

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS Y ADMINISTRATIVAS
MAGISTER EN ECONOMIA DE RECURSOS NATURALES Y DEL MEDIO
AMBIENTE



ANALIZANDO INSTRUMENTOS PARA EL CONTROL DE LA
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA CON INFORMACIÓN INCOMPLETA Y
COSTOS DE MONITOREO: UNA SIMULACIÓN PARA EL CASO DE
SANTIAGO DE CHILE

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias
Económicas y Administrativas de la Universidad de
Concepción para optar al Grado Académico de
Magíster en Economía de Recursos Naturales y del
Medio Ambiente.

Prof. Guía: Carlos Chávez R., Ph.D.
Prof. Co-Guía: Mauricio G. Villena, Ph.D.

GASPARD CLERGER

2008

**A MI QUERIDA FAMILIA,
Especialmente a mi mamá, GRAZELA
“Su valentía no tiene precio”**

**A LA NACION HAITIANA
“Juntos podemos”**

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos van a:

- *South-South Cooperation Scholarship Program CARICOM Members States, vía Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCI) por haberme permitido la realización de mis estudios de maestría.*
- *CONICYT-Fondecyt Chile por su apoyo financiero a tésistas de postgrado, a través del Proyecto Fondecyt No 1060679, “Política Ambiental con Costos de Fiscalización”, Investigador Responsable: Carlos Chávez.*
- *Mi mamá; mis hermanos: Kris, Marquis; mis hermanas: Ketlène, Mimose, Odette porque aún estuvieron lejos, siempre he sentido su apoyo y cariño.*
- *Kétia por su paciencia incondicional y su apoyo moral.*
- *Todos los profesores del programa MERNYMA, en especial a los profesores Carlos Chávez (Profesor guía), Mauricio Villena (Profesor Co-Guía).*
- *Profesor Walter Gómez (Universidad de la Frontera / Temuco), Integrante de la comisión, por su excelente colaboración y apoyo en el desarrollo de esta investigación.*
- *SESMA (Martha Zamudio, Roberto Condori), por la disposición a proporcionar la información utilizada en esta investigación.*
- *Dominga por su constante ayuda y su orientación positiva en todo este tiempo*
- *Mis amigos y compañeros de generación: Gabriel, Erick, Marco; no fueron muchos por eso fue más significativa su compañía y cercanía durante mis estudios en Chile.*

RESUMEN

El objetivo principal de la presente investigación es realizar un análisis numérico comparativo entre un sistema de permisos de emisión transferibles y un sistema de estándares de emisión individuales, considerando la posibilidad de incumplimiento de parte de las fuentes que participan en cada uno de los sistemas de regulación y la consecuente necesidad de fiscalizar para inducir cumplimiento.

Nuestro trabajo se diferencia de la mayoría de la literatura existente porque incorpora en el análisis los costos de las acciones requeridas para inducir cumplimiento (costos de fiscalización). Adicionalmente, se presenta una discusión sobre las estrategias de fiscalización para inducir perfecto cumplimiento bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta.

Esta investigación se basa en el modelo teórico desarrollado por Chávez, Villena y Stranlund (2007), considerando las fuentes fijas reguladas durante el año 2006 bajo el Programa de Compensación de emisiones de PM10 (PCE) de Santiago de Chile, establecido por el Decreto Supremo 4 (DS-4) de marzo de 1992.

Nuestros resultados revelan que un SPET permite lograr el perfecto cumplimiento al mínimo costo de abatimiento. Sin embargo, un SPET no minimiza los costos de fiscalizaciones. Bajo supuesto de información completa, un sistema de estándares de emisión asegura el perfecto cumplimiento al mínimo costo de fiscalización pero fiscalizar un SPET es más barato que un sistema de estándares de emisión con información incompleta. Entre la política de regulación directa, el costo de cumplimiento (costo de abatimiento más costo de fiscalización) de un estándar de emisión con información completa es menos que el de un estándar de emisión con información incompleta. En términos de costos de cumplimiento, el instrumento de mercado es más barato que el instrumento de comando y control. Los cambios en los parámetros utilizados en las simulaciones no han afectado mayormente los resultados anteriores.

Palabras clave: *Política Ambiental en Chile, Eficiencia Económica, Costos de fiscalización.*

ABSTRACT

The main aim of this research is to perform a numeric analysis comparing a transferable emissions permit system and a system of firm specific emissions standards, considering the possibility of no-compliance from the sources which participate in each regulatory system and the consequence of the need to enforce for inducing compliance. Our work, unlike most of the existing literature, incorporates in this analysis the costs of actions required to induce compliance (enforcement costs). Additionally, it presents a discussion about enforcement strategies to induce perfect compliance under a system of emissions standards with incomplete information.

This investigation is based on the theoretical model developed by Chávez, Villena y Stranlund (2007), considering the case of sources regulated during 2006 under the Santiago's Emission Compensation Program for particulate matter emissions, established under Supreme Decree 4 (DS-4), March 1992.

Ours results show that a transferable emissions permit system (TEPS) allows achieving the perfect compliance at minimum abatement cost. However, a TEPS does not minimize enforcement costs. Under hypothesis of complete information, a system of emissions standards assures perfect compliance at minimum enforcement cost but enforcing a TEPS is cheaper than a system of emissions standards with incomplete information. Between direct regulation instruments, compliance cost (abatement cost and enforcement cost) of a system of emissions standards with complete information is less than that of a system of emissions standards with incomplete information. In terms of compliance cost, the market instrument is cheaper than command and control instrument. The changes in parameters used in the simulations have not affected strongly the previous results.

Keywords: environmental policy in Chile, economic efficiency, enforcement costs

INDICE

1.- INTRODUCCION	1
2.- REVISION BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.- Costo-efectividad de los instrumentos de control en Chile	5
2.2.- Algunos trabajos teóricos y empíricos sobre el diseño de fiscalización.....	6
2.3.- Políticas Ambientales con Costos de Fiscalización e Información Incompleta ..	8
3.- MARCO TEORICO.....	10
3.1.- Cumplimiento individual de las firmas reguladas	10
3.2.- Estrategias de fiscalización.....	12
3.2.1.- Fiscalización costo-efectiva.....	12
3.3.- Costos de fiscalización	13
3.4.- Costos de programa	14
4.- METODOLOGÍA.....	16
4.1.- Caracterización de las fuentes (PCE-2006).....	16
4.2.- Costos de abatimiento para PM10	19
4.3.- Simulaciones.....	21
4.3.1.- Sistema de permisos de emisión transferibles (SPET)	21
4.3.2.- Estándares de emisión	22
4.3.3.- Sistema de fiscalización	23
4.3.3.1.- <i>SPET</i>	23
4.3.3.2.- <i>Estándares de emisión</i>	24
5.- RESULTADOS	26
5.1.- Antecedentes.....	26
5.2.- Costos agregados de abatimiento según la política considerada	26
5.3.- Costos agregados de fiscalización según la política considerada.....	28
5.4.- Costos agregados de cumplimiento según política.....	30
5.5. Análisis de sensibilidad	31
5.5.1.- Cambios en metas ambientales.....	31
5.5.2.- Cambios en costos de abatimiento.....	34
5.5.3.- Cambios en Factor de Sanción	35
5.5.4.- Cambios en número de fuentes reguladas	36
6.- CONCLUSIONES	38
REFERENCIAS.....	40
ANEXOS.....	43

INDICE DE TABLAS

- Tabla 4.1: Fuentes participando en el PCE al año del 2006*
- Tabla 4.2: Comparativo de las características de las fuentes participando en el PCE: 1999 y 2006*
- Tabla 4.3: Funciones de Costos para Santiago (\$ año 2006)*
- Tabla 5.1: Parámetros de costos de fiscalización*
- Tabla 5.2: Resultados de la implementación del SPET*
- Tabla 5.3: Resultados de la implementación del estándar de emisiones*
- Tabla 5.4: Costo de fiscalización SPET*
- Tabla 5.5. Costo de fiscalización del estándar con información perfecta*
- Tabla 5.6. Costo de fiscalización del estándar con información incompleta*
- Tabla 5.7. Costos agregados de cumplimiento*
- Tabla 5.8. Cambios en metas*
- Tabla 5.9. Cambios en costos de abatimiento*
- Tabla 5.10. Cambios en facto de sanción*
- Tabla 5.11. Cambio en número de fuentes reguladas*
- Tabla 5.12. Efectos de cambio en número de fuentes reguladas*

INDICE DE FIGURAS

- Gráfico 5.1.- Costos agregados de fiscalización, Según meta ambiental*
- Gráfico 5.2.- Costos agregados de cumplimiento, Según meta ambiental*

INDICE DE ANEXOS

- Anexo 1: Detalle de programación*
- Anexo 2: Eficiencia de Reducción de emisiones de PM10*
- Anexo 3: Detalle de simulaciones de SPET*
- Anexo 4: Detalle de simulaciones de EE*
- Anexo 5: Cambios en metas ambientales*
- Anexo 6: Cambios en costos de abatimiento*
- Anexo 7: Cambios en Factor de sanción*
- Anexo 8. Cambio en número de fuentes reguladas*

1.- INTRODUCCION

Los instrumentos para el control de contaminación atmosférica son agrupados usualmente en dos categorías: (1) instrumentos basados en incentivos económicos, (2) instrumentos de regulación directa o comando y control. Los instrumentos basados en incentivos económicos incluyen, principalmente, los impuestos a las emisiones, los subsidios al abatimiento, los permisos de emisiones y los permisos ambientales. La categoría de los instrumentos de regulación directa, por su parte, está compuesta de los estándares a las emisiones, los estándares tecnológicos y los estándares a la concentración del contaminante en el medio receptor.

Uno de los instrumentos económicos disponibles para el control de contaminación más innovadores, es el sistema de permisos de emisión transferibles (SPET). Este instrumento económico depende de la creación y funcionamiento de un mercado. En este sistema, el regulador crea permisos de emisión, los asigna a las fuentes bajo regulación y permite que tales permisos sean transferibles entre las fuentes reguladas. Un permiso de emisión autoriza a su tenedor a emitir una unidad de contaminante durante un periodo de tiempo determinado. Las firmas que mantienen sus niveles de emisiones bajo los niveles permitidos, típicamente aquellas cuyos costos de abatimiento son bajos, pueden vender sus permisos sobrantes a otras firmas que necesitan para emitir una cantidad superior al número de permisos que poseen. En un mercado perfectamente competitivo, el precio al cual se transa el permiso es el precio de equilibrio del mercado.

Entre el grupo de instrumentos de regulación directa o comando y control, los sistemas de estándares pueden ser considerados como los más utilizados. Sistemas de estándares incluyen aquellos de tipo tecnológico como también estándares de emisiones¹. Según el diseño de este último instrumento, el regulador ambiental, fija una meta ambiental independiente de las características de las firmas bajo regulación. Esta meta ambiental es única. Cada firma enfrenta un estándar de emisiones, debe elegir un

¹ Naturalmente, existen diversas formas de definir los estándares de emisiones, incluyendo, por ejemplo, un nivel máximo de emisión de un contaminante expresado en unidades físicas (kilos, toneladas, etc.) por periodo que no puede ser sobrepasado. Otras formas de estándares de emisión incluyen emisión máxima por unidad de producto, o incluso emisión máxima por unidad de insumo utilizada.

nivel de emisiones inferior o igual al estándar para estar en cumplimiento. Eso implica la elección de una tecnología de control de emisiones apropiada.

Para evaluar o analizar estos dos instrumentos descritos, la propiedad de costo-efectividad es uno de los criterios considerados en la literatura. Un instrumento es costo-efectivo si permite lograr una meta ambiental al mínimo costo posible. Varios trabajos han mostrado que los sistemas de permisos de emisión transferibles (SPET) permitirían a los reguladores ambientales lograr una meta ambiental al mínimo costo agregado de abatimiento. Estos trabajos han sugerido el uso de los SPET para solucionar el problema de contaminación atmosférica de manera costo-efectiva. Sin embargo, para lograr costo-efectividad; considerando fiscalización costosa, la distribución de las emisiones debería ser tal que la suma de los costos marginales de abatimiento y de monitoreo sean iguales entre las firmas (Chávez, Villena y Stranlund, 2007). Eso implicaría que un SPET sea costo-efectivo si minimice los costos agregados de cumplimiento (costos de abatimiento más costos de fiscalización).

