

EFFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE FUENTES RESIDENCIALES EN MECANISMOS DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES INDUSTRIALES DE PM₁₀

Leonardo SANHUEZA, Cristian MARDONES* y Jorge JIMÉNEZ

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 215 4to piso, Concepción, Chile

*Autor de correspondencia: crismardones@udec.cl

Palabras clave: contaminación del aire, instrumentos económicos, costo-efectividad

RESUMEN

En este trabajo se analiza con un estudio de caso el impacto que tiene el reducir emisiones de material particulado respirable tanto para fuentes industriales como residenciales sobre los costos agregados de cumplimiento. Los resultados demuestran que sería más eficiente desde una perspectiva económica reducir emisiones residenciales más que industriales, sin embargo si la autoridad ambiental sólo regula a las fuentes industriales resulta más conveniente para ellas compensar sus propias emisiones con emisiones residenciales a través de programas de recambio de calefactores de leña en los hogares.

Key words: air pollution, economic instruments, cost-effective

ABSTRACT

This article discusses a case study oriented to analyze the compliance cost for reducing PM₁₀ (Particulate matter with aerodynamic diameter $\leq 10 \mu\text{m}$) emissions from industrial sources and residential wood burning. The results show that it is more efficient, from an economic perspective, to reduce PM₁₀ emissions from residential sources than the emissions from industrial sources. If the Environmental Authority only targets industrial sources for emission reductions, it would be more cost-effective for them to offset PM₁₀ emissions through programs oriented to upgrade current residential wood heaters.

INTRODUCCIÓN

El principal contaminante que afecta el área urbana conocida como Concepción Metropolitano, en Chile, corresponde al material particulado respirable de 10 micras (PM₁₀). En el año 2010 fue declarada “zona de latencia” debido a que los niveles ambientales de PM₁₀ se encontraban dentro del 80 y el 100 % del límite que marca la norma de calidad del aire para este contaminante, con valores entre 120 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ministerio del Medio Ambiente 2010).

La declaración de zona de latencia por PM₁₀ se oficializó en el año 2006 mediante el Decreto Supremo N° 41 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile. Esta condición generó la elaboración de un Plan de Gestión Ambiental con objetivo de evitar que aumentaran los niveles ambientales de PM₁₀ en la zona Metropolitana de Concepción.

Las emisiones de PM₁₀ en Concepción Metropolitano provienen principalmente de fuentes industriales y residenciales (CONAMA 2005), estas últimas

generadas por la combustión de leña para calefacción residencial durante la época de invierno, lo que sumado a ciertas condiciones meteorológicas se traduce en altas concentraciones de PM₁₀. De acuerdo con la evidencia epidemiológica internacional, las altas concentraciones de PM₁₀ pueden afectar la salud de la población expuesta.

A partir de una revisión de diversos estudios Pope y Dockery (2006) concluyeron que se puede establecer una relación consistente entre la mortalidad por fallas cardiopulmonares y las variaciones diarias en la concentración del material particulado respirable. Asimismo, estos autores reportan un considerable número de investigaciones que relacionan la contaminación por material particulado con enfermedades cardiovasculares, ya sea por exposiciones a corto o largo plazo. Por otra parte, también ha sido estudiada la contaminación intradomiciliaria generada por equipos de calefacción de leña poco eficientes. En este caso Saldiva y Miraglia (2004) encontraron que los efectos en la salud de las personas y los costos asociados a las muertes prematuras debido a la contaminación del interior de los hogares son considerablemente altos, especialmente en los países subdesarrollados.

Las herramientas típicamente utilizadas para abatir contaminantes del aire en fuentes industriales han sido regulaciones del tipo “comando y control” (como estándares y normas), las cuales debido a la heterogeneidad de costos entre las fuentes emisoras no generan soluciones costo-efectivas (Stavins 2003). A modo de ejemplo, en el caso de las fuentes residenciales las autoridades reguladoras de diversos países como Estados Unidos, Canadá y Nueva Zelanda han optado principalmente por programas de recambio de equipos, prohibiciones y normas de calefactores.

Esto contrasta con los resultados obtenidos al utilizar “instrumentos económicos” (como sistemas de compensación de emisiones, impuestos u otros), los cuales permitirían igualar los costos marginales de abatimiento y por lo tanto reducir la contaminación del aire a un costo menor. Schmalensee y Stavins (2013) muestran una revisión de la experiencia y consecuencias generadas por el éxito de un programa de transacción de emisiones de SO₂ en Estados Unidos. Calfucura *et al.* (2009) analizaron la aplicación de programas de transacción de emisiones en Santiago de Chile y concluyeron que este instrumento económico es atractivo para enfrentar los problemas de contaminación del aire en países en desarrollo, incluso en el caso de que las capacidades institucionales no estén bien consolidadas.

En este mismo sentido, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OECD 2013) sugiere el uso de instrumentos económicos como impuestos y mecanismos de transacción de emisiones para reducir la contaminación del aire en Chile.

La investigación de problemas ambientales causados por fuentes residenciales es escasa. Sin embargo, se puede mencionar el trabajo de Kandlikar *et al.* (2011) quienes analizaron los impactos de un recambio de artefactos de calefacción y cocina que utilizan leña o carbón como combustible por artefactos de leña menos contaminantes o que utilicen otro tipo de combustible como kerosene y gas licuado. Sus resultados muestran que se pueden obtener grandes beneficios en términos del mejoramiento de la calidad del aire en el ambiente y de la disminución de contaminación intradomiciliaria. Además concluyeron que para realizar estos programas de recambio se deben considerar distintos factores locales como aspectos culturales, de mercado y de subsidios disponibles, entre otros. Por otro lado, Chávez *et al.* (2011) examinaron el rol que cumple la distribución de ingresos en la determinación de políticas que permitan controlar la contaminación de calefactores de leña. Según estos autores los impuestos al consumo de leña y los subsidios para adquirir artefactos de combustión más limpia tendrían que ser de acuerdo al ingreso económico de los hogares. Aquellos con mayores ingresos deberían tomar la mayor carga de estas políticas.

