

Los impactos del Transantiago en la contaminación atmosférica de Santiago:

Una estimación econométrica ^{1*}

Eugenio Figueroa B.

Andrés Gómez-Lobo E.

Pablo Jorquera

Felipe Labrín

Resumen

Se evalúa la contribución realizada por el proyecto Transantiago, que desde el 2007 reestructuró el sistema de transporte público de Santiago, para disminuir la contaminación atmosférica de la ciudad en el período 2007-2010. Se utiliza una metodología econométrica que controla por los efectos confundentes contemporáneos y se concluye que el Transantiago disminuyó en $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el promedio diario de concentraciones de MP10 en la ciudad, provocando un ahorro que se estima en \$417.756 millones (US\$ 790.2 millones) por gastos en salud evitados, \$49.385 millones (US\$ 93,4 millones) de los cuales corresponden al ahorro de gastos en atenciones públicas de salud.

* Ph.D. Eugenio Figueroa B. es economista, profesor del Departamento de Economía y Director del Centro de Economía del Medio Ambiente y los Recursos Naturales de la Universidad de Chile. Ph.D. Andrés Gómez-Lobo es economista y docente del Departamento de Economía de la Universidad de Chile. Pablo Jorquera es Ingeniero Comercial Mención Economía, Magíster (c) en Políticas Públicas de la Universidad de Chile. Felipe Labrín es Ingeniero Comercial Mención Economía de la Universidad de Chile.

* Se agradece los comentarios y sugerencias recibidos en seminarios en la Escuela de Gobierno de la Universidad Adolfo Ibáñez, Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica, el Departamento de Economía de la Universidad Alberto Hurtado y en el seminario interno del Departamento de Economía de la Universidad de Chile. Se agradece muy especialmente los comentarios y sugerencias de Eduardo Fajnzylber. Los errores y omisiones del trabajo son de exclusiva responsabilidad de sus autores.

1. Introducción

El plan de reforma y reestructuración del sistema de transporte público de la ciudad de Santiago, Chile, más conocido como Transantiago, demostró desde sus inicios serios problemas de diseño e implementación. Desde febrero del 2007, cuando el nuevo sistema comenzó su fase definitiva de implementación, ha sido cuestionado por los medios de prensa, usuarios y no usuarios. Sin embargo, por propósito y diseño, el Transantiago debía generar una serie de beneficios para la ciudad al reducir algunas externalidades provocadas por el transporte; y hay alguna evidencia que así ha ocurrido. Por ejemplo, los accidentes que involucran a un bus de la locomoción colectiva se redujeron en Santiago desde 6.366 en el año 2005 a 2.937 en el año 2010.² Consistente con esta tendencia, durante este mismo período, el número de lesionados en accidentes que involucraban a un bus disminuyó de 4.409 a 2.248, y el de fallecidos, se redujo de 112 a 83, aunque durante el 2009 había bajado a 58.

Por otro lado, según datos de Carabineros de Chile, el número de delitos con intimidación, violencia o sorpresa en la locomoción colectiva se mantuvo casi constante para los pasajeros entre los años 2006 y 2008, pero el de los delitos a conductores bajó de 1.657 en el año 2006 a 147 en el año 2008. Esto tiene relación con la introducción de una tarjeta de pago electrónica que eliminó la necesidad de que los conductores de buses manejen dinero en efectivo.

También es evidente, aunque no hay mediciones para respaldarlo, que el nivel de ruido, o contaminación acústica en la ciudad disminuyó como consecuencia de la reforma. Esto se explicaría principalmente por la renovación de la flota y la nueva estructura de recorridos.

Por otra parte, la renovación de flota asociada al Transantiago —y que reemplazó una fracción importante de los 8.000 buses originales por buses que cumplieran con estándares Euro III o superiores— debería haber disminuido también la contaminación atmosférica en la capital.³ Previo a la reforma, el transporte público era una de las fuentes antropogénicas más importantes de emisiones de material particulado en la capital, representando por sí sola el 22% de estas emisiones (CONAMA, 2006). Así, era de esperar que una modernización significativa de la flota y una racionalización de los recorridos tuvieran como consecuencia una reducción de las emisiones del sector.

²Estas cifras provienen de Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET) que a su vez obtuvo las estadísticas de Carabineros de Chile. Se debe remarcar que antes del Transantiago, y considerando 8.000 buses en operación, cada bus estaba involucrado en un accidente cada 15 meses.

³ A diciembre del 2007, el 57,6% de la flota eran buses Euro III o superiores (Sectra 2007); tres años después, el 2010, casi el 100% de la flota ya era Euro III o superior.

Existe evidencia parcial que confirmaría la hipótesis anterior. El Centro Mario Molina Chile (2007) realizó un estudio comparando las emisiones a nivel de calle en dos arterias de importancia de la ciudad (Alameda y Gran Avenida), en el invierno del 2006, antes de la fase definitiva del Transantiago, y en el invierno del 2007 después de iniciada esta fase. Si bien para el período monitoreado hubo un aumento de un 45% de las concentraciones de MP10 a nivel Metropolitano —presumiblemente como consecuencia del aumento en el uso del transporte privado, mayores emisiones de la industria y factores atmosféricos— a nivel de calle se observó una disminución del 30% en el número de partículas ultrafinas (MP 2,5) que corresponden a las emisiones de motores de vehículos diesel, como partículas condensadas y hollín. Además, utilizando modelos de contaminación, dicho estudio concluyó que el aporte del transporte público a la contaminación por óxidos de nitrógeno (*NOx*) a nivel de calle disminuyó en 50%.