El objetivo principal de la presente investigación es realizar un análisis numérico comparativo entre un sistema de permisos de emisión transferibles y un sistema de estándares de emisión individuales, considerando la posibilidad de incumplimiento de parte de las fuentes que participan en cada uno de los sistemas de regulación y la consecuente necesidad de fiscalizar para inducir cumplimiento. Específicamente, realizamos una simulación numérica del funcionamiento de los referidos instrumentos en el contexto de fuentes fijas bajo el Programa de Compensación de Emisiones (PCE) que emiten contaminantes en la forma de material de particulado, PM-10 en Santiago de Chile.

Para lograr el objetivo principal del trabajo, primero; hemos analizado de manera descriptiva las características particulares de las fuentes operando bajo el programa de Compensación de Emisiones (PCE) de Santiago durante el año 2006. Entre otros, se ha considerado explorar descriptivamente el estado de las fuentes y su antigüedad, el tipo de proceso, tipo de equipo que éstas emplean y el tipo de combustible utilizado en su operación. Segundo, hemos calculado y comparado mediante una simulación numérica, los costos de abatimiento, costos de fiscalización y costos de cumplimiento (abatimiento más fiscalización) para un sistema de permisos de emisión transferibles (SPET) y un sistema de estándares de emisión individuales considerando fuentes reguladas bajo el Programa de Compensación de Emisiones de Santiago. Por último, hemos estudiado a través de un análisis de sensibilidad, el

impacto sobre costos de abatimiento, costos de fiscalización, y costos de cumplimiento, de cambios en metas ambientales, cambios en costos de abatimiento, cambios en costo para hacer un monitoreo, cambios en el factor de sanción, cambio en número de fuentes reguladas, entre las políticas ambientales alternativas consideradas.

Actualmente, en la literatura se encuentran varios nuevos resultados importantes sobre cumplimiento y fiscalización de los instrumentos de control que impulsan la reexaminación de la propiedad costo-efectividad de los sistemas de permisos de emisión transferibles (SPETs). Además, dada las actuales condiciones de la calidad del aire que presenta la ciudad de Santiago de Chile, la posibilidad de ampliar el uso de SPETs forma parte de la agenda de discusión sobre política ambiental en Chile para mejorar esta crítica situación. Sin embargo, los estudios existentes sobre propiedad costo-efectividad de los instrumentos de control en Santiago no han considerado aspectos referidos a la fiscalización, y costos que dichas actividades tienen asociados². Por estas razones, se revela necesario realizar un análisis más completo de la propiedad de costo-efectividad de los SPETs, considerando los impactos de los costos de fiscalización sobre las decisiones de las fuentes fijas reguladas bajo el PCE.

Esta investigación introduce dos innovaciones con respecto a lo que han sido los estudios sobre control de la contaminación atmosférica en Santiago de Chile. Primero, se incorpora los costos de fiscalización necesarios para implementar un determinado instrumento de control de contaminación. Segundo, se estudia estrategias de fiscalización para inducir perfecto cumplimiento bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta. Estas estrategias ayudarían a los reguladores a determinar los esfuerzos de fiscalización que impedirían a las firmas explotar esta ventaja de información asimétrica sobre sus costos de abatimiento.

La tesis que se presenta de acuerdo a los requerimientos del Programa Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, está estructurada de la siguiente manera: en el capítulo 2 se revisa la literatura teórica y empírica más relevante y directamente relacionada a la investigación. En el capítulo 3 se presenta el modelo teórico considerado en el marco de esta investigación. En el capítulo 4 se detalla los aspectos metodológicos utilizados: caracterización de las fuentes fijas, funciones de costos de abatimiento. Adicionalmente, se presenta también aquí la metodología

² Con la excepción de Villegas y Chávez (2002) que cuantifican la pérdida de eficiencia de un SPET en presencia de poder de mercado y con costos de fiscalización en el caso del Programa de Compensación de Emisiones en Santiago de Chile.

utilizada en las simulaciones. En el capítulo 5 se presenta los resultados obtenidos: los costos agregados de abatimiento, los costos agregados de fiscalización y los costos agregados de cumplimiento para la situación de base y las situaciones alternativas para implementar los instrumentos de control bajo estudio. En el capítulo 6 se presenta un análisis de los resultados y las conclusiones que se obtienen a partir de este trabajo. Finalmente, el informe de tesis incluye un total de ocho anexos.

2.- REVISION BIBLIOGRÁFICA

Éste capítulo presenta una revisión de trabajos empíricos realizados en Chile y algunos trabajos teóricos que son más relevantes y están directamente asociados a nuestra investigación. Se encuentran algunos trabajos empíricos sobre la propiedad costo-efectividad de los instrumentos de control de contaminación en Chile, también se incluyen trabajos teóricos y empíricos sobre el diseño de fiscalización. Finalmente, se revisan brevemente trabajos teóricos relevantes a la investigación sobre las políticas ambientales con costos de fiscalización.

2.1.- Costo-efectividad de los instrumentos de control en Chile

La literatura sobre elección de instrumentos para el control de la contaminación atmosférica es extensa y creciente. Sin embargo, dichas investigaciones abundan en países desarrollados, en tanto que para países en vías de desarrollo la investigación en esta área es aun incipiente.

En la revisión de literatura realizada se encuentran varios trabajos que han evaluado la propiedad de costo-efectividad de implementación de un sistema de permisos de emisiones transferibles para la ciudad de Santiago, en el marco del Programa de Compensación de Emisiones (PCE): O’Ryan (1996), Villena y Villena (1998), O’Ryan y Bravo (2001), entre otros. En estos trabajos se compara la aplicación de un sistema de permisos ambientales (PA), sistema de permisos de emisión transferibles (SPET), estándares de emisión (EE) e igual porcentaje de reducción (IPR). Dicha comparación se realiza sobre la base de los costos agregados de abatimiento. Estos costos de abatimiento fueron estimados de la misma manera general en todos los trabajos. En estos estudios se identifican dos alternativas de reducción de emisiones: dispositivos de fin de tubo (DFT) y cambio de combustible (CC). Donde el primero implica la reducción del nivel de emisiones por medio de mecanismos físico-químicos instalados en la chimenea de la fuente. La segunda alternativa, implica el cambio hacia combustibles limpios (gas natural, electricidad, etc.). Los costos asociados a DFT se estimaron utilizando el valor anualizado de la inversión en el dispositivo y los costos operacionales en que se debía incurrir por su funcionamiento. Los costos del CC se estimaron en base al valor presente de la diferencia entre combustibles y de los costos por adecuar los equipos al nuevo combustible. De todas las estrategias evaluadas, todos

los autores han concluido que los permisos ambientales (PA) presentan la mejor costo-efectividad en el control de la contaminación atmosférica, seguido por los SPET y por último comando y control (EE, IPR).

El trabajo de Ponce y Chávez (2005) analiza también la propiedad de costo-efectividad de un sistema de permisos de emisión transferibles (SPET) frente a una política de comando y control por el caso de la comuna de Talcahuano, Chile. En contraste con los trabajos precitados el análisis considera, además de los costos de abatimiento, los costos de fiscalización para inducir el cumplimiento asociados a cada sistema de control. La información respecto a los costos de abatimiento y su metodología de cálculo para dispositivos de fin de tubo factibles de utilizar en los procesos industriales en la ciudad de Talcahuano han sido proporcionadas por Carrasco (2004). Los ítems considerados para la estimación de las funciones de costo de abatimiento incluyen: (i) costo de inversión y (ii) costos de operación. Los costos de inversión consideran los de adquisición e instalación del sistema de control y sus correspondientes equipos auxiliares, así como los terrenos, edificios e instalaciones anexas. La incorporación de estos costos en las funciones de costos de abatimiento requiere el cálculo de una cuota anual, denominado usualmente costo anual equivalente. Los costos de operación corresponden a los reembolsos efectuados a largo de la vida útil del equipo de control. Estos incluyen costos directos e indirectos. Los costos directos de operación dependen de los insumos, mano de obra y materiales de mantenimiento. Los costos indirectos de operación son completamente independientes del tratamiento de efluentes. Para efectos del cálculo de las funciones de costos de abatimiento, éstos se estiman como 60% de los costos de mantenimiento, incluyendo repuestos y la mano de obra. Los resultados por Talcahuano indican que el nivel agregado de emisiones de material particulado por medio de SPET es 55% más barato que el que utiliza una política de comando y control.

2.2.- Algunos trabajos teóricos y empíricos sobre el diseño de fiscalización

Con respecto al diseño de fiscalización para inducir cumplimiento, Stranlund, Chávez y Field (2002) combinan un modelo conceptual de incentivos al cumplimiento en un SPET, con la descripción práctica sobre el funcionamiento y fiscalización de sistemas de permisos actualmente en uso en Estados Unidos (Programa SO₂ y RECLAIM) con la finalidad de entregar guías de política para perfeccionar estos

programas y otros que se puedan implementar. Un primer paso en este sentido, es el desarrollo de un modelo conceptual de cumplimiento. Aquí se señalan las formas en que una firma puede estar en incumplimiento (violando emisiones y entregando informes falsos) y las estrategias de fiscalización que tiene el regulador (monitoreo de emisiones, multas por violación de emisiones y por entregar informes falsos). Se reporta una relación que asegura cumplimiento por parte de las firmas, dicha condición indica que una empresa estará en cumplimiento si el beneficio marginal del incumplimiento (precio del permiso) es menor que el costo marginal de la transgresión -multa esperada. Una conclusión importante de este modelo es que la estrategia óptima de fiscalización en un mercado de permisos competitivo, debe tener como eje central el precio de los permisos. Así, la estrategia de la autoridad es independiente de las características de cada firma (tamaño, proceso, etc.) y no se deberían esperar esfuerzos focalizados de monitoreo sobre alguna firma en especial. Como guía de política, los autores identifican tres áreas de interés. Primero, que en la fijación de las multas debe existir una preponderancia del precio de los permisos. Segundo, que la diferencia entre beneficio marginal y costo marginal de no-cumplimiento, debe ser lo suficientemente grande para entregar los incentivos correctos a los agentes. Por último, tercero, indican que se debe establecer un sistema de fiscalización creíble de medición de emisiones, de tal forma de generar una fiscalización efectiva entre emisiones y tenencia de permisos, evitando así la falsificación de reportes.

El trabajo de Palacios y Chávez (2002) estudia también el diseño de fiscalización para inducir perfecto cumplimiento, ofreciendo una discusión sobre el diseño de fiscalización y el grado de cumplimiento, en el marco del PCE de Santiago de Chile. Los autores presentan una revisión del PCE describiendo sus principales características (número de fuentes, nivel de emisiones, etc.), además realizan una descripción del funcionamiento del programa con una breve referencia al nivel de transacciones y al precio alcanzado por los permisos. Dentro de la revisión del funcionamiento del sistema, se hace referencia al diseño de fiscalización del PCE, distinguiendo los elementos críticos de éste. Por ejemplo, se menciona la necesidad de contar con auto-reportes por parte de las empresas bajo regulación, dichos reportes son anuales e informan a la autoridad (SESMA) del nivel de emisiones durante el periodo de cumplimiento. También, se hace referencia a las actividades de monitoreo, las que buscan conciliar la información de los auto reportes con la información de tenencia de permisos por parte de una fuente, con el fin de determinar si está en cumplimiento o no.

Otro elemento que se considera, son las sanciones por violación en el nivel de emisiones permitido. Los resultados encontrados indican la presencia de emisiones diarias declaradas que exceden los permisos de emisión, coexistiendo con sobre cumplimiento agregado de la capacidad de emisión. Adicionalmente, el estudio indica que la existencia de violaciones tiende a reducirse en el tiempo. Por último, se indican algunas recomendaciones de política que pueden mejorar el cumplimiento del programa, entre las que se destacan: generar una relación entre el tamaño de la violación y el monto de la sanción, diseñar un sistema automático de imposición de sanciones y por último se sugiere ampliar el PCE hacia los procesos industriales, responsables de la mayor emisión de MP en Santiago.