En el caso de las fuentes industriales las opciones tecnológicas que se han evaluado corresponden a ciclón, multiciclón, lavador Venturi, filtro de mangas y precipitador electroestático (cada una de ellas presenta distintas eficiencias de reducción que dependen del combustible utilizado por la fuente industrial). Las fuentes residenciales pueden reducir sus emisiones al cambiar sus actuales artefactos de calefacción de leña por equipos que utilicen otro tipo de combustible como parafina, gas licuado, electricidad, pellet, o por artefactos de leña certificados (que por su tecnología de combustión generen una menor cantidad de emisiones). Así, a partir de los costos y el potencial de reducción de emisiones es posible calcular el costo por tonelada reducida de implementar alguna de las alternativas disponibles. De tal forma, bajo escenarios reguladores con distintas metas de reducción es posible comparar cuáles son las opciones tecnológicas que permiten reducir las emisiones de PM₁₀ a un costo agregado menor.

Descripción de la situación actual

El problema de la contaminación por PM₁₀ durante la época de otoño-invierno se extiende

a todas las ciudades del centro-sur de Chile. En el caso específico del Concepción Metropolitano los principales emisores son fuentes residenciales e industriales. De acuerdo con los datos del Ministerio del Medioambiente (2011) las emisiones residenciales e industriales aportan un 42.5 % y 36 % del total, respectivamente. Además, las mediciones de concentraciones de PM₁₀ desde el año 2000 en adelante, condujeron a que en el año 2011 se aprobara el Anteproyecto del Plan de Prevención Atmosférico para Comunas del Concepción Metropolitano (PPACM).

El PPACM contempla una serie de regulaciones para controlar la contaminación. Respecto a las fuentes residenciales, las principales medidas apuntan a fiscalizar la humedad de la leña comercializada, así como programas de recambio tecnológico de los artefactos de leña a través de un financiamiento compartido entre el Estado y los hogares beneficiados. Respecto a las fuentes industriales, las medidas apuntan principalmente a controlar las emisiones de los complejos industriales, establecer una norma de emisión para calderas y hornos, así como crear mecanismos de compensación de emisiones para aquellas fuentes industriales que emitan más de 1 ton/año de PM₁₀.

Los objetivos generales de este estudio fueron evaluar el impacto económico y ambiental que podría permitir la compensación de emisiones de fuentes industriales a través del financiamiento de recambios de artefactos de leña en fuentes residenciales. Para alcanzar los objetivos generales se plantearon los siguientes objetivos particulares: analizar las opciones tecnológicas que sean aptas para reducir las emisiones de PM₁₀ bajo una perspectiva económica, identificar el tipo de fuentes que se deberían priorizar para reducir emisiones de forma costo-efectiva y analizar la factibilidad económica de incorporar fuentes residenciales en mecanismos de compensación de fuentes industriales con la finalidad de reducir las emisiones de PM₁₀ a un menor costo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estimación de emisiones de fuentes residenciales

Considerando que no existen estudios recientes sobre el consumo y tenencia de equipos para calefacción

residencial se utilizó la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) del año 2006 para identificar las fuentes residenciales del Concepción Metropolitano¹. Esta encuesta presenta información de 2943 hogares sobre el consumo anual de leña y otros combustibles, decil de ingreso, comuna, entre otras características. Además posee un factor de expansión que representa la cantidad de hogares de características similares. Para llevar a cabo el análisis se incluyeron sólo aquellos hogares que declaran consumir leña (los factores de expansión corresponden a 137 967 hogares). Posteriormente se estimaron las emisiones de PM₁₀ generadas por los equipos de calefacción de leña en los hogares en el periodo de un año multiplicando el consumo de leña de cada hogar (kg leña/año) por el factor de emisión asociado a cada tipo de equipo (g PM₁₀/kg leña) por el factor de expansión de los hogares expresado en toneladas de PM₁₀.

Un aspecto importante relacionado a los factores de emisión es que éstos dependen principalmente del tipo de artefacto de calefacción utilizado y del porcentaje de humedad que posea la leña. Según el estudio realizado por la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT 2005) el consumo de leña en la zona del Concepción Metropolitano se compone de un 79.9 % de leña seca, un 15.6 % de leña semi-húmeda y un 4.5 % de leña húmeda. Sin embargo, el tipo de artefacto utilizado por el hogar no está incluido en la encuesta CASEN y sólo se incluye la distribución porcentual de equipos de la zona en el estudio de la UDT (2005)². Por lo anterior el equipo de leña en cada hogar debe ser analizado de forma aleatoria respetando la distribución porcentual del parque de equipos.

Opciones de recambio para fuentes residenciales

La opción de recambio de los calefactores de leña utilizados en los hogares por artefactos nuevos que utilicen otro combustible más limpio como parafina, gas licuado, electricidad, pastillas (“pellets”), o por calefactores de leña más eficientes, requiere de ser investigada en cuanto a los tipos de artefactos disponibles en el mercado para cada uno de los combustibles mencionados. Particularmente, las características a considerar incluyen la marca, modelo, tipo, potencia, consumo, superficie de calefacción y precio.

¹ Este fue el único año en el cual la encuesta CASEN levantó información sobre el consumo de leña para calefacción, por ello a pesar que existe información de otras encuestas CASEN para años más recientes (2009 y 2011) se utiliza como base la encuesta del año 2006.

² El parque de equipos de leña está compuesto por 23.5 % de salamandras, 8.9 % chimeneas, 35.7 % estufas de leña de cámara simple, 6.8 % estufas de leña con templador, 19.3 % cocinas de leña, 0.7 % braseros y el resto de los hogares poseen más de un equipo.

En el caso de los artefactos que utilizan parafina como combustible existen cerca de 40 modelos de estufas disponibles que se dividen en nueve marcas y cuatro tipos de tecnologías (tradicional, mecha, láser y tiro forzado), la potencia de estos modelos oscila entre los 2.3 Kw para estufas tradicionales y 9.6 Kw para estufas de tiro forzado. Los artefactos que utilizan gas licuado como combustible incluyen 16 modelos que se dividen en diez marcas y un tipo de tecnología cuya potencia oscila entre 2.4 Kw y 6 Kw. Los calefactores eléctricos incluyen 34 modelos divididos en 12 marcas y cuatro tipos de tecnología (convectiva, halógena, infrarroja y oleoeléctrica), la potencia de estos modelos oscila entre los 0.8 Kw y 2.2 Kw. Las estufas de pastillas (“pellets”) comercializadas a nivel nacional incluyen sólo una marca con dos modelos, por lo cual se evalúa adicionalmente una estufa importada. Finalmente, en el caso de artefactos de leña más eficientes (definidos como aquellos que estén cercanos a cumplir la futura norma Decreto Supremo N° 39 del Año 2011³) se consideraron modelos de una marca austriaca ya que actualmente no se comercializan en el país estufas que alcancen dicho nivel de eficiencia.

