/publications/Reports/air-report-emissions-residential-wood-burning-appliances-nz-000805.pdf>, acceso julio 2014.
- SINCA, Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. <http://sinca.mma.gob.cl/>, 2014.
- Schueftan, A.; González A. D. (2013). Reduction of firewood consumption by households in south-central Chile associated with energy efficiency programs. *Energy Policy*, 63, 823-833.
- Schueftan, A.; González, A. D. (2015). Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. *Energy Policy*, 79, 48-57.