2.3.- Políticas Ambientales con Costos de Fiscalización e Información

Incompleta

La literatura sobre el cumplimiento y la fiscalización de un sistema de permisos de emisión transferibles (SPET) se ha incrementado rápidamente y sigue creciendo. Ver, por ejemplo, Malik (1990), Stranlund y Dhanda (1999), Malik (2002), Montero (2002), Chávez y Stranlund (2003), Stranlund (2007). En cambio, la literatura existente dedicada a la evaluación de políticas ambientales considerando los costos de fiscalización es más limitada. Con respecto a este tema, Chávez, Villena y Stranlund (2007) proporciona un modelo conceptual que analiza el costo de fiscalización de un sistema de estándares de emisión versus un sistema de permisos de emisión transferibles cuando los costos de abatimientos y costos de fiscalización son considerados. Dentro del análisis de optimalidad, se presenta un modelo del comportamiento de cumplimiento individual de las firmas bajo las alternativas de regulación consideradas. También, se hace una discusión de las estrategias de fiscalización bajo ambos sistemas de regulación, considerando los casos de información completa así que incompleta entre la autoridad de fiscalización y las firmas. Los resultados indican que, en un contexto de información imperfecta, la regulación basada de un estándar de emisión no puede ser menos costosa que un SPET cuando los costos de abatimiento y los costos de fiscalización son considerados ambos. Los autores también, muestran que la distribución de emisiones que minimiza los costos agregados cumplimiento (costos de abatimiento y costos de fiscalización) se difiere de la asignación de emisiones de un SPET, cual minimiza solamente los costos agregados de

abatimiento. Los trabajos anteriores han proporcionado que el SPET es eficiente en el caso nace un mercado de permisos donde las firmas enfrentan a un solo precio de permisos que es el precio generado por el mercado competitivo. Al contrario, el trabajo de Chávez, Villena y Stranlund (2007) cuestiona la costo-efectividad de los SPET competitivos y sugiere que los precios de los permisos sean discriminatorios, en este sentido cada firma enfrentaría a un precio de permisos diferente.

Con respecto a las estrategias de fiscalización con información incompleta, Stranlund, Chávez y Villena (2007) presentan una discusión interesante que cuestiona también la eficiencia de las políticas que generan precio uniforme de contaminación cuando el regulador tiene información incompleta. El trabajo de Stranlund, Chávez y Villena (2007) examinan el precio optimal de un contaminante uniformemente mezclado, cuando la fiscalización es costosa y los reguladores no tienen bastante información sobre los costos de abatimiento y los costos de fiscalización. Este trabajo proporciona dos innovaciones: (1) una política optimal obliga a los reguladores a dedicar suficiente recursos de monitoreo para inducir pleno cumplimiento de parte de las firmas. Eso es verdad mirando la calidad de la información que los reguladores tienen sobre los costos de abatimiento y los costos de fiscalización. (2) los costos de fiscalización típicamente inducirán discriminación de precios de contaminación, excepto cuando los reguladores tienen muy poca información sobre las firmas individuales. Más específicamente, una política que genera un precio uniforme será optimal solamente cuando los reguladores son incapaces de utilizar las características observables de las firmas para estimar las condiciones esperadas de los costos de abatimiento de las firmas individuales y los costos de monitoreo para inducir cumplimiento. En el escenario en donde los reguladores tienen probablemente algunas informaciones que permiten de diferenciar o distinguir cada una de las firmas, el precio uniforme de contaminación no puede ser eficiente.

3.- MARCO TEORICO

El marco teórico presentado en este capítulo es una adaptación de un modelo teórico de Chávez, Villena y Stranlund (2007). Se considera este modelo teórico para analizar el costo de fiscalización de un sistema de estándares de emisión (EE) versus un sistema de permisos de emisión transferibles (SPET) cuando costo de abatimiento y costo de fiscalización son considerados. Se presenta la situación de cumplimiento individual de las firmas reguladas, se determina las estrategias de fiscalización costo-efectivas tanto con información completa como información incompleta, y además se presentan los costos de fiscalización y costos del programa o costos de cumplimiento bajo los instrumentos de control considerados.

3.1.- Cumplimiento individual de las firmas reguladas

Consideramos un número fijo de firmas heterogéneas, neutrales al riesgo operando sobre una regulación de estándares de emisiones individuales o un sistema competitivo de permisos de emisión transferibles. Indexamos las firmas por i y denotamos por N el número total de firmas. La meta ambiental es un nivel agregado de emisiones E . La función de costo de abatimiento de una firma es $c_i(e_i, \theta)$, la cual es estrictamente decreciente y convexa en las emisiones de las firmas e [$c'_i(e_i, \theta) < 0$] y [$c''_i(e_i, \theta) > 0$]. Una firma se diferencia de otra por el parámetro θ ³. La función de costo de abatimiento de la firma y la función de costo marginal de abatimiento son crecientes en θ , eso quiere decir que $c_{\theta}(e_i, \theta) > 0$ y $c'_{\theta}(e_i, \theta) > 0$.

En el caso de un sistema de estándares de emisión, una violación de emisiones (v) ocurre si las emisiones de las firmas sobrepasan el estándar $v = e - s > 0$. La firma esta expuesta a una probabilidad aleatoria de ser monitoreada π . Si la firma es auditada y sorprendida en violación, una multa $f(v)$ será impuesta.⁴ El problema de la firma es elegir el nivel de emisiones que minimiza sus costos de cumplimiento esperados, los

³ Este parámetro puede variar por diferencias incluidas en la producción y las tecnologías de control de emisiones, precios de insumos y productos, y por los factores específicos relacionados con la industria.

⁴ La multa es igual a cero cuando la violación es cero pero la multa marginal por violación cero es superior a cero, [$f(0) = 0, f'(0) > 0$]. Para una violación positiva la multa crece a una tasa creciente, esto es, [$f''(v) > 0$].

cuales consisten en un costo de abatimiento más su multa esperada. Una firma estará en cumplimiento cuando elige un nivel de emisiones consiste con:

$$-c'_i(s, \theta) \leq \pi f'(0) \quad (1a)$$

Entonces, la elección de cumplir de una firma individual requiere que la multa marginal esperada no sea menos que el costo marginal de abatimiento⁵ asociado con el nivel de emisiones equivalente al estándar de emisiones (Ver detalles, por ejemplo, en Malik (1992) y Heyes (2000)).

Bajo un sistema de permisos de emisión transferibles (SPET), un total de $L = E$ licencias son creadas por el regulador, cada una de ellas confiere el derecho legal de emitir una unidad de contaminante. Cada firma individual es un competidor perfecto en el mercado de permisos, así el mercado de permisos genera un precio de equilibrio de licencias p . Denotamos por l_{i0} la asignación inicial de licencias de la firma, y l_i el número de licencias que tiene la firma después de realizar transacciones. Cuando una firma no cumple, sus emisiones sobrepasan el número de licencias que posee después de transacciones. La violación (v_i) es $v_i = e_i - l_i > 0$, para $e_i > l_i$. El problema de la firma consiste en elegir sus emisiones y su demanda de permisos tratando de minimizar los costos de abatimiento, los ingresos o gastos derivados de la compra o venta de permisos, y la multa esperada. La elección optimal de emisiones requiere que $-c'_i(e_i, \theta) = p$, lo cual define implícitamente $e_i(p, \theta)$. En cumplimiento, el nivel de emisiones de la firma i es igual a sus demandas de permisos, que es $e_i(p, \theta) = l_i(p, \theta)$. La condición del equilibrio en un mercado de permisos de emisión esta dada por $\sum_i^N l_i(p, \theta_i) = L = E$; cual define implícitamente el precio equilibrio de permiso como una función de parámetros de costos de abatimiento de las firmas; y del número total de licencias; eso es $p(\bar{\theta}, E)$. Entonces, bajo un SPET una firma estará en cumplimiento cuando:

$$p(\bar{\theta}, L) \leq \pi f'(0) \quad (1b)$$

Eso quiere decir que una firma estará en cumplimiento con la regulación cuando la multa marginal esperada no sea menos que el precio equilibrio obtenido en un

⁵ Los costos marginales al nivel del estándar pueden variar a través las firmas, no sólo porque ellas enfrentan a estándar diferente, sino que porque posiblemente las características específicas de las firmas difieren.

mercado de permisos competitivo (para detalles, ver Malik (1990), y Stranlund y Dhanda (1999)).

3.2.- Estrategias de fiscalización

Las estrategias de fiscalización (π) para inducir perfecto cumplimiento difieren según el tipo de instrumento de control considerado. En el caso de un sistema de estándares de emisión, la calidad de la información que dispone el regulador influye sobre sus estrategias de fiscalización. Sin embargo, bajo un sistema de permisos de emisión transferibles la información sobre los costos de abatimiento no es relevante para definir las estrategias de fiscalización, debido a que tales estrategias son independientes del tipo de firma.

3.2.1.- Fiscalización costo-efectiva

La fiscalización costo-efectiva requiere lograr el perfecto cumplimiento al mínimo esfuerzo de fiscalización (π). En el caso de un sistema de permisos de emisión transferibles, Stranlund y Dhanda (1999), y Stranlund y Chávez (2000) han mostrado que dado las multas son aplicadas uniformemente, la estrategia de fiscalización costo-efectiva es monitorear cada firma con una única probabilidad, eso quiere decir que no es necesario hacer una fiscalización focalizada. Por lo tanto, el mínimo monitoreo requerido para inducir cumplimiento esta dado por:

$$\pi^{\min} = \frac{p(\bar{\theta}, E)}{f'(0)} \quad (2a)$$

Al contrario bajo un sistema de estándares de emisión, Malik (1992) mostró que la fiscalización costo-efectiva implica un esfuerzo de monitoreo que varia a través las firmas de acuerdo a sus costos marginales de abatimiento. Esto significa, para efectos de ilustración, que en el contexto del modelo aquí analizado y suponiendo estándares uniformes, el esfuerzo de monitoreo debe ser tal que

$$\pi_1^{\min}(\theta_1) < \pi_2^{\min}(\theta_2) < \dots < \pi_n^{\min}(\theta_n) \quad (\text{Ver detalles en Chávez, Villena y Stranlund}$$

(2007). Sin embargo, para lograr monitoreo perfecto, el regulador debe tener información perfecta sobre los costos de abatimiento de cada firma regulada. Malik (1992) mostró que bajo supuesto de información perfecta, el mínimo monitoreo requerido para cada firma esta dado por:

$$\pi_i^{\min}(s_i, \theta_i) = \frac{-c'_i(s_i, \theta_i)}{f'(0)} \quad (2b)$$

En un sistema de estándares de emisión con información incompleta, el regulador es incapaz de diferenciar los tipos de firmas y éstas podrían explotar esta ventaja de información asimétrica en sus beneficios. Por lo tanto la fiscalización costo-efectiva de un sistema de estándares de emisión requiere que el regulador monitorea los diferentes tipos de firmas con la misma probabilidad (π), de tal manera que el regulador anticiparía la respuesta estratégica de una firma por un diseño de fiscalización apropiado (Ver detalles en Chávez, Villena y Stranlund (2007). El mínimo monitoreo requerido es dado por:

$$\pi^{\min} = \text{Max}\left(\frac{-c'_i(s_i, \theta)}{f'(0)}\right), \quad i=1, \dots, N \quad (2c)$$

3.3.- Costos de fiscalización

El costo de fiscalización (M) asociado a un instrumento de control determinado depende del esfuerzo de fiscalización (probabilidad de auditar), del costo de hacer una auditoria (w) y del número total de fuentes bajo regulación (N). Dado que el costo de una auditoria y el número de firmas bajo regulación se mantienen constantes para ambos instrumentos bajo estudio, la probabilidad mínima de monitoreo consiste en el elemento que diferencia los costos de fiscalización asociado a cada instrumento.

En el caso de un sistema de permisos de emisión transferibles, los costos de fiscalización para inducir cumplimiento están dados por:

$$M = w * \frac{p(\bar{\theta}, E)}{f'(0)} * N \quad (3a)$$

Considerando un sistema de estándares de emisión con información completa, los costos de fiscalización serían una suma de los costos fiscalización de cada firma, son expresados de la siguiente manera:

$$M_1 = w * \sum_{i=1}^N \frac{-c'_i(s_i, \theta_i)}{f'(0)} \quad (3b)$$

Cuando existe restricción sobre la información en el caso de un estándar de emisiones, los costos de fiscalización pueden ser expresados como:

$$M_2 = w * \text{Max}\left(\frac{-c'_i(s_i, \theta)}{f'(0)}\right) * N, \quad i=1, \dots, N \quad (3c)$$

3.4.- Costos de programa

Los costos de programa o costos de cumplimiento (CC) incluyen los costos agregados de abatimiento y costos de fiscalización (Ver detalles en Chávez, Villena y Stranlund (2007)).