Sin embargo, el estudio anterior no explica la mayor contaminación a nivel de ciudad en el 2007 comparado con el 2006. Otros autores, Gallego, Montero y Salas (2011), estudiaron las mediciones de las estaciones de monitoreo y concluyen que hubo un aumento de 31% en las concentraciones de monóxido de carbono (*CO*), sólo en las horas punta, en Santiago presumiblemente atribuibles al aumento en el uso de automóviles como consecuencia de los problemas asociados a la reforma. Sin embargo, no analizan el efecto sobre las concentraciones de material particulado.

La dificultad para identificar el efecto del Transantiago sobre la contaminación en la capital, es que al mismo tiempo de que se introdujo este cambio en el sistema de transporte de la ciudad, ocurrieron otros fenómenos que también afectaron la contaminación. El más relevante es que, a partir del año 2007, se intensificaron los cortes de suministro de gas natural proveniente de Argentina, llegando a ser prácticamente 100% en los años 2007, 2008 y 2009 para el consumo no residencial. Esto generó una sustitución generalizada por petróleo del gas natural que utilizaba el sector industrial, elevando la contribución de este sector en la contaminación de Santiago.

Consistente con lo anterior, es interesante notar que a partir de Septiembre 2009, cuando se pone en funcionamiento la planta de regasificación de gas natural licuado en Quintero —eliminando la dependencia de Argentina en el suministro de este combustible—, la industria vuelve a utilizar gas natural, y es justamente en 2010 cuando se registra el invierno con menores episodios críticos de contaminación desde 1997, según registros de la red MACAM2.⁴

Lo anterior podría implicar que, luego de desaparecer los efectos generados por los cortes de gas natural de Argentina, en el año 2010 finalmente se hicieron evidentes los

⁴ La MACAM2, operada por el Ministerio de Salud, es una red de estaciones dedicadas a monitorear y medir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en distintos puntos de la ciudad de Santiago, y que se estableció el año 1997, extendiendo y mejorando técnicamente la anterior Red de Monitorio Automática de Contaminantes Atmosféricos (red MACAM).

beneficios del Transantiago en cuanto a reducción de emisiones y de niveles de contaminación. Desafortunadamente, esta conclusión es desafiada por al menos dos hechos. En primer lugar, porque en el invierno del 2010 se registraron también condiciones meteorológicas muy favorables en Santiago, lo que favoreció la limpieza del aire. En segundo lugar, porque en el invierno del 2011 se evidenció un aumento en los episodios críticos de contaminación.

En definitiva, para establecer el impacto del Transantiago sobre la contaminación en la capital es necesario esclarecer (*desenredar*) la contribución de distintos factores, incluyendo las condiciones atmosféricas, los efectos de los cortes de gas de Argentina, el crecimiento económico y el propio Transantiago, entre otros factores. Para ello, en este trabajo se utiliza datos diarios de contaminación desde 1997 al 2009, de condiciones meteorológicas y atmosféricas, de los cortes del suministro de gas de Argentina, además de otras variables, para estimar un modelo estadístico que explique los niveles de contaminación de material particulado grueso (MP10) en Santiago.

Los resultados indican que entre los años 2007 y 2010, se evidencia una disminución de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio diario de la concentración de MP10 en la región metropolitana, que no es explicada por condiciones atmosféricas, u otras variables del modelo, y que puede atribuirse al efecto del Transantiago.

Adicionalmente, evaluando la reducción de concentración de MP10 utilizando funciones dosis-respuesta y valorizando los cambios en mortalidad y morbilidad según los gastos en salud asociados, se estima que la reducción en la contaminación equivale a un ahorro de \$417.756 millones (o US\$ 790.2 millones⁵) para el trienio 2007-2010, de los cuales \$49.385 millones (o US\$ 93,4 millones) corresponderían al ahorro de gastos en atenciones públicas de salud.

El resto de este estudio está organizado de la siguiente manera: en la siguiente sección se describe el fenómeno de la contaminación atmosférica en Santiago, y se revisa las políticas adoptadas por la autoridad para su control. Luego, se presenta un modelo estadístico de la concentración de la contaminación por material particulado que permite inferir el efecto del plan Transantiago sobre la contaminación, aislándolo de otros factores relevantes. Luego se presentan algunos análisis destinados a examinar la robustez de las estimaciones. Finalmente, se presenta una valoración económica de la reducción ocurrida en la contaminación..

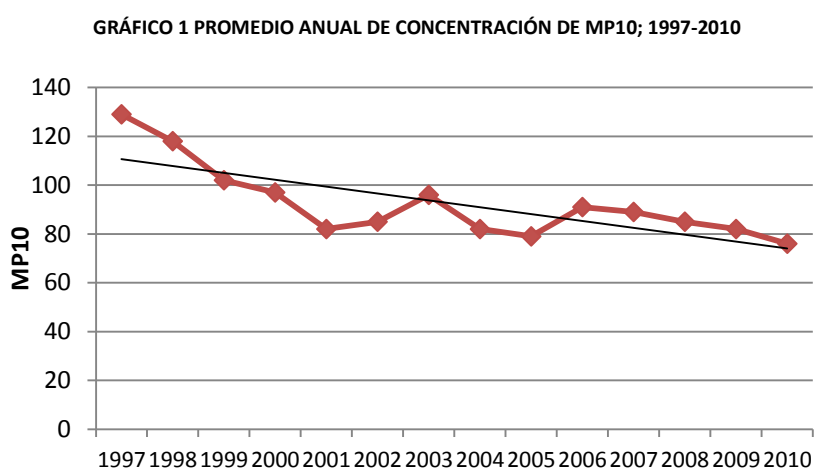
2. La Contaminación en la ciudad de Santiago

Desde hace décadas, la ciudad de Santiago experimenta un alto grado de contaminación atmosférica, medido por material particulado (MP), principalmente entre los meses de abril y agosto. Cada año se registra una serie de episodios de contaminación denominados “críticos”, que son decretados por la autoridad regional

⁵ Tipo de cambio corresponde al USD observado promedio 2007-2010 del Banco Central de Chile (US\$1 = \$528,7).