El tipo de artefacto a escoger por los hogares bajo un programa de recambio depende, entre otros factores, de la superficie a calentar. La encuesta CASEN 2006 no posee información de la superficie del hogar, pero sí tiene datos sobre el decil de ingreso del hogar, por lo cual se asignó una superficie al hogar de forma aleatoria (menos de 30, 30-40, 41-100, 101-150, más de 150 m²) a partir de los datos de superficie del hogar y el decil de ingreso reportados por en la encuesta CASEN (2011). Finalmente, con la extensión de la vivienda estimada se asumió que el espacio a calentar corresponde al 73.4 % de la superficie total (IIT-UDEC 2013).

Con el objetivo de evitar la generación de alternativas poco relevantes dada la amplia gama de estufas de parafina, gas licuado y electricidad se le dio prioridad a aquellas que tienen un menor costo

de calefacción por m² que incluye el costo anual del equipo (CAE) y de operación dividido por la superficie a calentar en cada hogar.

Una vez definido el conjunto de equipos que incluye cinco estufas de parafina, tres estufas de gas licuado, tres estufas eléctricas, tres estufas de pastillas y cinco estufas de leña importadas (**Cuadro A1** del Anexo), se deben estimar los costos de recambio asociados a las fuentes residenciales para lo cual se utilizan dos enfoques diferentes:

El primer enfoque consiste en estimar el costo que implica el recambio del calefactor y mantenerlo en operación durante 6 meses (abril a septiembre), ya que en este periodo según las características meteorológicas del Concepción Metropolitano se presentan las temperaturas más bajas. Para obtener el costo que implica mantener en operación los nuevos equipos durante este tiempo es necesario considerar las especificaciones técnicas de los artefactos relacionadas con el consumo de combustible y la superficie a calentar. Bajo este enfoque el costo de cada una de las opciones de recambio se obtiene al calcular el valor anual del número de equipos que de acuerdo con sus especificaciones técnicas permitan calentar la superficie requerida en cada hogar, más el costo anual del combustible para su operación, menos el gasto actual en leña, todo lo anterior por el factor de expansión del hogar⁴.

En el segundo enfoque, el costo de cada una de las opciones tecnológicas de recambio se basa en el consumo energético de los nuevos calefactores equivalente al consumo energético anual de la leña que declaran consumir los hogares. Para esto es necesario realizar la conversión entre el consumo de leña de los hogares de cada uno de los demás combustibles, lo que depende principalmente de la eficiencia de los artefactos de calefacción⁵ y el poder calorífico de los combustibles.

Una vez realizada la conversión energética para cada combustible, el costo de cada una de las opciones tecnológicas de recambio se obtiene al calcular

³ Norma de emisión de material particulado para artefactos que utilicen o puedan utilizar leña como combustible. El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos cuya potencia térmica nominal sea menor o igual a 8 Kw, es de 2.5 g/h. El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos que cuya potencia térmica nominal sea mayor a 8 Kw y menor o igual a 14 Kw, es de 3.5 g/h. El límite máximo de emisión de material particulado para calefactores nuevos cuya potencia térmica nominal sea mayor a 14 Kw y menor o igual a 25 Kw corresponde a 4.5 g/h.

⁴ El valor residual del calefactor es cero para el hogar, ya que en los programas de recambio se retira el equipo antiguo y luego se destruye.

⁵ Se asumen las siguientes eficiencias térmicas: estufa de combustión lenta con templador 65 %, estufa de combustión lenta de cámara simple 62 %, salamandra 35 %, cocina de leña 32 %, chimenea 15 %, brasero 90 %, artefactos de calefacción de parafina 84 %, artefactos de calefacción de gas licuado 92 %, artefactos de calefacción de electricidad 100 % y los artefactos de calefacción de leña certificados 75 %.

⁶ Se considera el entero superior de la relación entre el consumo de combustible manifestado por el hogar y el consumo del equipo.

el valor anual del número de equipos que de acuerdo a sus especificaciones de consumo permitan alcanzar el requerimiento energético del hogar⁶, más el costo anual del combustible para su operación, menos el gasto de leña actual, todo lo anterior por el factor de expansión del hogar.

Estimación de emisiones de fuentes industriales

Las emisiones de PM₁₀ generadas por cada fuente industrial provienen del Inventario de Emisiones para el Concepción Metropolitano elaborado por la UDT-Proterm (2011). Este inventario posee información de 533 fuentes que incluyen calderas, hornos y procesos. Sin embargo, para este estudio se incluyen sólo aquéllas en las cuales es factible implementar alguna tecnología de fin de tubo. Las emisiones de las 208 fuentes industriales consideradas corresponden a 3063 ton/año.

Opciones de abatimiento para fuentes industriales

Las opciones de abatimiento para las emisiones de PM₁₀ generadas por fuentes industriales han sido ampliamente discutidas en la literatura de instrumentos económicos aplicados en Chile (O’Ryan y Bravo 2001, Ponce y Chávez, 2005, Alegria *et al.* 2013, entre otros). Sin embargo, el presente estudio amplía la literatura existente al incorporar la compensación a través de la reducción de emisiones de fuentes residenciales. Específicamente, las opciones tecnológicas de fin de tubo para disminuir las emisiones de PM₁₀ corresponden a ciclón, multiciclón, precipitador electrostático, lavador Venturi y filtro de mangas.

Estimación de indicadores de costo-efectividad

Para estimar los indicadores de costo-efectividad de las fuentes residenciales bajo los dos enfoques previamente mencionados, se determinó el costo total anual para cada una de las opciones de recambio dividido por las emisiones reducidas en cada grupo de hogares representativos (generados con los factores de expansión). De tal forma que permite conocer cuál es el artefacto específico de recambio que permite reducir las emisiones de PM₁₀ a un costo menor en cada grupo de hogares. En el **cuadro A2** del Anexo se muestran a modo de ejemplo once hogares (hogar1, hogar43, hogar54, hogar89, hogar97, hogar569, hogar584, hogar610, hogar659 y hogar739) que representan una muestra del total de hogares incluidos en el análisis. En dicho cuadro se incluye el consumo de leña por hogar, las emisiones totales de PM₁₀ del tipo de hogares según el factor de expansión utilizado, el indicador de costo-efectividad (millones \$/ton PM₁₀) de cada alternativa para el cambio de

equipo según el combustible utilizado. Finalmente, a partir del indicador de costo-efectividad más bajo se seleccionó el equipo y combustible escogido por cada tipo de hogares.