El costo de programa bajo un sistema de permisos de emisión transferibles está dado por:

$$CC^{SPET} = \sum_{i=1}^N c_i(e_i(p(\bar{\theta}, E), \theta_i)) + w * \frac{p(\bar{\theta}, E)}{f'(0)} * N \quad (4a)$$

En un sistema de estándares de emisión con información completa, el costo de programa esta expresado como:

$$CC_1^{EE} = \sum_{i=1}^N c_{ei}(s_i, \theta_i) + w * \sum_{i=1}^N \frac{-c'_i(s_i, \theta_i)}{f'(0)} \quad (4b)$$

Para el caso de un sistema de estándares de emisión con información incompleta, el costo de programa esta expresado como:

$$CC_2^{EE} = \sum_{i=1}^N c_{ei}(s_i, \theta_i) + w * \text{Max}\left(\frac{-c'_i(s_i, \theta_i)}{f'(0)}\right) * N, i = 1, \dots, N \quad (4c)$$

El programa costo-efectivo minimiza los costos de abatimiento y los costos de fiscalización; y la distribución de emisiones debería ser tal que la suma de los costos marginales de abatimiento y los costos de monitoreo sean iguales entre las firmas. Diversos trabajos de investigación han mostrado que los sistemas de permisos de emisión transferibles permiten de lograr una meta ambiental al mínimo costo. Eso implicaría que $\sum_{i=1}^N c_{ei}(s_i, \theta_i) \geq \sum_{i=1}^N c_i(e_i(p(\bar{\theta}, E), \theta_i))$. Sin embargo, los costos de fiscalización de un sistema de permisos de emisión transferibles podrían ser inferiores o superiores a los cuales de un sistema de estándares de emisión bajo supuesto de información completa.

Asumiendo que los costos agregados de abatimiento no cambian según la disponibilidad de información del fiscalizador. Por lo tanto, los costos de programa bajo un sistema de estándares de emisión con información completa difieren de aquellos bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta debido a diferencias en los costos esperados de fiscalización. Considerando un conjunto de firmas heterogéneas enfrentando a un sistema de estándares de emisión, los costos de fiscalización esperados bajo información incompleta (M_2) son más altos que los costos

esperados de fiscalización bajo información completa (M_1). En consecuencia, un programa bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta es más costoso que un programa bajo un sistema de estándares de emisión con información completa ($CC_2^{EE} \geq CC_1^{EE}$).

Finalmente, debido a que los sistemas de permisos de emisión transferibles permiten lograr una meta ambiental al mínimo costo de abatimiento; los costos de cumplimiento de un sistema de estándares de emisión con información incompleta son probablemente más altos que aquellos de un sistema de permisos de emisión transferibles. Bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta el regulador debe monitorear todas las firmas con la probabilidad que corresponde a la de la firma que tiene el costo marginal por tonelada reducida más alto. Eso implicaría un costo de fiscalización alto. Por lo tanto, un sistema de estándares de emisión con información incompleta debe ser más costoso que un programa de sistema de permisos de emisión transferibles ($CC_2^{EE} \geq CC^{SPET}$).

4.- METODOLOGÍA

Este capítulo describe un detalle de la metodología seguida para alcanzar los objetivos propuestos. Inicialmente, se evalúan los costos de abatimiento, costos de fiscalización y costos de cumplimiento para todas las fuentes involucradas, para los instrumentos de control de contaminación estudiados. Seguidamente, se comparan esos costos asociados a diferentes instrumentos de control de contaminación mediante simulaciones numéricas basando en un modelo de programación matemática, conocido típicamente como “modelo de programación entera”. Este modelo entrega resultados sobre los niveles de emisión finales óptimos, las opciones de control elegidas y los costos asociados a las opciones de control elegidas para todas las fuentes consideradas.

Esta sección está estructurada de la siguiente manera. Primero, se caracterizan a las fuentes participando en el programa de compensaciones de emisiones (PCE) durante el año 2006. Segundo, se presenta brevemente la metodología de determinación de las formas funcionales de los costos de abatimiento utilizadas en las simulaciones. Tercero, se describen las simulaciones realizadas.

4.1.- Caracterización de las fuentes (PCE-2006)

La caracterización descriptiva de las fuentes consideradas fue realizada utilizando la base de datos para el Programa de Comprensión de Emisiones (PCE) provista por SESMA, particularmente se consideraron los datos correspondientes al año 2006. Esta base suministra datos para cada fuente individual sobre tipo de fuente, antigüedad de la fuente, tipo de combustible utilizado por la fuente, flujos de combustible, número de horas de operación, localización de la fuente, existencia de equipo de abatimiento, eficiencia de reducción del equipo de abatimiento, derechos máximos de capacidad de emisión por fuente, emisiones diarias y anuales por fuente. En la Tabla 4.1 se presenta una descripción global de las fuentes participando en el PCE al año 2006 basando de los criterios del estado y de la antigüedad de las fuentes registradas. Según esta Tabla, existen 446 fuentes participando en el PCE en el año

2006, de las cuales 192 fuentes son denominadas fuentes existentes (43% del total de las fuentes) y 254 fuentes son nuevas (57 % del total de las fuentes)⁶.

Tabla 4.1: Fuentes participando en el PCE al año del 2006

	Fuentes existentes^a		Fuentes nuevas^b	
	Nº fuentes	%	Nº fuentes	%
Activas	149	77,6	221	87
Inactivas ^c	29	15,1	20	7,9
Desaparecidas o dada de baja ^d	14	7,3	13	5,1
Total	192	100,0	254	100,0

Fuente: Elaboración personal a partir de los datos provistos por el registro de SESMA (2007).

^a Las fuentes existentes son las fuentes instaladas antes marzo de 1992.

^b Las fuentes nuevas son las cuales instaladas después marzo de 1992.

^c Se considera que las fuentes están inactivas en el caso que informan cada año su estado de inactividad y las razones de su inactividad. Por lo tanto, la EDI (Emisión Diaria Inicial) o la EDP (Emisión Diaria Permitida) disponibles de las fuentes son conservadas en el registro del PCE.

^d Se considera que las fuentes están desaparecidas en el caso que no informan su estado de actividad o no declaran sus emisiones en el periodo y los agentes reguladores no las encuentran en sus lugares registrados. En este caso, después 3 años seguidos, la EDI y la EDP disponibles de las fuentes serán eliminadas en el registro del PCE.

En la Tabla 4.2 se realiza una comparación de las características de las fuentes participando en el PCE en 1999 y 2006. En esta Tabla las fuentes son caracterizadas por los criterios de número de fuentes, tipo de proceso, fecha de instalación, equipo de abatimiento, combustible. En el objetivo de evaluar la evolución de las fuentes participando en el PCE, se compara los resultados actuales a los cuales encontrados en el trabajo de Palacios y Chávez (2002), aquel describió también las fuentes registradas en el PCE durante el periodo 1993-1999. Observando la Tabla 6.2, se puede apreciar una reducción del total de fuentes en el PCE durante el periodo 1999-2006. El número de fuentes se ha reducido en un 22% al año 2006. Esta reducción puede ser explicada por el hecho que varias fuentes denominadas inactivas o dada de baja durante años anteriores no han informado su estado de inactividad y las razones de su inactividad después de tres años seguidos, fueron eliminadas en el registro de SESMA. Estas fuentes han perdido sus niveles de EDI o EDP disponibles⁷. Con respecto al tipo de proceso, 85% de las fuentes estudiadas son calderas industriales contra un 19,9% en el año 1999. Se han disminuido considerablemente las fuentes existentes antes de marzo

⁶ En el año 1999, un total 573 fuentes se encontraban participando en el Programa de Compensación de Emisiones (PCE), de las cuales 365 fuentes existentes y 208 fuentes nuevas (ver detalles en Palacios y Chávez, 2002)

⁷ Contacto personal con Roberto Condori, Sub-departamento Calidad del aire, SESMA (2007)

1992, fecha del decreto Supremo que estableció el PCE. En el año 2006, alrededor de un 98,8% de las fuentes que no tienen equipo de abatimiento. Se ha incrementado el uso de gas natural en un 27,2% en 2006 comparativamente al año de base. Sin embargo, debido a que la base de datos utilizados no suministra información sobre los combustibles de respaldo de las fuentes, tampoco se puede afirmar que estas 249 fuentes están utilizando sólo gas natural dado los cortes de suministro de gas en Santiago tendrían al alza.

Tabla 4.2: Comparativo de las características de las fuentes participando en el PCE: 1999 y 2006

		1999 ^a		2006	
		Nº fuentes	%	Nº fuentes	%
Tipo de Proceso	Caldera industrial	68	19,9	369	85,4
	Caldera de calefacción	66	19,3	63	14,6
	Generador de vapor	208	60,8	0	0,0
	Total	342	100,0	432	100,0
Fecha de instalación	Antes de marzo 1992 ^b	318	93	181	41,9
	Después de marzo 1992 ^c	24	7	251	58,1
	Total	342	100,0	432	100,0
Equipo de abatimiento	Tiene	19	5,6	5	1,2
	No tiene	323	94,4	427	98,8
	Total	342	100,0	432	100,0
Combustible	Gas ^d	104	30,4	249	57,6
	Leña	6	1,8	2	0,5
	Petróleo #2	199	58,2	0	0,0
	Petróleo #5	17	5,0	4	0,9
	Petróleo #6	0	0,0	6	1,4
	Carbón	---	---	2	0,5
	Otros ^e	16	4,7	169	39,1
	Total	342	100,0	432	100,0
	Fuentes sin IC ^f	231		14	
Total^g	573		446		

Fuente: Elaboración personal a partir de los datos provistos por el registro de SESMA (2007).

^a Ver Palacios y Chávez (2002)

^b Las fuentes instaladas antes de marzo 1992 son consideradas como las fuentes existentes, han todas recibido un nivel de EDI (Emisión Diaria Inicial) al año 1992 debido a la implementación del Programa de Compensación de Emisiones (PCE), establecido por el Decreto Supremo N° 4 (DS 4) .

^c Las fuentes instaladas después de marzo 1992 son dichas nuevas, no tienen EDI sino un nivel de EDP (Emisión Diaria Permitida), el cual les da el derecho de capacidad de emisión.

^d Gas natural, gas de cañería y/ o gas licuado

^e Aserrín, kerosene, lef, superlef, diesel, LMFO

^f Total de fuentes sin información completa

^g Total de fuentes participando en el PCE, considerando a todas las fuentes (con o sin información completa).

4.2.- Costos de abatimiento para PM10

Para calcular de los costos de abatimiento asociados a un equipo determinado, se debe considerar los costos de inversión y los costos anuales de operación (EPA (2001), O’Ryan y Bravo (2001), Bravo y O’Ryan (2000), Villena y Villena (1998), Aranda (1996)).

Los costos de inversión se relacionan al desembolso de capital para la adquisición e instalación del equipo y sus correspondientes equipos auxiliares, así como de terreno, edificios e instalaciones anexas. Estos costos deben traducir en una cuota anual de inversión. Esta cuota fija anual durante la vida útil del equipo, se obtiene al utilizar el factor de recuperación de capital, el cual considera una cuota fija que cubre capital e intereses.

Los costos anuales de operación representan los desembolsos realizados a largo de la vida útil del equipo. Estos costos componen los costos directos y costos indirectos. Los costos directos dependen del flujo de combustible procesado y de las horas promedio de operación diaria de la fuente. Los costos indirectos de operación no dependen del caudal de la fuente, aun que la fuente no esta funcionando estos costos siguen existiendo. Estos costos se estiman como un 60% de los costos de manutención, incluyendo repuestos y los costos de mano obra (directa, supervisión, coordinación y manutención)

Existen actualmente cinco (5) alternativas (equipos) de control de PM-10 aplicables a las fuentes fijas participando en el programa de compensaciones de emisiones (PCE) en Santiago: Ciclones – Multiciclones - Lavador venturi- Filtro de Mangas- Precipitador electrostático⁸. Por orden creciente de eficiencia de reducción de

⁸ Contacto Personal con Roberto Condori, Sub-departamento Calidad del aire, SESMA (2007).

PM-10, las alternativas de control pueden ser clasificadas en ciclones, multiciclones, lavador venturi, precipitador electrostático y filtro de mangas.