(Intendencia) y que se caracterizan porque la concentración de contaminantes en el aire supera los niveles máximos permitidos por los estándares de calidad ambiental de la legislación vigente, considerados como peligrosos para la salud humana.⁶

El Gráfico 1 presenta la evolución del promedio de concentración anual de MP10 entre los años 1997 y 2010.⁷ Se observa que dicho promedio muestra una tendencia decreciente, aunque moderada, indicativa de que la calidad del aire ha mejorado persistentemente en los últimos 15 años, con una mejora sustancial el año 2010. Cabe destacar que esto se dio en un contexto de crecimiento económico, por lo que las concentraciones por unidad de producto tuvieron un descenso mayor.⁸



Fuente: Elaboración propia, en base a datos de la Seremi de Salud RM

El Gráfico 2 muestra el número de episodios críticos decretados por la autoridad para la ciudad de Santiago, desglosados según su gravedad.⁹ Se observa una reducción del número de episodios críticos decretados, lo que nuevamente es indicativo de las mejoras en los niveles de concentración de contaminantes. El descenso claro observado a partir del año 2000 se explicaría principalmente por la incorporación del

⁶ Los episodios críticos son clasificados como Alertas, Preemergencias o Emergencias según el nivel de las concentraciones esperadas.

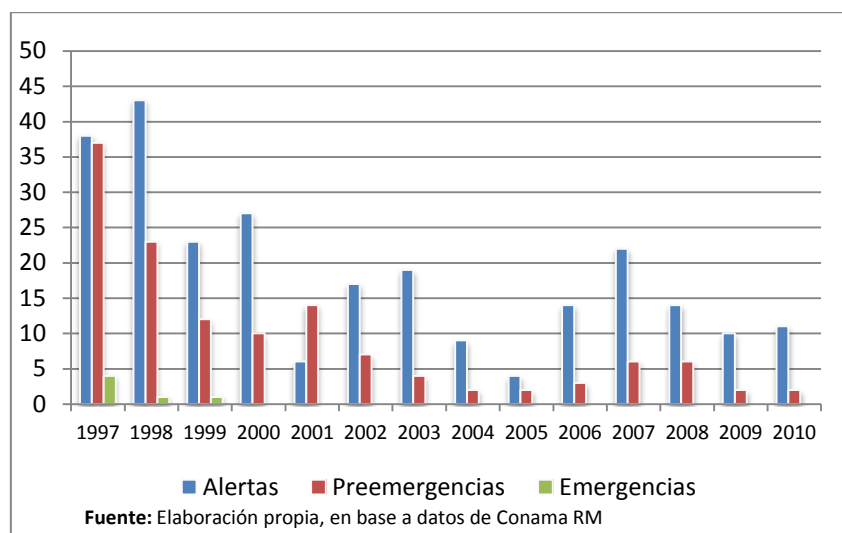
⁷ Calculado como el promedio simple de las concentraciones horarias reportadas por la red MACAM2, para los meses críticos, entre abril y agosto; desde el año 1997 hasta el 2009; para 7 estaciones, que presentan series de datos completas para dicho periodo.

⁸ El crecimiento del PIB de la Región Metropolitana fue de 43,8% en el período 1997-2009 (calculado a partir de las series no empalmadas de datos de PIB real para los períodos 1997-2003 (base 1996) y 2003-2009 (base 2003) del Banco Central). En el mismo período el crecimiento del PIB nacional fue de 46,7%.

⁹ Cuando el Intendente decreta un episodio crítico, determina la gravedad del mismo (alerta, preemergencia o emergencia) de acuerdo al nivel del Índice de Calidad del Aire referido a Partículas (ICAP), y ella define las medidas medioambientales que deben implementarse para enfrentar el episodio y proteger a la población, las que son definidas en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA). La gravedad del episodio es mayor y las medidas que ella gatilla son más estrictas mientras mayor sea el nivel del ICAP registrado.

gas natural al sector industrial, que reemplaza a las antiguas fuentes energéticas, como el petróleo o la leña, que son más contaminantes (CONAMA Región Metropolitana, 2009). Así mismo, se destaca la caída más pronunciada en el número de episodios extremos preemergencias y emergencias), y la desaparición de las emergencias en los últimos 10 años.

GRÁFICO 2 NÚMERO DE EPISODIOS CRÍTICOS OBSERVADOS; 1997-2010



En 1996, por decreto supremo (DS) N° 131 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES), se declaró a la Región Metropolitana como *Zona Saturada* para MP10, partículas totales en suspensión (PTS), monóxido de carbono (NO) y ozono (O3), y como *Zona Latente* para dióxido de nitrógeno (NO2), debido a la superación de las normas establecidas para las concentraciones de estos contaminantes. Como resultado, en 1997 se elabora el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA), que se aprueba en 1998, mediante DS 16 de MINSEGPRES, y establece medidas para la descontaminación, fijando dos ejes de acción principales: *Sector transportes y combustibles*, y *Sector Industrial, comercio y residencial* (ver Merino et al. 2005).