Los indicadores de costo-efectividad para cada fuente industrial se calcularon a partir del costo total anual y la reducción de emisiones que genera la instalación de cada tecnología de fin de tubo. El costo total anual incluye la inversión inicial (adquisición e instalación del sistema de control y sus correspondientes equipos auxiliares) y los costos de operación y mantenimiento a lo largo de la vida útil del equipo de control. Para el presente estudio los porcentajes de reducción que varían según el tipo de combustible utilizado se obtuvieron de O’Ryan y Bravo (2001), mientras que las funciones de costos anuales de cada una de las opciones fueron extraídas de Ponce y Chávez (2005), actualizadas a precios de 2013. En el **cuadro A3** del Anexo se muestran a modo de ejemplo once fuentes industriales (ind1, ind24, ind28, ind31, ind44, ind56, ind78, ind80, ind93, ind95 y ind165) que representan una muestra del total de industrias incluidas en el análisis. En este cuadro se incluye el combustible utilizado, las emisiones totales de PM₁₀ y el indicador de costo-efectividad (millones \$/ton PM₁₀) de cada tecnología de captación de emisiones. Finalmente, a partir del indicador de costo-efectividad más bajo se seleccionó la tecnología por cada fuente industrial. Para comparar los indicadores de costo-efectividad entre fuentes industriales y residenciales, los indicadores fueron ordenados de menor a mayor y se establecieron distintas metas de reducción con el propósito de visualizar cuáles son las opciones tecnológicas que permiten disminuir las emisiones de PM₁₀ a un menor costo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por medio de la metodología propuesta se estima que de las fuentes residenciales se emitió un total de 9294 ton/año de PM₁₀. Por otra parte el análisis individual de las fuentes industriales que tienen la factibilidad técnica de aplicar una tecnología de abatimiento alcanzaron un total de 3063 ton/año. De esta forma el total de emisiones fue de 12 357 ton/año, considerando ambas fuentes. Estos resultados son distintos a los reportados previamente por el Ministerio del Medio Ambiente (2011), ya que en el aporte de las fuentes industriales no se están incluyendo los procesos sin combustión y en las fuentes residenciales se utilizaron factores de emisión que incluyen la mala utilización de los equipos. A partir

de esta actualización, el aporte relativo de las fuentes residenciales e industriales (combustión y procesos sin combustión) al total de fuentes emisoras (residenciales, industriales, transporte, quemadas, fugitivas y areales) sería de 52.8 % y 35.3 %, respectivamente.

Es importante mencionar que se manifiesta una gran dispersión en los valores obtenidos para los indicadores de costo-efectividad de las fuentes residenciales. Esto tiene relación directa con el consumo de leña declarado por los hogares en la encuesta CASEN (2006), el cual presenta una gran variabilidad, lo que afecta la estimación de las emisiones. Para consumos de leña relativamente bajos (menores a 100 kg/año), el valor del indicador tiende a ser extremadamente alto. Por el contrario, para consumos de leña relativamente altos (mayores a 5000 kg/año) el valor del indicador tiende a ser extremadamente bajo. Además, gran parte de las emisiones está concentrada en un pequeño número de fuentes residenciales, ya que un 16 % del total de fuentes residenciales explica el 70 % de las emisiones de PM₁₀.

Se obtuvieron dos indicadores de costo-efectividad para cada fuente residencial con el propósito de calcular los costos de las opciones tecnológicas de recambio a partir de dos enfoques. Bajo el primero los resultados mostraron que los hogares con distintas características (relacionadas con el consumo de leña y la superficie a calentar) presentaron indicadores de costo-efectividad más bajos para equipos de calefacción de leña más eficientes. Esto se explica por el bajo precio de la leña que se traduce en un bajo costo de operación. La utilización de estas tecnologías permite reducir hasta 7260 ton/año de PM₁₀ lo que corresponde al 78.1 % de las emisiones residenciales.

Otro resultado relevante es que muchos costos e indicadores de costo-efectividad resultaron negativos para las opciones de recambio. Es decir se generó un ahorro de costos en los hogares bajo un programa de recambio porque el gasto en leña disminuye debido a la mayor eficiencia de los nuevos equipos, siendo

este ahorro menor al costo anual de adquirir un nuevo equipo. En particular, el valor de los indicadores de costo-efectividad es negativo para el 20.2 % de las fuentes residenciales, las cuales manifiestan un consumo superior a los 3000 kg de leña/año y una superficie a calentar promedio de 39 m². Además, a medida que la superficie de las fuentes residenciales aumenta se obtienen indicadores de costo-efectividad más bajos con equipos que poseen una mayor potencia. En el **cuadro I** se presentan las opciones tecnológicas escogidas por los hogares al aplicar el primer enfoque para estimar los costos.

Como se mencionó previamente, los indicadores de costo-efectividad presentan una gran dispersión. Sin embargo, si se restringen los hogares a aquellos que tengan un consumo entre 3000 y 4000 kg de leña/año, rango cercano al consumo promedio de los hogares (3532 kg de leña), el valor promedio de los indicadores es de -443581 Ch\$/ton reducida. Lo que demuestra que para los hogares con un consumo de leña cercano al promedio la opción de recambio a un equipo de leña más eficiente genera un ahorro significativo de costos.