Para la determinación de los costos totales asociados a la utilización de los equipos citados arriba, preliminarmente se utilizó como información de base las formas funcionales encontradas por O’Ryan y Bravo (2001)⁹. En este trabajo, las funciones de costos fueron estimadas al año 1998, aplicando un análisis de regresión lineal para tres tipos de fuentes de caudal diferente. De acuerdo a esta metodología, y en el objetivo de actualizar al año 2006 dichas formas funcionales de costos, hemos corregido estos resultados por un factor de ajuste (*FA*), el cual corresponde a la inflación del periodo 1998-2006, dado el supuesto que el costo de adquisición de los equipos no ha cambiado¹⁰. La Tabla 6.3 presenta las funciones de costo según las opciones de control. Estas funciones dependen del caudal de la fuente (*Q*) y del promedio de horas de operación (*HRS*).

Tabla 4.3: Funciones de Costos para Santiago (\$ año 2006)

Alternativa de control	Costo de Inversión anualizado (\$/ año)	Costos directos de operación (\$/año/hora)	Costos indirectos de operación (\$/ año)
Ciclones	$77,45*Q + 80123,4$	$(0,14*Q + 143,2)*HRS$	625.783
Multiciclones	$132,25*Q + 141.385$	$(0,14*Q + 143,2)*HRS$	625.783
Lavador Venturi	$144.613*Q^{0,4037}$	$(137*Q + 486.568)*HRS$	7.719.990
Precipitador Electrostático	$98.845*Q^{0,6261}$	$(56,6*Q - 444.335)*HRS$	5.387.894
Filtro de Mangas	$4.423*Q^{0,7449}$	$(28,6*Q + 480.423)*HRS$	8.587.433

Fuente: Elaboración personal basado en O’Ryan y Bravo (2001), pagina 274

Notas:

Q: Caudal o flujo de gas (m³N/hr)

HRS: Corresponde al número de horas promedio diario de operación de la fuente, calculadas como el número de horas al día de funcionamiento, ponderado por la razón entre el número de días al año de operación de la fuente y los 365 días del año.

⁹ Este trabajo esta publicado en “Estudios de Economía”, vol 28, No 2, Pp 267-291, diciembre 2001.

¹⁰ Este factor de ajuste (*FA*) esta calculado de la siguiente manera: $FA = IPC_{2006} / IPC_{1998}$, donde:

IPC_{2006} : Índice de Precio al Consumidor al diciembre del 2006

IPC_{1998} : Índice de Precio al Consumidor al diciembre del 1998

4.3.- Simulaciones

A continuación se presenta la metodología utilizada para desarrollar las simulaciones necesarias para obtener los costos de agregados de cumplimiento.

4.3.1.- Sistema de permisos de emisión transferibles (SPET)

Para la simulación del SPET, se utiliza el software CPLEX, el que permite optimizar modelos por medio de programación lineal. A partir de una planilla Excel, se realiza los cálculos de los niveles de emisiones de cada fuente bajo las tecnologías de control disponibles. También, los costos asociados al uso de cada tecnología por cada fuente son calculados. Los datos de alimentación necesarios para implementar el sistema de permisos de emisiones son: número de tecnologías de control disponibles, número de fuentes, nivel de emisiones de cada fuente bajo cada tecnología de control aplicable, costo asociado, meta ambiental. Los resultados obtenidos son: elección óptima de tecnología de control dada la meta ambiental, nivel de emisiones final asociado al uso de la tecnología seleccionada, costo enfrentado por cada fuente, costo de control agregado. El software utilizado no entrega directamente el precio del permiso, debido a que se trata de un problema binario. Para resolver este problema se plantea seguir el concepto de precio sombra, interpretando el precio del permiso como la reducción en los costos agregados de abatimiento si la meta ambiental fuera incrementada de una unidad adicional. Además para contrastar este método, a partir de una planilla Excel, se calcula el precio del permiso, resolviendo el problema de optimización individual de cada fuente, suponiendo que la firma está eligiendo su nivel de emisiones minimizando sus costos de cumplimiento esperados, los cuales consisten en un costo de abatimiento más su multa esperada. Los niveles de precio encontrados bajo distinto método no se diferencian y generan la misma distribución de emisiones y equipos para igual nivel de reducción de emisiones.

El modelo a programar es una adaptación de uno presentado por Bravo y O’Ryan (2000). Se consideran 5 alternativas de control de emisiones, mencionadas anteriormente. Además, se considera la alternativa “no hacer nada” la que implica costos de control igual a cero dado su eficiencia de reducción de contaminantes es cero. Del total de 446 fuentes participando en el PCE, se considera 413 fuentes (93%), sobre cuales disponemos suficiente información sobre los parámetros necesarios para alimentar las simulaciones. El modelo es:

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^{413} \sum_{j=1}^6 CT_{i,j} X_{i,j} \quad (5)$$

s.a

$$\sum_{i=1}^{413} \sum_{j=1}^6 E_i (1 - EF_{i,j}) X_{i,j} \leq E \quad (6)$$

Donde:

$CT_{i,j}$: Costo anual de aplicación de la tecnología j a la fuente i en M\$/año

$X_{i,j}$: Variable de decisión que determina el tipo de tecnología que se aplica a la fuente tipo i . Toma el valor 1 si la tecnología j se aplica a la fuente i . Y cero si no.

E_i : Emisiones totales de la fuente i en kg/año

$EF_{i,j}$: Eficiencia de reducción de emisiones de la tecnología j aplicada a la fuente i .

E : Meta total de emisiones en kg/año

4.3.2.- Estándares de emisión

En el caso de un estándar de emisiones, el proceso de simulación no es tan complicado como el caso de un SPET, y por lo tanto se utiliza una planilla de Excel. Los datos de alimentación necesarios para realizar estas simulaciones son: caudal por fuente, funciones de costo de abatimiento, tecnologías de control disponibles y eficiencia de reducción asociada. Los resultados esperados son: costo de abatimiento por fuente, para cada una de las opciones de control que cumplan con el estándar de emisión, elección de tecnología de control por fuente y nivel de emisiones bajo regulación. El mecanismo de elección es la siguiente, del conjunto de opciones de control que cumplen con el estándar de emisión, la fuente elige aquella que minimice su costo de control. Basado de la elección de las fuentes, realizamos los cálculos de costos agregados asociados al instrumento de control bajo estudio y el nivel de emisiones finales.

4.3.3.- Sistema de fiscalización

De acuerdo al modelo teórico, el costo de fiscalización asociado a un instrumento de control determinado depende del costo de una auditoria (w) de parte del regulador, de la probabilidad mínima de monitoreo (π^{min}) necesario para inducir cumplimiento y del número total de fuentes bajo regulación (N). Se considera que el costo de una auditoria y el número de firmas bajo regulación son los mismos para ambos instrumentos bajo estudio. Por lo tanto, la probabilidad mínima de monitoreo es el elemento que diferencia los costos de fiscalización asociado a cada instrumento.

4.3.3.1.- SPET

Con respecto un sistema de permisos de emisión, el costo de fiscalización asociado a un instrumento de control (CF^{SPET}) esta determinado por la siguiente expresión:

$$CF^{SPET} = w * \pi^{min} * N \quad (7)$$

Supongamos que la multa por violación (f) sea una función lineal del precio del mercado y tiene la siguiente forma:

$$f = \alpha * P \quad (8a)$$

Donde α es un factor de sanción, con $\alpha > 1$.

La probabilidad mínima de monitoreo necesaria está dada por la ecuación (2a):

$$\pi^{min} = \frac{P}{f} \quad (8b)$$

Reemplazando (8a) en (8b),

$$\pi^{min} = \frac{1}{\alpha} \quad (8c)$$

Sustituyendo (8c) en (7):

$$CF^{SPET} = w * \frac{1}{\alpha} * N \quad (9a)$$

4.3.3.2.- Estándares de emisión

- *Problema de no diferenciabilidad de las funciones de costos de abatimiento*

En el caso de un estándares de emisión bajo información completa, las estrategias de fiscalización costo-efectiva es monitorea cada fuente con una probabilidad diferente. Bajo el supuesta de convexidad y continuidad de las funciones de costos de abatimiento en las emisiones, el modelo teórico supone que la probabilidad de monitoreo depende del costo marginal de abatimiento (*beneficio marginal de violar*) y la multa marginal (*costo marginal de violar*). Sin embargo, las funciones de costos consideradas en este trabajo presentan algunas características especificadas que difieren de lo que postula el modelo considerado. Estas funciones dependen del caudal de la fuente y su promedio de horas de operación (variables discretas), postulan una relación funcional del tipo constante a trozos, no diferenciables. Por lo tanto, no es posible encontrar el costo marginal de abatimiento y además calcular la probabilidad de monitoreo de la manera como postula el modelo teórico. Para resolver este problema, se plantea calcular las probabilidades de monitoreo de manera discreta, siguiendo sin embargo las condiciones necesarias para perfecto cumplimiento dictadas por el modelo teórico. Para determinar las probabilidades de monitoreo para cada fuente, primero se resuelve el problema de optimización individual, bajo el supuesto de perfecto cumplimiento. El resultado de esta optimización es el costo de abatimiento para cada fuente, elección de opción de tecnología y nivel de emisiones bajo regulación. Segundo, se calcula la probabilidad de monitoreo de cada fuente como se describe a continuación:

$$\pi_i = \text{Max}(\pi_{i,j}) \quad (10)$$

$$\text{Con} \quad \pi_{i,j} = \frac{C(e_{i,j}^*) - C(e_{i,j})}{f^*(e_{i,j} - s_i)} \quad (10a)$$

Para $\forall i, j$ tal que:

$$e_{i,j} > s_i \geq e_{i,j}^* \quad (10b)$$

Donde:

i = Índice de fuentes reguladas ($i=1,\dots,N$)

j = Índice de opciones de control ($j = 1,\dots,M$)

$C(e_{i,j}^*)$: Costo de abatimiento asociado al nivel de emisiones optimal de la fuente i en M\$/año

$C(e_{i,j})$: Costo de abatimiento de la fuente i utilizando la opción j en M\$/año

$e_{i,j}^*$: Nivel de emisiones optimal de la fuente i utilizando la opción j en kg/año

$e_{i,j}$: Nivel de emisiones de la fuente i utilizando la opción j en kg/año

s_i : Meta individual de la fuente i en kg/año

f : Multa impuesta por el regulador en M\$

Por lo tanto, el costo agregado de fiscalización del sistema de estándares de emisión bajo el supuesto de información completa esta dado por:

$$CF_1^{EE} = w * [\pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_N] \quad (11a)$$

Con información incompleta, el costo agregado de fiscalización esta expresa como siguiente:

$$CF_2^{EE} = w * \text{Max}(\pi_i) * N, \quad i=1, \dots, N \quad (11b)$$

5.- RESULTADOS

En éste capítulo se presentan los resultados de la implementación de un sistema de permisos de emisión y un sistema de estándares de emisión. Este capítulo incluye los resultados correspondientes a los costos agregados de abatimiento para los instrumentos de control bajo estudio, los costos agregados de fiscalización para ambos instrumentos y los costos del programa o costos agregados de cumplimiento de ambos instrumentos. Además, se presenta los resultados del análisis de sensibilidad.

5.1.- Antecedentes

Considerando que la eficiencia entre distintas opciones de control es discreta, por lo tanto la reducción de los equipos se presenta en intervalos. Además, eso influye sobre la elección de la meta del escenario de base. La meta del escenario de base considerado es un 40% de reducción de emisiones con respecto a la situación de base. Dado, el nivel agregado de las emisiones de las 413 fuentes consideradas es 1995,3 kg/día equivalente a 728,3 Ton/año, la meta ambiente corresponde a 1197,2 kg/día (436,9 Ton/año).

La Tabla 5.1 presenta los parámetros de costos de fiscalización considerados:

Tabla 5.1: Parámetros de costos de fiscalización

Parámetros	
Factor de sanción (α)	4,9
Precio ^a	0,72
Multa ^b	3,5
Costo de auditoria ^c	0,5

Fuente: Elaboración personal

^a: Valor expresado en millones de pesos por kilogramo de PM10

^b: Valor expresado en millones de pesos

^c: Valor expresado en millones de pesos

5.2.- Costos agregados de abatimiento según la política considerada

Debido al número de fuentes bajo estudio, no es posible presentar los resultados en rango individual. En la siguiente Tabla se presenta los costos agregados de abatimiento para ambas políticas, los niveles agregados de emisiones del conjunto de fuentes considerados, los equipos seleccionados por las fuentes.