En relación al transporte, se destaca la adopción de normas de emisión más estrictas, incluyendo medidas para la reducción de la emisión de MP10, y que en buena parte son responsables y dan origen al plan de transporte público Transantiago, cuyos efectos aquí se analizan. Previo a la implementación de éste, un estudio de la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana (CONAMA Región Metropolitana, 2006) estimó que, en el año 2005, el sector transporte aportaba el 49% de las emisiones de origen antropogénico responsables de la concentración atmosférica de MP10, mientras que el transporte público, específicamente, aportaba el 22% y el transporte liviano (autos particulares mayoritariamente) representaba un aporte relativamente bajo, de 9%. Según el mismo estudio, la contribución del sector industrial a la contaminación total en la Región Metropolitana superaba el 30%.

Es importante señalar que, en el caso del sector industrial, se debe considerar que las evaluaciones existentes mencionadas anteriormente estudian sólo hasta el año 2005.

La introducción del gas natural en la década del 2000 tuvo un efecto relevante sobre la emisión de gases proveniente de ese sector. Sin embargo, en el año 2004 comienzan a constatarse cortes del suministro de gas natural proveniente de Argentina, pudiendo cambiar la tendencia a la baja de las emisiones industriales observada hasta el año 2005. En el análisis empírico de más adelante se da especial atención a este hecho.

El primer paso para la renovación del transporte urbano lo constituyó el Plan de Transporte Urbano de Santiago (PTUS) del año 2001, cuyos objetivos iniciales eran:¹⁰

- Reducción del parque total de buses de cerca de 8.000 a 4.700 aproximadamente. Además se contemplaba la renovación de parte importante de la flota de buses troncales (inicialmente tres de los cinco servicios troncales), que debían cumplir las normas de emisión Euro III y IV.¹¹
- Uso de filtros que reducirían la emisión de partículas contaminantes en todos los buses existentes (que cumplen con la norma Euro I y Euro II), en tres unidades troncales y nueve unidades alimentadoras.
- Utilización de combustible diesel más limpio (sólo 50 partes por millón de azufre) que cumpliera con estándares internacionales.
- Implementación de vías segregadas para el transporte público. El PTUS consideraba 15 proyectos de corredores segregados, con un total de 225 km de vías, pero en un horizonte de casi 20 años.¹²
- Extensión de la red del Metro de Santiago en las líneas 2 y 5 y la creación de la línea 4.
- Reducción del tiempo de viaje y de los kilómetros totales recorridos por el sistema de buses.

No todas estas medidas se habían implementado cuando el Transantiago entró en operación en febrero del año 2007. El programa ha sido objeto de constantes revisiones y cambios en su operación, tales como cambios en los recorridos y en el número de buses (el que después de la reducción inicial, volvió a aumentar reiteradamente para mejorar la calidad de servicio). Una medida importante que no se implementó a cabalidad fue la instalación de filtros. Sin embargo, durante el año 2010 se completó la renovación casi completa de la flota, por lo que esta medida diseñada para los buses antiguos perdió relevancia. Con respecto a los corredores segregados,

¹⁰ Medidas descritas en el sitio web de coordinación del programa Transantiago <http://www.Transantiago.cl/web2005/cont20.htm>.

¹¹ Las normas de emisión EURO III y IV, regulan la emisión de contaminantes para vehículos pesados y fijan los estándares de emisión de vehículos nuevos en la Unión Europea. Constituyen actualizaciones de la directiva 70/220/CCE de la Comisión Europea.

¹² A octubre de 2006 se contaba con sólo 16 km construidos.

cabe destacar que el plazo para su construcción se adelantó al 2014 y a diciembre del 2009 se había completado casi 90 kilómetros de los 225 previstos por el plan.

A pesar de los tropiezos iniciales la casi completa renovación de buses al 2010, más la racionalización de los recorridos del sistema, el uso más intensivo del Metro y la recuperación de la demanda del transporte público como consecuencia de los mejoramientos operativos logrados desde el 2007, hacen pensar que la implementación del Transantiago puede haber generado un descenso en la contaminación de la capital. Para analizar empíricamente si ello ha sido efectivamente así o no, en la siguiente sección se especifica un modelo estadístico para explicar la evolución de la contaminación atmosférica en Santiago durante el período de interés y estimar el eventual efecto del Transantiago sobre ella.

3. Modelo Propuesto y Datos Empleados para su Estimación

Para la modelación, la variable de interés a explicar es el nivel de contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago. Existiendo diversas formas de contaminación atmosférica, el presente trabajo se enfoca específicamente en la concentración de MP10. Esto por dos motivos: por una parte, las concentraciones de MP10 han sido las que mayor preocupación han generado entre las autoridades y, en concordancia con lo anterior, las concentraciones de MP10 han sido utilizadas como indicador de la calidad del aire y como variable central para el diseño y seguimiento de las políticas públicas por parte de los organismos competentes. Por otra parte, existe una disponibilidad amplia de datos con la antigüedad suficiente para llevar a cabo un estudio estadístico.