Bajo el segundo enfoque, al comparar los indicadores de costo-efectividad para cada una de las fuentes residenciales, si bien la mayoría de éstas presenta indicadores más bajos con equipos que utilizan leña como combustible, existen algunos hogares que presentan menores indicadores con equipos que utilizan electricidad y parafina. Esto se explica porque los costos dependen principalmente del consumo energético manifestado por los hogares. Por lo que para consumos bajos de leña el precio anual de los equipos resulta ser muy relevante. En este sentido, los equipos de parafina y electricidad tienen los menores costos de inversión en comparación con equipos que utilizan otros combustibles. Al igual que en el enfoque anterior, se presentan costos e indicadores de costo-efectividad negativos por grupos de hogares (cada hogar por su factor de expansión). Estos indicadores negativos se aprecian en el 27.2 % de las fuentes residenciales, las cuales declaran

CUADRO I. OPCIONES TECNOLÓGICAS ESCOGIDAS POR FUENTES RESIDENCIALES BAJO EL PRIMER ENFOQUE

Combustible	Modelo	Potencia (Kw)	Núm. de fuentes residenciales	Consumo promedio (kg/año)	Superficie promedio a calentar (m ²)
Leña	Fuego	5	69 504	3765	25.7
Leña	Pyrus	6	24 210	3397	46.3
Leña	Aarhus-II	7	20 989	2780	61.3
Leña	i-2020	8	12 788	3923	71.3
Leña	Vestre	10	10 476	3205	97.5

CUADRO II. OPCIONES TECNOLÓGICAS ESCOGIDAS POR FUENTES RESIDENCIALES BAJO EL SEGUNDO ENFOQUE

Combustible	Modelo	Potencia (watts)	Núm. de fuentes residenciales	Consumo promedio (kg/año)	Superficie promedio a calentar (m ²)
Leña	Fuego	5 000	67 978	1 547	45.4
Leña	Pyrus	6 000	5 889	5 707	37.7
Leña	Aarhus-II	7 000	6 975	5 883	42.2
Leña	i-2020	8 000	4 436	8 957	39.0
Leña	Vestre	10 000	8 543	18 109	43.5
Parafina	OC-95TS	2 675	34 538	401	43.5
Electricidad	MGF-1610	1 200	9 608	98	37.9

un consumo promedio de 6557 kg de leña/año y una superficie a calentar promedio de 42 m². En el **cuadro II** se presentan las opciones tecnológicas escogidas por los hogares al aplicar el segundo enfoque para estimar los costos.

En este caso se aprecia una relación inversamente proporcional entre la superficie de los hogares y la potencia de los equipos, ya que bajo este enfoque adquiere una mayor importancia el consumo energético declarado por los hogares. Así, a medida que el consumo de combustible aumenta, se presentan indicadores de costo-efectividad más bajos con equipos que presentan una mayor potencia. En este sentido, equipos que utilizan parafina y electricidad como combustible presentan indicadores más bajos en hogares que declaran consumos bajos de leña. Con este enfoque se podrían reducir 8216 ton/año de PM₁₀, lo que corresponde al 88.4 % de las emisiones totales de las fuentes residenciales. El valor promedio de los indicadores de costo-efectividad es -551 310 Ch\$/ton reducida para aquellos hogares que consumen entre 3000 y 4000 kg de leña/año. Lo que demuestra que compensar a los hogares en términos energéticos es más atractivo económico que compensarlos por el periodo frío de seis meses y la superficie a calentar⁷.

Cabe destacar que bajo el primer enfoque las emisiones se calculan con base en la leña requerida para mantener el calefactor encendido por ocho horas durante seis meses, mientras que en el segundo enfoque las emisiones se calculan con base en la cantidad de leña declarada por los hogares. Por lo anterior,

el potencial máximo de reducción de emisiones es distinto en los **cuadros III y IV**.

Para las fuentes industriales la tecnología que presenta los indicadores más bajos de costo-efectividad en la mayoría de los casos corresponde a la de multiciclón. Por otra parte, para las fuentes industriales que no poseen combustible (o este es desconocido) la única opción técnicamente factible es el filtro de mangas (**Cuadro V**).

Las fuentes que utilizan carbón o leña como combustible tienden a tener indicadores de costo-efectividad más bajos debido principalmente a que las emisiones de PM₁₀ son mayores. Las fuentes que no utilizan combustible o este es desconocido, presentan indicadores muchos más altos debido a que la mayoría de ellas presenta emisiones relativamente menores. La utilización de estas tecnologías permite reducir un total de 2505 ton/año de PM₁₀, lo que corresponde a un 81.8 % del total de emisiones provenientes de las fuentes industriales consideradas en el estudio.

Para evaluar las opciones tecnológicas que se deberían implementar al combinar las fuentes industriales y residenciales se ordenaron de menor a mayor los indicadores de costo-efectividad de cada fuente. De esta forma al definir diferentes metas globales de reducción por parte de la autoridad reguladora, las fuentes a las cuales les sea más barato disminuir sus emisiones en primera instancia podrán implementar la opción tecnológica escogida. Esto permite analizar los impactos asociados a la inclusión de las fuentes residenciales en los costos agregados de regulación.

⁷ Si el consumo real de leña es distinto al declarado por el hogar, este resultado podría modificarse. En particular, si el consumo real de leña fuera mayor (menor) que el estimado, el ahorro podría ser más (menos) significativo, lo anterior ocurre porque los costos varían relativamente menos que las emisiones reducidas. En la zona de estudio la mayoría de las ventas de leña se realizan en el comercio informal (sobre un 90 % según UDT 2005), por lo cual no hay registro contable y resulta difícil conocer con precisión el consumo de leña a partir de boletas o facturas de venta. No obstante, lo relevante es que bajo ambos enfoques se concluye que existen pérdidas de eficiencia económica y ambiental al mantener los equipos actuales.

CUADRO III. COSTOS Y FUENTES INVOLUCRADAS EN DISTINTAS METAS DE REDUCCIÓN BAJO EL PRIMER ENFOQUE UTILIZADO PARA EL RECAMBIO DE ARTEFACTOS

Meta de reducción (%)	Emisiones reducidas (ton/año)	Emisiones finales (ton/año)	Costo de reducción (Ch\$/ton)	N.º de fuentes industriales	N.º de recambio de calefactores
0	0	12 357.30	-	-	-
10	1 233.36	11 123.94	-4213 075	0	2 934
20	2 463.55	9 893.45	-3718 097	0	6 478
30	3 703.32	8 853.98	-3282 680	0	11 145
40	4 939.50	7 417.80	-2862 488	0	20 995
50	6 177.81	6 179.49	-2171 400	0	45 850
60	7 379.24	5 978.06	-1023 289	18	55 372
70	8 564.29	3 793.01	58 944	63	66 592
79	9 766.00	2 591.30	1998 568	208	137 967