Tabla 5.2: Resultados de la implementación del SPET

	Elección de tecnología ^a						Emisiones agregadas finales ^b
	No hacer nada	Ciclones	Multiciclones	Lavador de venturi	Precipitador electrostático	Filtro de Mangas	
Número de Fuentes	407	0	5	0	0	1	436,9
%	98,6	0	1,2	0	0	0,2	

Fuente: Elaboración personal

^a : Tecnología clasificada por orden decreciente de eficiencia

^b : Valor expresado en ton/año

La Tabla 5.2 presenta los resultados obtenidos para la implementación del SPET. Según esta Tabla para lograr la meta del escenario de base, 407 fuentes (98,6%) eligen la opción no hacer nada, 5 fuentes (1,2%) elijen utilizar Multiciclones y 1 fuente (0,2%) utiliza un Filtro de Mangas¹¹.

Con respecto a los costos agregados de abatimiento para la meta ambiental propuesta, dichos costos se evalúan a 43,15 millones de pesos al año, con precio de permiso de kilogramo de material particulado de 0,72 millones de pesos.

Estos resultados indican un nivel de costos agregados de abatimiento muy bajo al utilizar un sistema de permisos de emisión. Observando la Tabla 5.2, para cumplir con la meta global, sólo seis fuentes (1,4% del total de fuentes) deben elegir un equipo de control. Dichas seis fuentes corresponden a las cuales las más grandes (caudales grandes). También, las formas funcionales de costo de abatimiento estimadas por O’Ryan y Bravo (2001) permiten fuentes con caudal grande de tener niveles de costos de abatimiento más bajos que fuentes con caudal pequeño según el equipo de control considerado. Este fenómeno afecta mayormente los costos agregados de abatimiento del uso del SPET y explica este nivel de costos agregados de abatimiento tan bajo asociados a la política de mercado.

¹¹ Detalles en Anexo No 3

Tabla 5.3: Resultados de la implementación del sistema de estándares de emisión

	Elección de tecnología ^a						Emisiones agregadas finales ^b
	No hacer nada	Ciclones	Multiciclones	Lavador de venturi	Precipitador electrostático	Filtro de Mangas	
Número de Fuentes	0	252	161	0	0	0	436,9
%	0	61	39	0	0	0	

Fuente: Elaboración personal

^a : Tecnología clasificada por orden creciente de eficiencia

^b : Valor expresado en kg/año

La Tabla 5.3 presenta los resultados de la implementación del sistema de estándares de emisión. Esta Tabla indica los niveles agregados de emisiones y las elecciones de emisiones. Para lograr la meta del escenario base 252 fuentes (69%) tienen que elegir Ciclones contra 161 fuentes (39%) deben elegir Multiciclones¹². Con respecto a los costos agregados de abatimiento para lograr la meta ambiental propuesta, estos se equivalen a un 512,3 millones de pesos al año.

Al utilizar un sistema de estándares de emisión, los resultados indican un nivel alto de costos agregados de abatimiento. Eso se debe por el hecho que el estándar de emisión es un instrumento muy estricto, todas las fuentes están obligadas de elegir un equipo de control para cumplir con su meta individual. Lo que redundará en un aumento de los costos agregados de abatimiento asociados al uso de la política comando y control.

Según los resultados obtenidos de la implementación de los instrumentos de control considerados, el SPET permite lograr el perfecto cumplimiento al mínimo costo de abatimiento (43,15 < 512,3).

5.3.- Costos agregados de fiscalización según la política considerada

Los costos agregados de fiscalización dependen principalmente de la política ambiental considerada y además varían dentro una misma política según la estrategia de fiscalización.

Para el cálculo del costo agregado de fiscalización en el caso de un SPET, se debe tener el costo de realizar una auditoría, la probabilidad mínima de monitoreo y el

¹² Detalles en Anexo No 4

numero de fuentes consideradas. La Tabla 5.4 muestra el costo agregado de fiscalización en el caso de un SPET es igual a 41,3 millones de pesos al año.

Tabla 5.4: Costo de fiscalización SPET

Número de fuentes	Costo para hacer un monitoreo ^a	Probabilidad de monitoreo	Costo agregado de fiscalización ^b
413	0,5	0,2	41,3

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor en millones de pesos al año

^b: Valor en millones de pesos al año

Entre los estándares de emisión, los costos agregados de fiscalización difieren según la disponibilidad de información de parte del regulador. La Tabla 5.5 indica que el costo agregado de fiscalización de un estándar bajo el supuesto de información completa equivale en un 3,9 millones de pesos al año.

Tabla 5.5. Costo de fiscalización del estándar con información completa

Supuesto	Costo para hacer un monitoreo ^a	$\sum_{i=1}^{413} \pi_i$	Costo agregado de fiscalización ^b
Información completa	0,5	7,8	3,9

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor en millones de pesos al año

^b : Valor en millones de pesos al año

Bajo el supuesto de información incompleta en un sistema de estándares de emisión la estrategia costo-efectiva es fiscalizar todas las fuentes con la probabilidad de monitoreo la más alta. La Tabla 5.6 indica que el costo agregado de fiscalización de un sistema de estándares de emisión bajo supuesto de información incompleta es igual a 43,3 millones de peso al año.

Tabla 5.6. Costo de fiscalización del estándar con información incompleta

Supuesto	Número de fuentes	Costo para hacer un monitoreo ^a	$Max(\pi_i)$	Costo agregado de fiscalización ^b
Información incompleta	413	0,5	0,21	43,3

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor en millones de pesos al año

^b : Valor en millones de pesos al año

Observando las Tabla 5.4, 5.5, 5.6, bajo supuesto de información completa, se puede concluir que el sistema de estándares de emisión asegura el perfecto cumplimiento al mínimo costo de fiscalización ($3,9 < 41,3$). Sin embargo, fiscalizar un SPET es más barato que un sistema de estándares de emisión con información incompleta ($41,3 < 43,3$).

5.4.- Costos agregados de cumplimiento según política

Los costos agregados de cumplimiento se obtienen sumando los costos agregados de abatimiento y de fiscalización de ambas políticas. La Tabla 5.7 presenta el costo agregado de cumplimiento de las políticas consideradas.

Tabla 5.7. Costos agregados de cumplimiento

Políticas de control	Costo Agregado de Abatimiento ^a	Costo Agregado de fiscalización ^b	Costo Agregado de Cumplimiento ^c
EE con IC	512,3	3,9	516,2
EE con II	512,3	43,3	555,6
SPET	43,2	41,3	84,5

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor expresado en millones de peso al año

^b : Valor expresado en millones de peso al año

^c : Valor expresado en millones de peso al año

Explorando los resultados de la Tabla 5.7, se puede observar que el instrumento de mercado es más barato en términos de costos de cumplimiento (costo de abatimiento

más costo de fiscalización) que el instrumento comando y control. Entre la política de regulación directa, el costo de cumplimiento de un sistema de estándares de emisión con información completa es menor que el de un estándar con información incompleta ($516,2 < 555,6$).

5.5. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en cambiar algunos parámetros importantes para la evaluación de los costos de abatimiento, de fiscalización y de cumplimiento. Los escenarios simulados son los siguientes: cambios en metas ambientales, cambios en costos de abatimiento, cambio en el factor de sanción, cambio en número de fuentes reguladas. A continuación se presenta los resultados de las simulaciones del análisis de sensibilidad.

5.5.1.- Cambios en metas ambientales

De acuerdo al aspecto discreto de la eficiencia de los equipos, las metas experimentadas son las siguientes:

- Meta menos estricta que meta del escenario de base: 24%
- Meta más estricta que meta del escenario de base : 63%

Al experimentar cambios en metas ambientales, esperamos capturar sus efectos en la selección de tecnología de control de cada fuente. Los cambios en la selección de tecnología de control en su parte afectan el costo agregado de abatimiento y el nivel de precio del permiso de emisión. El cambio en el precio afecta la multa esperada, lo que va influir sobre la probabilidad de monitoreo y por lo tanto afecta los costos agregados de fiscalización y por el último los costos agregados de cumplimiento.

Para cada nivel de abatimiento simulado, se encuentra el factor de sanción (α) para inducir perfecto cumplimiento para ambas políticas. Para la meta menos estricta (24%) el factor de sanción es 20 y para la meta más estricta (63%) el factor se equivale a un 2,1. La Tabla 5.7 presenta los principales resultados para distintas metas simuladas.

Tabla 5.8. Cambios en metas ambientales

Metas ^a	SPET					ESTANDARES DE EMISION		
	Precio ^b	Π ^c	CAA ^d	CAF ^e	CAC ^f	CAA	CAF	CAC
Reducciones de emisiones de 24%	0,51	0,05	10,14	10,32	20,46	504,2	2,44	506,64
Reducciones de emisiones de 63%	0,35	0,47	114,08	97,05	211,13	1174,7	15,69	1190,3

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor expresado como porcentaje de reducción exigido.

^b : Valor expresado en millones de peso por kg de PM10

^c : Probabilidad mínima de monitoreo

^d : Valor expresado en millones de peso al año

^e : Valor expresado en millones de peso al año

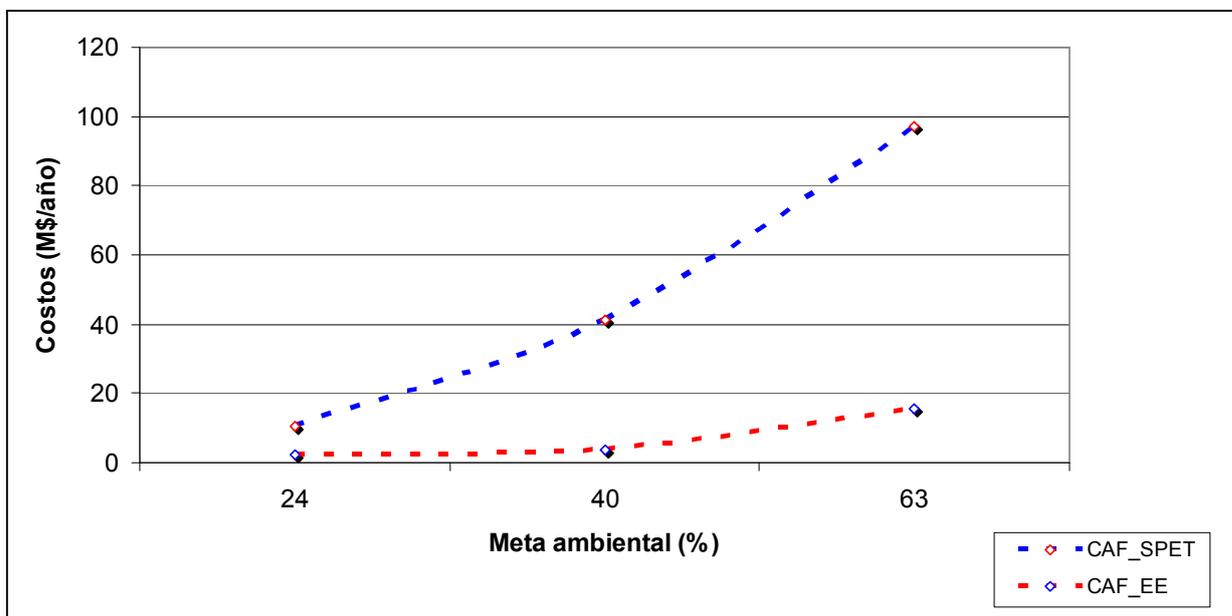
^f : Valor expresado en millones de peso al año

Analizando la Tabla 5.7, para el instrumento de mercado con una meta ambiental menos estricta, el precio del permiso disminuye en un 30% con respecto al escenario de base, eso se explica por un aumento en la oferta de permisos de emisión. Sin embargo, con una meta ambiental más estricta que la meta considerada en la situación de base, el precio del permiso disminuye en un 51% con respecto al escenario de base. Además, con una meta más estricta en el caso de un sistema de estándares de emisión, el costo agregado de fiscalización aumenta en un 304% con respecto a la situación de base¹³. Estos dos últimos resultados son inesperados. Dichos resultados se deben al hecho que las estimaciones de funciones de costos de abatimiento de O’Ryan y Bravo (2001) consideradas permiten fuentes de caudales grandes elegir opciones de control más eficientes (opciones con porcentaje de reducciones de emisión más alta) pero con un menos costo de control asociado. Este fenómeno implica una disminución del precio del permiso con una meta más ambiciosa. La disminución en el precio del permiso produce una disminución en la multa esperada, lo que aumenta el incentivo a transgredir. El aumento del incentivo a transgredir, por su lado, implica un esfuerzo de fiscalización más alto de parte del regulador (probabilidad de monitoreo más alta) y por lo tanto aumentan los costos esperados de fiscalización con una meta más estricta.