En el presente estudio se utiliza la información oficial disponible sobre concentraciones diarias de MP10, durante el periodo 1997-2010, en los meses de abril a agosto (ambos inclusive) de cada año. Esto último debido a que la CONAMA, a través del PPDA, propone la aplicación de *medidas permanentes* para el control de emisión de contaminantes entre el 1 de abril y el 31 de agosto de cada año, periodo crítico para las condiciones de contaminación de la ciudad debido a las condiciones meteorológicas imperantes durante el período otoño-invierno en la cuenca de Santiago.¹³

Se especifica el siguiente modelo para explicar las concentraciones de MP10:

$$MP10_{i,t} = \alpha + \beta_1 MP10_{i,t-1} + \beta_2 Misumi_t + \beta_3 Imacec_t + \beta_4 Lluvias_t + \beta_5 Gas_t + \overline{\beta_6} \text{Días}_t + \overline{\beta_7} \text{Episodiocrítico}_{t-1} + \beta_8 \text{Tendencia} + \overline{\beta_9} \text{Estación}_i + \beta_{10} \text{Azufre} + \gamma \text{D07} + v_{i,t}$$

Donde el subíndice i identifica a la estación de monitoreo de calidad ambiental de la red MACAM2 correspondiente a cada medición, y t corresponde a la fecha de la misma.

¹³ En estos meses se producen inversiones térmicas que reducen la ventilación de la cuenca de Santiago provocando el aumento de las concentraciones de contaminantes (Merino 2006).

Además las variables Dia_t , $Episodiocrítico_{t-1}$ y $Estación_i$ corresponden a vectores de variables dummies para: día de la semana, tipo de episodio crítico decretado el día previo a t , y estación de monitoreo de la red MACAM2.

Se incorporan también algunos rezagos de la variable dependiente (se presentan abajo los resultados de hasta 3 rezagos) como variables explicativas.¹⁴

A continuación se entregan más detalles de cada una de las otras variables.

Concentración de MP10

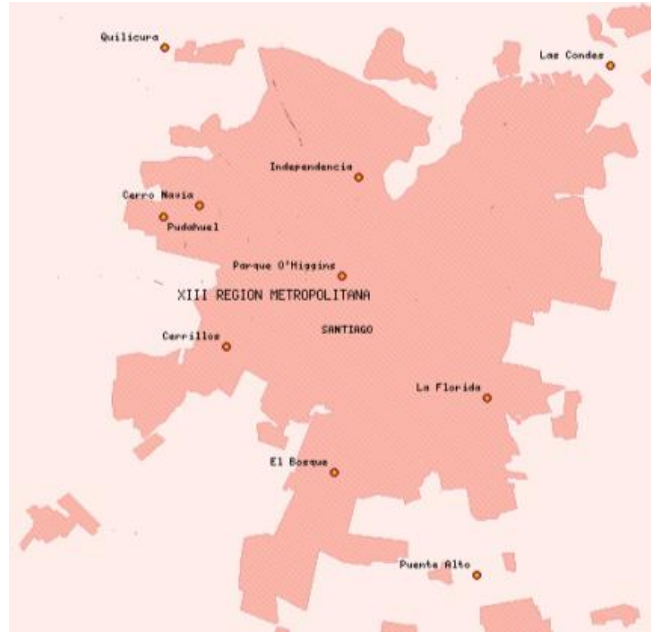
Las concentraciones de MP10 es la variable dependiente del modelo propuesto por lo que su medición resulta crucial para la aplicación empírica del mismo. Afortunadamente, desde 1964 se mide los niveles de contaminación atmosférica para la ciudad de Santiago. Sin embargo, sólo en 1987 se instaló la Red de Monitoreo Automática de Contaminantes Atmosféricos (red MACAM). Esta red inicial se compuso de cuatro estaciones fijas y una móvil, que entregaban la concentración de MP10. Posteriormente, en abril de 1997, gracias a la cooperación del gobierno de Japón, se amplió y mejoró la red MACAM, transformándola en la denominada red MACAM2, compuesta ahora de ocho estaciones distribuidas en las distintas comunas del Gran Santiago (ver Figura 1).¹⁵

Estas estaciones están equipadas para medir concentraciones atmosféricas de CO₂, SO₂, NO₂, O₃ e hidrocarburos totales, y para MP10 cuentan con monitores continuos que les permiten medir y registrar las concentraciones de forma horaria. Por lo anterior, en el presente estudio se utiliza los datos de concentraciones de MP10, entre los años 1997 y 2010, y sólo para las siete estaciones que presentan información paratodos los años del período, por lo que las mediciones de la estación de la comuna de Providencia no se utilizan.

¹⁴ Cabe destacar que el modelo especificado corresponde a un modelo de panel dinámico con efectos fijos cuando se incluyen rezagos de la variable dependiente al lado derecho de la ecuación. Es bien conocido que una estimación tradicional de panel con efectos fijos entregará coeficientes sesgado si se incluye la variable dependiente rezagada como variable explicativa. En ese caso, se debe utilizar estimadores como los de Arellano y Bond (1991) u otros similares. Sin embargo, el problema mencionado ocurre en paneles “cortos”, cuando t es relativamente pequeño. A medida que t crece, el sesgo disminuye. Estudios de Monte Carlo como los de Judson y Owen (1999) sugieren que cuando $t > 30$ ya no hay un sesgo importante de estimar el modelo mediante técnicas tradicionales de panel. En esta aplicación t supera ampliamente este límite, por lo que un eventual sesgo no es relevante en este caso.

¹⁵ Las ocho estaciones se ubican en las comunas de Independencia, Las Condes, Santiago, Pudahuel, El Bosque, La Florida, Cerrillos, y Providencia. Además de estas estaciones, ha habido algunas estaciones experimentales con mediciones ocasionales, como La Dehesa; otras se han agregado, como Cero Navia en el 2009; y existen otras estaciones complementarias a la red MACAM2, como las de las comunas de Puente Alto, Talagante y Quilicura.