CUADRO IV. COSTOS Y FUENTES INVOLUCRADAS EN DISTINTAS METAS DE REDUCCIÓN BAJO EL SEGUNDO ENFOQUE DE ESTIMACIÓN DE COSTOS

Meta de reducción (%)	Emisiones reducidas (ton/año)	Emisiones finales (ton/año)	Costo de reducción (Ch\$/ton)	N.º de fuentes industriales	N.º de recambio de calefactores
0	0	12 357.30	-	-	-
10	1 195.68	11 161.62	-1861 997	0	4 484
20	2 458.38	9 898.92	-1659 336	0	6 880
30	3 692.43	8 664.87	-1558 419	0	14 266
40	4 929.49	7 427.81	-1297 513	0	38 463
50	6 162.31	6 194.99	-1007 603	0	43 868
60	7 412.67	4 944.63	-754 398	0	67 677
70	8 561.52	3 795.78	-209 221	16	119 536
80	9 693.66	2 663.64	432 482	56	131 217
86.7	10 722.35	1 634.95	1287 994	208	137 697

CUADRO V. TECNOLOGÍAS DE ABATIMIENTO ESCOGIDAS POR FUENTES INDUSTRIALES

Tecnología	N.º de fuentes	Porcentaje (%)	Tipo de combustible
Ciclón	0	0	-
Multiciclón	140	67.3	Leña, carbón, petróleo N°2, N°5, N°6
Filtro de mangas	43	20.7	Sin combustible/ No identificado, petróleo N°6
Lavador Venturi	25	12.0	Leña, petróleo N°5, N°6
Precipitador electroestático	0	0	-

Además, se pueden establecer las metas de reducción bajo las cuales es atractivo para las industrias utilizar mecanismos de compensación para disminuir sus emisiones y no tener que instalar tecnologías de abatimiento.

Bajo el primer enfoque se observa que hasta una meta de reducción del 60 % se presenta un ahorro de costos agregados. También es posible notar que hasta una meta de reducción del 50% sólo participan fuentes residenciales.

Si se aplica el segundo enfoque de recambio se incrementa a 10 772 ton/año la cantidad total de emisiones que se podría reducir. De forma similar al enfoque anterior, hasta una meta del 60 % sólo participan fuentes residenciales y hasta una meta del 70 % se presenta un ahorro de costos agregados al implementar las distintas opciones tecnológicas.

A partir de ambos enfoques se demuestra desde una perspectiva económica que si se requiere reducir emisiones es más atractivo regular las fuentes residenciales que las fuentes industriales. También se concluye que si sólo se regulan fuentes industriales la inclusión de las fuentes residenciales en mecanismos de compensación que permitan reducir las emisiones de PM₁₀ tiene un impacto considerablemente significativo en disminuir los costos de cumplimiento regulador. Los resultados permiten concluir que los hogares deberían cambiar por sí solos sus equipos

de calefacción, incluso si no existe regulación. Esta conclusión es valida si los hogares tienen información sobre la eficiencia, consumo y ahorro potencial de los equipos disponibles en el mercado, así como también, si poseen los recursos suficientes para adquirirlos.

No obstante, a pesar del potencial de ahorro los hogares podrían no estar dispuestos a cambiar sus equipos, ya sea por la incomodidad que significa instalar el nuevo aparato, cambiar de combustible, tener restricción de recursos o simplemente no sentir la necesidad de hacerlo. De presentarse este escenario, no se podría reducir el potencial estimado de emisiones. Por lo tanto, una alternativa es brindarle a las fuentes residenciales un incentivo monetario adicional al costo que implica cambiar los equipos. Específicamente, se analiza cómo varían los costos y fuentes asociadas a distintas metas de reducción considerando un incentivo monetario de Ch\$500 000 y Ch\$1000 000.

Para ambos enfoques es posible apreciar un aumento significativo en los costos de reducir las emisiones al incluir los incentivos monetarios para los hogares. Se puede apreciar que a diferencia del enfoque inicial, al incluir un incentivo de Ch\$500 000 se observan ahorros de costos hasta metas del 30 % al 40 % y para un incentivo de Ch\$1000 000 se tienen ahorros de costos hasta metas de reducción del 20 % al 30 %. Además, a diferencia de la situación inicial en la cual hasta metas de reducción del 50 % al 60 % sólo participaban recambios para fuentes residenciales. Al incluir los incentivos monetarios, el aporte residencial para la reducción se hace menor y las tecnologías de abatimiento para fuentes industriales comienzan a aportar en metas de reducción del 30 % al 40 %.

En ambos enfoques es posible apreciar que hasta una meta de reducción del 30 % para las fuentes industriales, es económicamente más conveniente aplicar un programa de recambio como una medida de compensación de emisiones, en lugar de invertir en una tecnología de abatimiento que permita reducirlas. De esta forma, a pesar del aumento en los costos que implica añadir incentivos monetarios a las fuentes residenciales, su inclusión en mecanismos que permitan reducir las emisiones de PM₁₀ sigue siendo importante.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que para un amplio rango de metas reguladoras (50 % al 60 % del total de emisiones) es económicamente eficiente que

sólo participen fuentes residenciales, ya que incluso estas metas podrían lograrse sin costos agregados de cumplimiento. Lo anterior se explica porque para un 20 % de las fuentes residenciales el costo anual que implica utilizar sus actuales equipos de calefacción de leña es superior al costo que implicaría adquirir un nuevo equipo y mantenerlo en operación. Específicamente, los equipos que serían seleccionados para el recambio corresponderían a equipos de leña más eficientes (no disponibles aún en el mercado nacional), aunque para algunos hogares los artefactos de parafina y de electricidad son una alternativa atractiva.

Por lo anterior, en la medida que las opciones de recambio se encuentren disponibles en el mercado, que los hogares tengan conocimiento del ahorro que significa cambiar los equipos y además que no haya restricciones de liquidez para poder adquirirlos, entonces las fuentes residenciales deberían cambiarse por sí solas sin la necesidad de que las fuentes industriales realicen mecanismos de compensación de emisiones. Es decir, se podría disminuir una gran cantidad de emisiones sin la necesidad de regular el sector industrial. No obstante, si los hogares no poseen los recursos para costear el cambio también sería ambiental y económicamente atractivo que el Estado financiera programas de recambio masivo, incluyendo a los hogares que presenten indicadores de costo-efectividad más atractivos.

Como alternativa, si por razones políticas, legales o por facilidad de fiscalización, la autoridad reguladora estableciera metas de reducción sólo para las fuentes industriales, sería económicamente más conveniente para ellas realizar un programa de recambio de calefactores en lugar de invertir en tecnologías de abatimiento. La compensación de emisiones industriales seguiría siendo una opción atractiva, incluso si se entregase un incentivo monetario extra a los hogares para facilitar el recambio de calefactores.