¹³ Ver detalles en Anexo No 5

Sin embargo, a partir de este ejercicio se puede observar que la magnitud de la meta ambiental fijada por el regulador afecta considerablemente los costos agregados de cumplimiento y el precio del permiso de emisión. El Gráfico 5.1 muestra la evolución de los costos agregados de fiscalización al variar la meta ambiental.

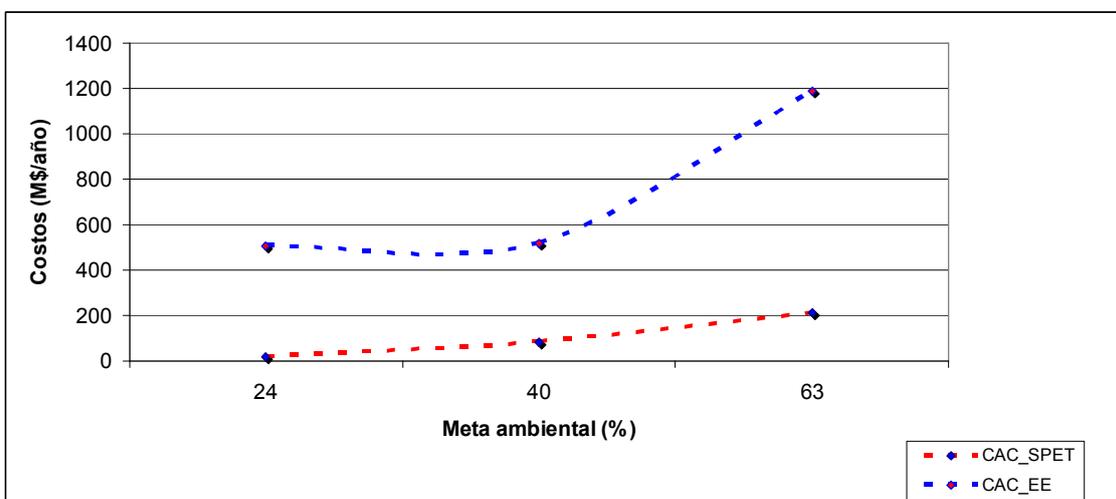
Gráfico 5.1.- Costos agregados de fiscalización, según meta ambiental



Fuente: Elaboración personal

El Gráfico 5.2 muestra la evolución de los costos agregados de cumplimiento según la meta ambiental. Se puede apreciar que el instrumento de mercado sigue siendo más barato en términos de costos de cumplimiento que el instrumento comando y control al variar la meta ambiental.

Gráfico 5.2.- Costos agregados de cumplimiento, según meta ambiental



Fuente: Elaboración personal

5.5.2.- Cambios en costos de abatimiento

El análisis de sensibilidad sobre los costos de abatimiento consiste en aumentos (disminuciones) de un 25% de los valores de costos de abatimiento registrados en el escenario de base. No se alteran las opciones tecnológicas de control. El cambio se refleja en el costo agregado de abatimiento, cual va afectar el costo agregado de cumplimiento para ambas políticas.

Tabla 5.9 Cambios en costos de abatimiento

Cambios en costos de Control	Variación CAA		Variación CAC	
	SPET	EE	SPET	EE
Disminución 25%	-25%	-25%	-13%	-24%
Aumento 25%	25%	25%	13%	24%

Fuente: Elaboración personal

Al aumentar o disminuir los costos de abatimiento en un 25% con respecto a los valores de la situación de base, se observa que los costos agregados de abatimiento aumentan o disminuyen en un 25% para ambas políticas. Sin embargo, los efectos se reflejan diferentes en los costos agregados de cumplimiento. Para el caso de la política de comando y control, el cambio en los costos agregados de cumplimiento es un 24% luego un cambio de 25 % en los costos de abatimiento. Eso se explica por el hecho que la participación relativa de los costos agregados de fiscalización en los costos agregados de cumplimiento es un 0,75%, por lo tanto los costos agregados de cumplimiento reciben todo el efecto. Para el caso de la política de mercado, la participación relativa de los costos agregados de fiscalización en los costos agregados de fiscalización es un 49% por lo tanto los costos agregados de cumplimiento son menos afectados.

Se observa igualmente que al cambiar (aumento y disminución) los costos de control en un 25%, el SPET sigue siendo más barato en términos de costo agregado de cumplimiento¹⁴.

¹⁴ Ver detalles en Anexo No 6.

5.5.3.- Cambios en Factor de Sanción

Los cambios en el factor de sanción realizados son un aumento y disminución de un 50% con respecto a la situación de base. Este análisis permite medir la sensibilidad o elasticidad de los costos agregados de cumplimiento a los cambios en el factor de sanción. No se alteran los costos agregados de abatimiento. Eso afecta los costos agregados de fiscalización debido a que cambios en el factor de sanción implican cambios en la multa esperada por no-cumplimiento.

Tabla 5.10. Cambios en factor de sanción

Cambios en factor de sanción	Variación CAF		Variación CAC	
	SPET	EE	SPET	EE
Disminución 50%	100%	98%	49%	0,6%
Aumento 50%	-35%	-33%	-17%	- 0,25%

Fuente: Elaboración personal

Para disminuciones de un 50% en el factor de sanción, los resultados indican que los cambios en el costo agregado de fiscalización aumentan en un 100% para la política de mercado y en un 98% para el comando y control. Lo anterior, se explica que al disminuir el factor de sanción, se está disminuyendo la multa esperada, lo que disminuye el incentivo para estar o no en cumplimiento. Por otro lado, la probabilidad de monitoreo aumenta, reduciendo los costos agregados de fiscalización. Para aumentos de un 50% en el factor de sanción, el razonamiento es el inverso, los CAF disminuyen en un 35% en el caso de la política de mercado y en un 33% para la política de comando y control¹⁵.

Con respecto a los costos agregados de cumplimiento, se disminuyen en un 17% en el caso del SPET y en un 0,25% al aumentar el factor de sanción. Cuando se disminuye el factor, los CAC aumentan en un 49% para el SPET y en un 0,6% para el estándar de emisiones. Este resultado está determinado por la participación relativa de los costos agregados de fiscalización en el costo agregado de cumplimiento, dado el cambio en el factor afecta sólo los costos de fiscalización.

Al cambiar (aumento y disminución) el factor de sanción en un 50%, el costo agregado de cumplimiento (costo de abatimiento más costo de fiscalización) del SPET es menor que el del sistema de estándares de emisión.

¹⁵ Ver detalles en Anexo No 7.

5.5.4.- Cambios en número de fuentes reguladas

En este escenario, se consideran sólo las fuentes cuyo nivel de emisiones inicial sea superior o igual a 0,07 tonelada al año (70 kg/año). Entonces, consideramos un total de 250 fuentes, cuyas representan 60% del total de las fuentes y emiten 1978,9 kg/día equivalente a 722,3 ton/año (99% de las emisiones totales de la situación de base). Se mantiene el mismo porcentaje de reducción de la situación de base, pero el nivel de emisiones permitido es diferente dado hay en cambios en el nivel agregado de emisiones inicial. La meta de 40% de reducciones de emisiones equivale a 433,4 ton/año. También, se mantiene el mismo factor de sanción de la situación de base bajo supuesto de información completa ($\alpha = 4,9$). Se espera que se cambien los costos agregados de abatimiento consecuencia del cambio en la selección de equipo, el número de fuentes reguladas y el nivel de emisiones inicial. También, se alteran los costos agregados de fiscalización consecuencia del cambio en el precio, lo último afectará la multa esperada, lo que afectará por su lado la probabilidad mínima de monitoreo. La Tabla 5.11 presenta los resultados de la simulación de este escenario.

Tabla 5.11. Cambio en número de fuentes reguladas

SPET				ESTANDAR DE EMISIONES		
Precio ^a	CAA ^b	CAF ^c	CAC ^d	CAA	CAF	CAC
0,78	40,61	25	65,61	404,23	0,68	404,91

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor expresado en millones de peso por kg de PM10

^c : Valor expresado en millones de peso al año

^d : Valor expresado en millones de peso al año

^e : Valor expresado en millones de peso al año

Los efectos del cambio en el número de fuentes están presentados en la Tabla 5.12.

5.12. Efectos de cambio en número de fuentes reguladas

	SPET	EE
	Variación (%)	Variación (%)
CAA	-5,8%	-21%
CAF	-40%	-82%
PRECIO	8,3%	---
MULTA	9,2%	----
CAC	-22,3%	-21,7%

Fuente: Elaboración personal

Mientras que la disminución en el número de fuentes reguladas implica sólo una disminución de 0,8% en las emisiones a ser reguladas, eso afecta considerablemente en términos relativos el precio del permiso, los costos agregados de, los costos agregados de fiscalización y los costos agregados de cumplimiento abatimiento para ambas políticas.

En el caso de la política de mercado, los costos agregados de abatimiento disminuyen en un 5,8%, los costos agregados de fiscalización disminuyen en un 40% con respecto a la situación de base bajo supuesto de información completa, debido a los menores esfuerzos que implican un menor número de fuentes¹⁶.

Con respecto a la política de comando y control, los costos agregados de abatimiento disminuyen en un 21%, los costos agregados de fiscalización se reducen en un 82% dado se aumenta la multa esperada y los costos agregados de cumplimiento disminuyen en un 21,7%.

Al disminuir en un 40% el número de fuentes reguladas, el SPET sigue siendo más barato en términos de costo agregado de cumplimiento.

¹⁶ Ver detalles en Anexo No 8.

6.- CONCLUSIONES

En este trabajo, se evalúa la propiedad de costo-efectividad de un sistema de permisos de emisión transferibles y un sistema de estándares de emisión individuales, incorporando los costos de fiscalización necesarios para implementar un determinado instrumento de control de contaminación en Santiago de Chile. Además, se estudian estrategias de fiscalización para inducir perfecto cumplimiento bajo un sistema de estándares de emisión con información incompleta. La metodología seguida permite calcular los costos de abatimiento para cada fuente, calcular los costos de fiscalización para cada fuente, y los costos agregados de cumplimiento para ambos instrumentos considerados. Debido a que las formas funcionales consideradas presentan el problema de no diferenciabilidad, no fue posible determinar las probabilidades de monitoreo de cada fuente bajo un sistema de estándares de emisión siguiendo los desarrollos teóricos considerados en este trabajo. Se determina estas probabilidades de manera discreta, siendo en acuerdo con la teoría tal que la multa marginal esperada no sea menor al beneficio marginal de la fuente para estar en no cumplimiento.

Los resultados obtenidos de la implementación de los instrumentos de control considerados para las fuentes participando en el programa de compensación de emisiones de Santiago de Chile concluyen que:

1. El sistema de permisos de emisión transferibles (SPET) permite lograr el perfecto cumplimiento al mínimo costo de abatimiento ($43,15 < 512,3$).
2. Bajo supuesto de información completa, el sistema de estándares de emisión asegura el perfecto cumplimiento al mínimo costo de fiscalización ($3,9 < 41,3$). Sin embargo, fiscalizar un SPET es más barato que un sistema de estándares de emisión con información incompleta ($41,3 < 43,3$).
3. Entre la política de regulación directa, el costo de cumplimiento de un estándar de emisión con información completa es menor que el de un estándar de emisión con información incompleta ($516,2 < 555,6$).
4. En términos de costos de cumplimiento, el instrumento de mercado es más barato (costo de abatimiento más costo de fiscalización) que el instrumento de comando y control.

Al cambiar los parámetros considerados en las simulaciones (metas ambientales, costos de abatimiento, factor de sanción, número de fuentes reguladas) las conclusiones anteriores no han afectado mayormente. Sin embargo, al variar las metas ambientales, se ha producido dos fenómenos inesperados. Con una meta más estricta que la cual de la situación de base, el precio del permiso ha disminuido en un 51% y el costo agregado de fiscalización del sistema de estándares ha incrementado en un 304% con respecto al escenario de base. Dichos fenómenos se deben al hecho que las estimaciones de funciones de costos de abatimiento de O’Ryan y Bravo (2001) consideradas permiten fuentes de caudales grandes elegir opciones de control más eficientes pero con un menor costo asociado. Por eso, el precio del permiso ha disminuido dado una meta más estricta. La multa esperada ha incrementado debido a que el precio del permiso fue disminuido, por lo tanto se ha incrementado el incentivo a transgredir. El esfuerzo de fiscalización de parte del regulador fue incrementado y finalmente se aumentan los costos esperados de fiscalizaron con una meta más estricta.