FIGURA 1 UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO Y MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE SANTIAGO (RED MACAM2)



Fuente: SINIA de CONAMA

El presente trabajo utiliza datos diarios debido a la poca o nula información horaria disponible para la mayoría de las otras variables del modelo. Para la transformación de datos horarios a diarios, se utiliza el promedio simple de 24h diarias. Esta metodología es empleada en diversas investigaciones tanto internacionales como nacionales.¹⁶

Índice Misumi

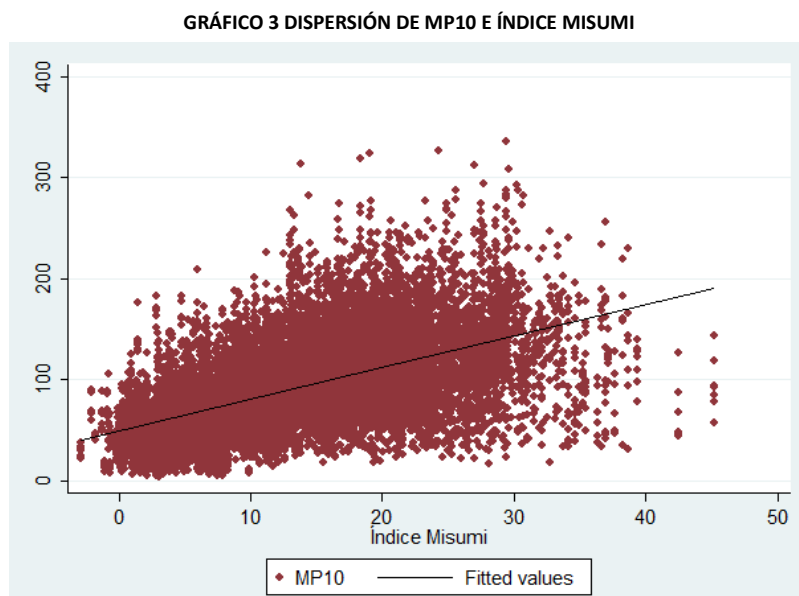
A fines de los años noventa, el investigador japonés Dr. Yukio Misumi junto con investigadores del Centro Nacional del Medioambiente (CENMA), desarrolló un índice de estabilidad atmosférica vertical para la ciudad de Santiago. Este índice, denominado *Índice Misumi* se determina sobre la base de la diferencia entre las temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas operadas por el CENMA ubicadas en La Platina y Lo Prado. La primera es una estación meteorológica ubicada en la Av. Santa Rosa en la comuna de La Pintana, a aproximadamente de 650 msnm; mientras que la segunda está ubicada en el cerro Lo Prado (sobre el túnel Lo Prado), al poniente de la ciudad de Santiago y a aproximadamente 1.200 msnm. El índice Misumi mide la intensidad de la inversión térmica en la cuenca de Santiago, lo que constituye un factor crucial en la concentración de la contaminación atmosférica en la cuenca y se construye de forma horaria, por lo que en el presente trabajo se transformó en un índice diario.¹⁷ Para ello se usó nuevamente un promedio simple de 24h diarias.

Para el análisis que aquí se hace, resulta clave la relación entre el Índice Misumi y la concentración de MP10. Como se observa en el Gráfico 3, existe una relación positiva y

¹⁶ Este mismo tratamiento de la variable relevante ha sido utilizado en Atal (2009).

¹⁷ Explicaciones sobre la importancia de la inversión térmica en la cuenca de Santiago sobre los niveles de contaminación atmosférica de la ciudad ver Merino (2006) y Garreaud & Rutlant (2006).

alta entre estas dos variables, aunque la simple relación graficada no toma en cuenta el efecto de otras variables que podrían haber afectado la concentración durante el período analizado.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos de SEREMI Salud RM y CENMA.

Imacec

Es esperable que mayores niveles de actividad económica generen mayores niveles de emisión de contaminantes y, por ende, de concentración de los contaminantes (ver CONAMA (2009)).¹⁸ Por lo tanto, en el modelo propuesto se incluye un indicador de actividad económica en la forma del Índice Mensual de Actividad Económica (IMACEC) medido por el Banco Central de Chile, ya que éste reporta datos de forma mensual y constituye una aproximación del comportamiento de la actividad económica en el corto plazo.

Lluvias

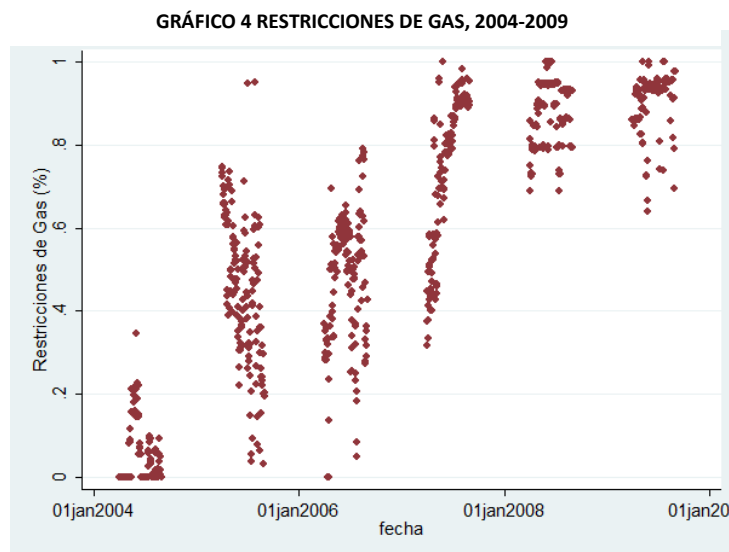
Las lluvias son un importante factor determinante de la concentración de MP10, dado que ellas disipan su presencia en la tropósfera. La variable de Lluvias se construye utilizando los datos reportados por el CENMA, que opera la estación de monitoreo meteorológica de La Platina. Dado que esta estación no reportaba datos para los años 1999 y 2003, éstos fueron complementados por los datos de la Dirección Meteorológica de Chile. Esta variable está construida como una variable *discreta* que reporta la ocurrencia de un fenómeno de precipitación, sin tomar en cuenta la cantidad de horas o milímetros de agua caída. El impacto de una precipitación sobre la concentración de MP10 podría prolongarse en el tiempo más allá del día en que ocurre