REFERENCIAS

- Alegría M., Mardones C. y Jiménez J. (2013). Reduction of PM₁₀ emissions under scenarios of regulation and availability of natural gas in the Bio Bio region, Chile. Energy Environ. 24, 1031-1042.
- Calfucura E., Coria J. y Sánchez J. M. (2009). Permisos comerciables de emisión en Chile. Lecciones, desafíos y oportunidades para países en desarrollo. Trimestre Econ. LXXVI 304, 1027-1069
- Chávez C. A., Stranlund J. K. y Gómez W. (2011). Controlling urban air pollution caused by households:

- Uncertainty, prices, and incomes. *J. Environ. Manage.* 96, 2746-2753.
- Hartman R. S., Wheeler D. y Singh M. (1997). The cost of air pollution abatement. *Appl. Econ.* 29, 759-774.
- CONAMA (2005). Informe de Gestión de la Calidad del Aire Gran Concepción. Comisión Nacional del Medio Ambiente [en línea]. <http://www.coronel.cl/wp-content/uploads/2010/06/Informe-gestion-de-la-calidad-del-aire-en-gran-concepcion.pdf> 06/06/2014
- IIT-UDEC (2013). Diagnóstico de la calidad del aire y medidas de descontaminación en Talca y Maule. Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad de Concepción. Informe. Concepción, Chile, 131 pp.
- Kandlikar M., Marshall J. D. y Grieshop A. P. (2011). Health and climate benefits of cookstove replacement options. *Energ. Policy.* 39, 7530-7542.
- Ministerio del Medio Ambiente (2010). Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente de Chile Título I Disposiciones Generales. Diario Oficial de Chile. 26 de enero de 2010.
- Ministerio del Medio Ambiente (2011). Anteproyecto del plan de prevención atmosférico para las comunas del Concepción Metropolitano. Informe Final. Santiago, Chile, 48 pp.
- Saldiva P. y Miraglia S. (2004). Health effects of cookstove emissions. *Energy Sustain. Dev.* 8, 13-19.
- OECD (2013). OECD Economic Surveys: Chile 2013. Organisation for Economic Co-operation and Development. Informe. París, Francia 24 pp.
- O’Ryan R. y Bravo R. (2001). Permisos transables frente a la introducción de un combustible limpio: estudio de caso para PM-10 y NO_x en Santiago, Chile. *Estud. Econ.* 28, 267-291.
- Ponce R. y Chávez C. (2005). Costos de cumplimiento de un sistema de permisos de emisión: Aplicación a fuentes fijas en Talcahuano, Chile. *Trimest. Econ.* LXXII, 288, 847-876.
- Pope C. y Dockery D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 56, 709-742.
- UDT (2005). Análisis del Mercado de la Leña y Carbón en el Gran Concepción, Etapa I.. Unidad de Desarrollo Tecnológico. Informe. Concepción, Chile, 44 pp.
- Schmalensee R. y Stavins R. (2013). The SO₂ allowance trading system: The ironic history of a grand policy experiment. *J. Econ. Perspect.* 27, 103-22.
- Stavins R. (2003). Experience with market-based environmental policy instruments. En: *Handbook of Environmental Economics.* (M. Karl-Göran, V. Jeffrey, Eds.).

ANEXO

CUADRO A1. ARTEFACTOS DE CALEFACCIÓN PRIORIZADOS PARA LOS PROGRAMAS DE RECAMBIO

Marca	Modelo	Combustible	Potencia (Kw)	Consumo	Superficie de calefacción (m ²)	Costo anual del equipo (Ch\$)	Costo de operación anual (Ch\$)	Costo (Ch\$/m ²)
Sindelen	EP-6000	Parafina	2.4	0.23	26	8 178.05	325 271.52	20688.49
Ocarina	OC-95TS	Parafina	2.7	0.28	35	5 732.32	395 982.72	17 046.11
Sindelen	EP10000M	Parafina	5.0	0.491	75	16 730.32	694 383.98	25 988.77
Sumo Heat	SH-230	Parafina	6.8	0.6	140	21 478.29	848 534.40	27 539.25
Toyotomi	TF Laser-73	Parafina	9.6	1.08	190	232 873.73	1 527 361.92	240 912.48
Elko	EH-4200	Gas licuado	4.2	0.319	28	10 730.19	784 905.30	87 932.33
Sindelen	SR-6200 PT	Gas licuado	3.7	0.269	35	12 203.57	645 858.24	86 578.09
UrsusTrotter	LM-4200T	Gas licuado	4.4	0.264	53	14 231.38	633 853.44	91 404.50
Magefesa	MGF-1610	Electricidad	1.2	1.2	16	3 439.87	258 446.41	19 592.77
Heat Storm	HS-1000-WX	Electricidad	1.0	1	30	14 241.41	214 959.96	21 406.74
Biosmart	BIO 1500 PB	Electricidad	1.5	1.5	45	40 355.01	349 635.24	48 124.69
Hasssohn	Catania-RLU	Pellet	8.0	1.64	72	145 177.50	475 390.08	151 780.14
Bosca	Spirit	Pellet	10.0	2.04	110	75 873.26	591 338.88	81 249.07
Bosca	Turbo	Pellet	9.0	1.84	100	56 619.22	533 364.48	61 952.87
HassSohn	Pyrus	Leña	6.0	1.48	53	61 777.66	147 336.96	64 557.60
HassSohn	i-2020	Leña	8.0	1.97	72	65 896.17	196 117.44	68 620.02
HassSohn	Aarhus-II	Leña	7.0	1.72	65	63 836.91	171 229.44	66 471.21
HassSohn	Fuego	Leña	5.0	1.23	40	59 718.40	122 448.96	62 779.63
HassSohn	Vestre	Leña	10.0	2.45	110	70 014.68	243 902.40	72 231.97