Los dos fenómenos anteriores pueden ser corregidos al evaluar la propiedad de costo-efectividad de los instrumentos bajo estudio considerando ambos costos de abatimiento y de fiscalización con otras estimaciones funcionales de costos de abatimiento. Con nuevas estimaciones de costos de abatimiento más apropiadas para todas las fuentes participando en el Programa de Compensación de Emisión (PCE) de Santiago de Chile, se esperaría un nivel más alto en los costos agregados de abatimiento del instrumento de mercado. El aumento generalizado en los costos de abatimiento implicaría un nivel de precio del permiso más alto para una meta ambiental más ambiciosa. Eso engendraría una multa esperada más alta cual disminuiría el incentivo a transgredir. Lo que se traduciría como un ahorro de esfuerzo de fiscalización de parte del regulador por lo tanto disminuirían los costos esperados de fiscalización con una meta más estricta.

REFERENCIAS

- Aranda, P. “Costos y Efectividades de Opciones de Control para la Contaminación del Aire en Santiago”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile. 1996
- Bravo, R., y O’Ryan, R. “Proposición y Evaluación de Instrumentos de incentivo Económico para Mejorar la Calidad del Aire en Santiago: Aplicación al Caso de Fuentes Fijas.” Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Sin Publicar 2000.
- D.S. N. 94, Artículo 6. “Reglamento que Fija el Procedimiento y Etapas Para Establecer Planes de Prevención y de Descontaminación” Ministerio Secretaria General de La Presidencia de la República. 1995
- Chávez, C., Villena M y Stranlund, J. “The Choice of Instruments to control Pollution under Costly Enforcement and Imperfect Information”. Working Paper XXXX, Department of Resource Economic, University of Massachussets-Amherst. 2007.
- Chávez, C., y Stranlund, J. “Enforcing Transferable Emissions Permit Systems in Presence of Market Power”. Environmental and Ressource Economics, vol. 25, Issue 1: 65-78.
- Environmental Protection Agency (EPA). Handbook “Control Tecnologies for Hazardous Air Pollutants”. 1991.
- Heyes, A. “Implementing Environmental Regulation: Enforcement and Compliance.” Journal of Regulatory Economics 17 (2):107-129, 2000.
- Ley 19.300. Ley de Bases del Medio Ambiente. Marzo 1994.
- Malik, A. “Further Results on Permits Markets with Market Power and Cheating.” Journal Environmental Management 44 (3): 371-390, 2002.
- Malik, A. “Enforcement Cost and the Choice of Policy Instruments for Controlling Pollution.” Economic Inquire, vol.30, Issue 4: 714-721, 1992.
- Montero, J.P. “Price vs Quantities with Incomplete Enforcement.” Journal of Public Economics. Vol. 85, 435-454, 2002

- O’Ryan, R. “Cost-Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Santiago, Chile.” *Journal of Environmental Economics and Management*. N° 31 (302-313), 1996.
- O’Ryan, R., y Bravo, R. “Permisos Transables Frente a la Introducción de un Combustible Limpio: Estudio de caso para PM-10 y NOx en Santiago, Chile.” *Estudios de Economía*, diciembre 2001, vol. 28, número 002. pp. 267-291. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Palacios, M., y Chávez, C. “Programa de Compensación de Emisiones. Evaluación del Diseño de Fiscalización y su Cumplimiento”. *Estudios Públicos* No 88, 2002.
- Ponce, R. y Chávez, C. “Costos de Cumplimiento de un Sistema de Permisos de Emisión Transferibles. Aplicación a Fuentes Fijas en Talcahuano, Chile”. *El Trimestre Económico*, vol. LXXII (4), Número 288:847-876, 2005.
- Stranlund, J. “The Regulatory Choice of Noncompliance in Emissions Trading Programs.” *Environmental and Resource Economics*, 2007, vol.38. Issue 1, Pages 99-117.
- Stranlund, J, y Chávez, C. “Effective Enforcement of a Transferable Emission Permit System with a Self Reporting Requirement” *Journal of Regulatory Economics* Vol 18. 2000
- Stranlund, J., Chávez, C., y Field, B. “Enforcing Emissions Trading Programs: Theory, Practice and Performance.” *Policy Studies Journal*, Vol. 30, No 3: 343-361. 2002.
- Stranlund, J Chávez C. y Villena M. *The Optimal Pricing of Pollution when Enforcement is Costly*. 2007. Documento de Trabajo no Publicado, Proyecto Fondecyt No. 2007-6
- Stranlund J y Dhanda K. “Endogenous Monitoring and Enforcement of a Transferable Emissions Permit System.” *Journal of Environmental Economics and Management* 38(3), 267-282, 1999.
- Villegas, C. y Chávez C. “Fiscalización de un Sistema de Permisos de Emisión Transferibles en Presencia de Poder de Mercado, Estudio Empírico del Programa de Compensación de Emisiones en Santiago de Chile”, 2002.

- Villena, M. y Villena, M. “Analysing Economic Strategies for Air Pollution Control in Santiago, Chile. Environmental Series N°8. Department of Land Economy, University of Cambridge. Septiembre 1998.

ANEXOS

ANEXO 1: DETALLES DE PROGRAMACION

param NT ≥ 0 integer; #cantidad de opciones
param NF ≥ 0 integer; #cantidad de firmas
param META ≥ 0 ; #Meta ambiental

DEFINICION DE CONJUNTOS DE INDICES:

set FIRMAS := 1..NF; #Índice para las firmas
set OPCION := 1..NT; #Índice para las opciones

PARAMETROS DEL MODELO:

param C {FIRMAS,OPCION}; #Matriz de costos
param E {FIRMAS,OPCION}; #Matriz de emisiones

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE DECISIÓN:

var X {(i,j) in {FIRMAS,OPCION}} binary ≥ 0 ;

FUNCIÓN OBJETIVO:

minimize Z :
sum {(i,j) in {FIRMAS,OPCION}} X[i,j]*C[i,j];

CONJUNTO DE RESTRICCIONES:

• Obliga a las fuentes a elegir sólo una opción tecnológica:
subject to restriccion1 { i in FIRMAS }:
sum { j in OPCION } X[i,j]=1;

• Sobre el nivel de emisiones
subject to restriccion2 :
sum {(i,j) in {FIRMAS,OPCION}} E[i,j]*X[i,j] \leq META;

ANEXO 2: EFICIENCIAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE PM10

PROCESO	Ciclón (%)	Multiciclón (%)	Lavador venturi (%)	Precipitador Electrostático (%)	Filtros de Mangas (%)
CA a Pet-6*	5	30	86	94	99
CA a Pet-5#	5	30	86	94	99
CA a Leña	5	30	86	94	99
CA a Carbono	33	70	96	97	99
CA a Gas	40	82	98	99	99
IN a Pet-6	5	30	86	94	99
IN a Pet-5	5	30	86	94	99
IN a Leña	5	30	86	94	99
IN a Carbono	40	82	89	95	99
IN a Gas	40	82	98	99	99

Fuente: elaboración propia basado en Aranda (1996)

*Petróleo 6

Petróleo 5

ANEXO 3: DETALLE SIMULACIONES SPET

Tabla A3.1. Elección de tecnología según la meta ambiental

Meta ambiental ^a		Emisión final agregada	Elección de tecnología ^b de las fuentes									
			Opción 1		Opción 2		Opción 3		Opción 5		Opción 6	
%	kg/año	kg/año	%	No fuentes	%	No fuentes	%	No fuentes	%	No fuentes	%	No fuentes
24	553348	553348	98,8	408	----	---	1,2	5	---	----	----	----
40	436972	436972	98,6	407	---	----	1,2	5	---	---	0,2	1
62	276749	276749	98,6	407	----	---	1,4	6	----	----	----	----
63	269466	269665	98,3	406	----	----	0,75	3	0,75	3	0,2	1

Fuente: Elaboración propia

^a La meta ambiental esta expresada en porcentaje de reducciones de emisiones exigido y en kilogramos de PM-10 permitidas al año.

^b Equipo elegido por las fuentes del conjunto de 6 opciones disponibles (no hacer nada (1), ciclones (2), multiciclones (3), lavador de venturi (4), filtro de mangas (5), precipitador electrostático(6))

ANEXO 4: DETALLE SIMULACIONES ESTANDAR DE EMISIONES

Tabla A4.1. Elección de tecnología según la meta ambiental

Meta ambiental ^a		Emisión final agregada	Elección de tecnología ^b de las fuentes					
			<i>Opción 2</i>		<i>Opción 3</i>		<i>Opción 4</i>	
%	kg/año	kg/año	%	No fuentes	%	No fuentes	%	No fuentes
24	553348	553348	98,55	403	1,45	10	0	0
40	436972	436972	61	252	39	161	0	0
62	276749	276749	61	252	36	150	11	3
63	269665	269665	60	247	35,8	148	18	4,2

Fuente: Elaboración propia

^a La meta ambiental esta expresada en porcentaje de reducciones de emisiones exigido y en kilogramos de PM-10 permitidas al año.

^b Equipo elegido por las fuentes del conjunto de 6 opciones disponibles (no hacer nada (1), ciclones (2), multicyclones (3), lavador de venturi (4), filtro de mangas (5), precipitador electrostático(6))

ANEXO 5: CAMBIOS EN METAS AMBIENTALES

Tabla A5.1. Cambios en metas ambientales

Metas ^a	SPET					ESTANDAR DE EMISIONES		
	Precio ^b	II	CAA ^c	CAF ^d	CAC ^e	CAA	CAF	CAC
24%	0,51	0,05	10,14	10,32	20,46	504,2	2,44	506,64
40%	0,72	0,2	43,15	41,3	84,45	512,3	3,88	516,18
63%	0,35	0,47	114,08	97,05	211,13	1174,7	15,69	1190,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla A5.2. Efectos cambios en metas ambientales sobre otros parámetros

	SPET		EE	
	24%	63%	24%	63%
CAA	-76,5%	164%	-1,58%	129%
CAF	-75%	135%	-37%	304%
PRECIO	-29%	-51%	----	---
PROBABILIDAD	-75%	135%	----	----
MULTA	65%	-79%	-----	-----
CAC	76%	150%	-1,1%	130%

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6: CAMBIOS COSTOS DE ABATIMIENTO

Tabla A6.1. Cambios en Costos de abatimiento

Variación en CAA	SPET			EE		
	CAA ^a	CAF	CAC ^b	CAA	CAF	CAC
+ 25%	53,93	---	95,23	640,37	----	644,25
- 25%	32,26	----	73,66	384,22	----	388,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6.2. Efectos de cambios en costos de abatimiento sobre otros parámetros

Cambios en costos de Control	Variación CAA		Variación CAC	
	SPET	EE	SPET	EE
Disminución 25%	-25%	-25%	-13%	-24%
Aumento 25%	25%	25%	13%	24%

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7: CAMBIOS EN FACTOR DE SANCION

Tabla A7.1. Cambios en facto de sanción (α)

Variación en α	SPET			EE	
	Π	CAF ^a	CAC ^b	CAF	CAC
- 50%	0,4	82,6	125,75	7,70	520
+ 50%	0,13	26,84	69,99	2,57	514,87

Fuente: Elaboración propia

Tabla A7.2. Efectos de cambios en costos de abatimiento sobre otros parámetros

Cambios en factor de sanción	Variación CAF		Variación CAC	
	SPET	EE	SPET	EE
Disminución 50%	100%	98%	49%	0,7%
Aumento 50%	-35%	-33%	-17%	- 0,25%

Fuente: Elaboración personal

ANEXO 8: CAMBIO EN NÚMERO DE FUENTES REGULADAS

A8.1. Cambio en número de fuentes reguladas

SPET				ESTANDAR DE EMISIONES		
Precio ^a	CAA ^b	CAF ^c	CAC ^d	CAA	CAF	CAC
0,78	40,61	25	65,61	404,23	0,68	404,91

Fuente: Elaboración personal

^a : Valor expresado en millones de peso por kg de PM10

^c : Valor expresado en millones de peso al año

^d : Valor expresado en millones de peso al año

^e : Valor expresado en millones de peso al año

A8.2. Efectos de cambio en número de fuentes reguladas

	SPET	EE
	Variación (%)	Variación (%)
CAA	-5,8%	-21%
CAF	-40%	-82%
PRECIO	8,3%	---
MULTA	9,2%	----
CAC	-22,3%	-21,7%

Fuente: Elaboración personal