¹⁸ Este “efecto escala” de la actividad económica sobre las emisiones de los contaminantes no tiene necesariamente una relación directa ni lineal con las concentraciones resultantes de los contaminantes involucrados; pero, en general, aumentos de las emisiones implicarán aumentos de las concentraciones si el aumento de la escala de la economía no va acompañado de cambio en las tecnologías de producción o en la composición de la actividad económica (participación relativa de los distintos sectores económicos).

la precipitación, por lo cual en el modelo se incluye también la variable de lluvia rezagada un día, de modo de captar esta eventual interacción entre esta variable atmosférica y la concentración diaria de MP10, un día después de efectivamente ocurrida la precipitación.

Gas

Esta variable explicativa se incluye en el modelo para incorporar la esperable repercusión sobre las concentraciones atmosféricas de MP10 en Santiago de las drásticas reducciones o cortes en los envíos de gas provenientes de la República Argentina a partir del año 2004. Esto es relevante por cuanto habría implicado la reconversión de las fuentes energéticas de la industria (el sector residencial no fue afectado por los cortes) hacia energías más contaminantes, como el petróleo. Los datos sobre las restricciones de provisión de gas para la zona central son reportados, como porcentaje del total de la demanda interna, por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y se extienden desde mayo del año 2004 hasta agosto del año 2009, fecha en la que comenzó a operar la planta de recepción, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado (GNL) de Quinteros. Los datos que se presentan en el Gráfico 4 muestran que en el año de entrada en vigencia del Transantiago, las restricciones de gas alcanzaron los niveles más altos en su historia previa, y continuaron creciendo hasta la entrada en operación de la planta de Quinteros.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos de la CNE.

Día

Las intensidades con que se desarrollan las distintas actividades generadoras de emisiones contaminantes no son iguales todos los días de la semana, sino que varían para los diferentes días. Asimismo, el uso de vehículos, tanto con fines productivos como recreativos, es diferente los distintos días laborales, o los fines de semana. Para captar el efecto de esto en las concentraciones de MP10, el modelo incluye un vector

que incorpora una variable *discreta* para cada día de la semana, y que en la estimación empírica debería permitir captar el efecto diferenciado de los distintos días de la semana sobre los niveles de concentración en estudio. Se consideró como día domingo los que corresponden a feriado.

Episodios Críticos

Es esperable que el nivel de concentraciones atmosféricas medido en un día cualquiera esté influenciado por el hecho de si el día anterior — $t-1$ — al de la concentración medida — t — se decretó algún episodio crítico: alerta, preemergencia o emergencia. Incluir una variable que capte esta eventual relación resulta relevante ya que al decretarse un episodio crítico la autoridad impone una serie de medidas para controlar las emisiones de fuentes fijas y móviles, lo que podría afectar la concentración de MP10 del día siguiente. Por ello, en el modelo se incluye esta variable “Episodios Críticos”, que para su aplicación empírica se estructura con tres variables mudas (0 o 1), una para cada tipo de episodio crítico (alerta, preemergencia o emergencia ambiental). En la aplicación empírica del modelo, esto permite determinar no sólo si existe o no el efecto esperable, sino que además, la importancia relativa del efecto de cada uno de los tres tipos de episodios.

Tendencia

El modelo también incluye una variable de tendencia diaria para captar los efectos del mejoramiento gradual del parque automotriz, los cambios tecnológicos, las mejoras en la productividad de los insumos, ciertos cambios en el comportamiento de los individuos, y otros fenómenos no capturados por el resto de las variables incluidas en el modelo.

Estación

Las concentraciones de MP10 son medidas por la Red MACAM2 y, como se explicó más arriba, éstas se encuentran emplazadas de forma dispersa en la región Metropolitana, razón por la cual existen características geográficas y de ventilación diversas que condicionan las mediciones de cada estación. Estas características se controlan en la aplicación empírica del modelo mediante un efecto fijo (variable *discreta*) por estación.

Azufre

Durante el periodo en estudio ocurrieron dos cambios con esperables consecuencias sobre la emisión de contaminantes y, por ello con potenciales efectos sobre las concentraciones diarias de MP10: la entrada en vigencia de la regulación de la calidad de los combustibles expendidos en Santiago, y la implementación del Transantiago.

La regulación sobre la composición de los combustibles resulta relevante puesto que éstos son precursores de material particulado, afectando los niveles de contaminación, principalmente de carácter secundario. Desde comienzos de la década pasada que el contenido de azufre de los combustibles se ha ido reduciendo. Este proceso culminó

con la regulación actualmente vigente, promulgada en enero de 2004, que redujo significativamente la cantidad de azufre permitida en los combustibles expendidos. Por ello, el modelo incluye una variable explicativa que corresponde a la máxima concentración de azufre permitida en los combustibles diesel para los distintos periodos, y que para su aplicación empírica se detalla en la siguiente Tabla.