CUADRO A2. EJEMPLO DE INDICADORES DE COSTO-EFECTIVIDAD PARA HOGARES REPRESENTATIVOS

ID Fuente Residencial	Hogar											
	1	43	54	68	89	97	569	584	610	659	739	
Consumo kg/año/hogar	578	3600	5000	2256	9000	1500	7000	3000	18000	3700	1880	
Factor de expansión núm. hogares	201	223	191	199	190	190	80	73	112	102	134	
Ton PM ₁₀ /año/núm. hogares	3.4	23.7	20.0	7.2	27.5	8.4	11.7	4.6	42.2	11.1	7.4	
(\$)												
Costo MM\$/ton PM ₁₀ cambio a parafina	EP-6000	54.9	0.8	3.0	22.7	0.3	5.0	3.4	7.1	-2.4	15.6	15.3
	OC-95TS	43.7	1.4	0.5	17.4	1.2	6.6	2.1	3.0	-2.2	15.7	11.8
	EP-6500	45.6	1.5	0.7	18.3	-1.4	6.9	2.3	3.3	-2.2	12.7	12.4
	EP10000M	38.4	4.2	3.4	14.9	0.6	13.4	1.5	7.8	-1.4	10.4	10.2
	SH-230	47.4	5.7	4.8	19.2	1.6	16.9	2.5	10.2	-1.0	13.2	13.0
	TF Laser-73	95.9	13.5	12.7	41.9	7.3	35.5	8.2	23.4	1.2	13.0	27.9
Costo MM\$/ton PM ₁₀ cambio gas licuado	EH-4200	137.3	5.2	11.9	61.4	6.7	15.6	13.0	22.0	-1.1	41.3	40.6
	SR-6200 PT	74.6	3.9	3.0	31.9	4.8	12.5	5.7	7.2	-1.5	27.7	21.3
	LM-4200T	73.3	3.8	2.9	31.3	0.2	12.3	5.5	7.0	-1.5	15.4	21.0
Costo MM\$/ton PM ₁₀ cambio electricidad	MGF-1610	77.8	4.1	6.5	42.9	2.9	13.1	8.4	7.6	-1.4	25.9	28.5
	HS-1000-WX	51.3	0.6	2.6	21.0	0.0	4.6	3.0	6.4	-2.4	11.7	14.2
	BIO 1500 PB	47.8	1.7	0.8	19.3	-1.3	7.4	2.6	3.5	-2.1	13.4	13.1
Costo MM\$/ton PM ₁₀ cambio pastilla	Catania-RLU	34.7	3.5	2.7	13.6	-0.1	11.9	0.9	6.8	-1.8	9.2	9.0
	Spirit	38.2	4.1	3.3	15.4	0.3	13.2	1.3	7.8	-1.6	10.3	10.1
	Turbo	33.6	3.4	2.5	13.1	-0.2	11.5	0.8	6.5	-1.8	8.8	8.6
Costo MM\$/ton PM ₁₀ cambio D.S. 39*	Pyrus	25.8	-0.5	-1.8	10.1	-4.2	2.7	-0.7	-0.1	-3.6	3.9	6.0
	i-2020	15.1	0.1	-1.1	4.0	-3.7	4.1	-2.0	1.0	-3.4	2.8	2.7
	Aarhus-II	13.3	-0.2	-1.4	12.2	-4.0	3.4	-0.2	0.5	-3.5	4.7	7.1
	Fuego	22.1	-0.8	-2.1	8.0	-2.7	2.0	-1.1	-0.6	-3.7	5.0	4.9
	Vestre	18.7	0.7	-0.5	6.1	-3.2	5.5	-1.6	2.1	-3.3	3.9	3.8
Menor indicador MM\$/ton PM ₁₀		13.3	-0.8	-2.1	4.0	-4.2	2.0	-2.0	-0.6	-3.7	2.8	2.7
Tecnología y Modelo Escogida	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	DS 39	
	Aarhus-II	Fuego	Fuego	i-2020	Pyrus	Fuego	i-2020	Fuego	i-2020	Fuego	i-2020	

* Equipos que cumplen con los exigentes requerimientos de emisión del Decreto Supremo N° 39

CUADRO A3. EJEMPLO DE INDICADORES DE COSTO-EFECTIVIDAD PARA FUENTES INDUSTRIALES

ID Fuente		ind11	ind24	ind28	ind31	ind44	ind56	ind78	ind80	ind93	ind95	ind165
Combustible utilizado		Carbón	Pet. N°6	Leña	Carbón	Pet. N°6	Pet. N°6	Leña	Pet. N°6	Carbón	Leña	Pet. N°5
Ton PM ₁₀ /año		133.4	30.7	25.2	9.9	15.9	10.6	5.3	4.9	1.6	3.4	1.0
Costo MM\$/ton PM ₁₀	Ciclón	\$ 8.4			\$ 8.4					\$ 8.4		
en fuentes de carbón	M. Ciclón	\$ 4.4			\$ 4.4					\$ 4.4		
	F. Mangas	\$ 7.3			\$ 10.0					\$ 21.0		
	L. Venturi	\$ 4.7			\$ 9.1					\$ 25.7		
	Prec. Elect.	\$ 9.7			\$ 19.9					\$ 40.9		
Costo MM\$/ton PM ₁₀	Ciclón		\$ 18.4				\$ 18.4			\$ 18.4		
en fuentes de leña	M. Ciclón		\$ 6.1				\$ 6.1			\$ 6.1		
	F. Mangas		\$ 8.5				\$ 12.0			\$ 14.2		
	L. Venturi		\$ 7.1				\$ 13.3			\$ 16.9		
	Prec. Elect.		\$ 15.2				\$ 25.5			\$ 30.1		
Costo MM\$/ton PM ₁₀	Ciclón	\$ 55.3			\$ 55.3	\$ 55.3				\$ 55.3		
en fuentes de petróleo N°6	M. Ciclón	\$ 10.2			\$ 10.2	\$ 10.2				\$ 10.2		
	F. Mangas	\$ 8.2			\$ 9.1	\$ 9.8				\$ 12.3		
	L. Venturi	\$ 6.9			\$ 8.5	\$ 9.9				\$ 14.2		
	Prec. Elect.	\$ 14.5			\$ 17.6	\$ 20.1				\$ 26.4		
Costo MM\$/ton PM ₁₀	Ciclón									\$ 55.3		
en fuentes de petróleo N°5	M. Ciclón									\$ 10.2		
	F. Mangas									\$ 27.9		
	L. Venturi									\$ 39.9		
	Prec. Elect.									\$ 52.2		
Indicador menor MM\$/ton PM ₁₀		\$ 4.4	\$ 6.9	\$ 6.1	\$ 4.4	\$ 8.5	\$ 9.8	\$ 6.1	\$ 10.2	\$ 4.4	\$ 6.1	\$ 10.2
Tecnología de captación escogida		M. Ciclón	L. Venturi	M. Ciclón	M. Ciclón	L. Venturi	F. Mangas	M. Ciclón				