TABLA 1 CONCENTRACIÓN DE AZUFRE PERMITIDAS EN COMBUSTIBLES DIESEL, 1997-2010

Año	Nivel de Azufre
Hasta 2000	3000 ppm
Hasta Abril de 2001	1000 ppm
Hasta 01 julio de 2004	300 ppm
Desde 02 julio de 2004	50 ppm

Fuente: PPDA RM y Memorias Anuales ENAP

D07

Finalmente, el modelo en (1) incluye la variable explicativa “D07” que representa la motivación principal de este trabajo, pues identifica el impacto esperable sobre las concentraciones diarias de MP10 en la ciudad de Santiago que tuvo la puesta en marcha del plan Transantiago. Para ello se utiliza una variable *discreta* que toma el valor de uno a partir del año 2007 y que permite capturar si existe o no un cambio en el comportamiento de las concentraciones de MP10 a partir del año 2007 en que se puso en marcha el Transantiago. En la medida que no hubo cambios contemporáneos en otras variables o políticas implementadas durante el período de vigencia del Transantiago, esta variable debería capturar el efecto del plan Transantiago sobre las concentraciones promedio de MP10.

Dado que se utiliza una variable discreta para identificar el efecto del Transantiago sobre la contaminación, es necesario examinar la robustez de los resultados mediante varias aproximaciones que se discuten más adelante.

Por último, resulta relevante destacar que, por no estar disponibles, no se incluyó en el modelo datos referidos a la intensidad del uso del parque automotriz en Santiago. Sólo están disponibles datos anuales de inscripción de vehículos, de forma que no resultan apropiados para emplear un modelo de carácter diario como el aquí propuesto. Así mismo estos datos tampoco capturan el uso de los vehículos. Por otra parte, la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) reporta datos de flujo vehicular diario, que sólo están disponibles a partir de 2004, por lo que tampoco resultan apropiados de emplear debido al período de tiempo que contempla la estimación empírica del modelo aquí propuesto. La falta de información adecuada sobre la intensidad de empleo del parque vehicular puede no ser muy relevante si es correcto el juicio de ciertos expertos que señalan que el efecto del transporte privado sobre las concentraciones de MP10 es bajo relativo a otras fuentes.

4. Resultados

Los resultados obtenidos de la estimación del modelo se presentan en la Tabla 2¹⁹. La primera columna muestra los resultados al no incluir rezagos de la variable dependiente, mientras que las otras tres columnas muestran los resultados de incluir uno, dos o hasta tres rezagos en la estimación.

TABLA 2 DISTINTOS RESULTADOS DE LAS ESTIMACIONES EMPÍRICAS DEL MODELO EXPLICATIVO DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE MP10 EN LA CIUDAD DE SANTIAGO, PARA EL PERÍODO 1997-2010

VARIABLES	(1) Modelo sin rezago	(2) 1 rezago	(3) 2 rezagos	(4) 3 rezagos
1 rezago MP10		0.33** (0.008)	0.36** (0.009)	0.36** (0.010)
2 rezagos MP10			-0.06** (0.009)	-0.08** (0.010)
3 rezagos MP10				0.04** (0.008)
Misumi	6.47** (0.119)	5.21** (0.115)	5.16** (0.115)	5.22** (0.115)
Misumi^2	-0.10** (0.004)	-0.08** (0.004)	-0.08** (0.004)	-0.09** (0.004)
IMACEC	1.60** (0.067)	1.05** (0.063)	1.08** (0.063)	1.07** (0.064)
Gas	8.28** (1.680)	11.54** (1.687)	11.21** (1.713)	11.15** (1.731)
Lluvia	-10.91** (0.685)	-10.31** (0.640)	-10.26** (0.642)	-10.24** (0.642)
Tendencia	-0.03** (0.001)	-0.02** (0.001)	-0.02** (0.001)	-0.02** (0.001)
Alerta _{t-1}	6.47** (0.836)	-2.62** (0.837)	-0.99 (0.871)	-1.43 (0.878)
Preemergencia _{t-1}		-4.63** (1.527)	-2.07 (1.577)	-3.24* (1.570)
Azufre	0.00** (0.000)	0.00 (0.000)	0.00 (0.000)	0.00 (0.000)
D07	-3.38** (1.137)	-2.61** (1.052)	-2.95** (1.062)	-3.06** (1.072)
Constante	295.92** (11.551)	234.38** (11.387)	242.02** (11.421)	235.88** (11.508)
Observaciones	13,421	13,247	13,148	13,049
R ²	0.59	0.65	0.65	0.66
R ² Ajustado	0.59	0.65	0.65	0.65
Test F	814.26	943.14	904.25	870.99

Fuente: Elaboración propia. *Nota:* Errores estándar entre paréntesis ** p<0.01, * p<0.05. La matriz de varianza-covarianza fue estimada mediante la opción robusta. No se reportan los resultados de las variables discretas por estación y días de la semana.

¹⁹ Todos los modelos son estimados mediante MCO. Al incluir variables discretas por estación de monitoreo, esto equivale a estimar el modelo como un panel con efectos fijos. En todos los modelos se utilizó una estimación robusta de la matriz de varianza-covarianza. También se probó una estimación mediante *bootstrap* de los errores estándar con resultados muy parecidos a los reportados.

Estimaciones preliminares indicaron que la variable de episodios de emergencia en el día previo no resultó significativa en ninguna de las regresiones y se eliminó de los modelos presentados en la Tabla 2. Esto se puede explicar por la falta de información estadística, debido a que estos episodios son poco frecuentes, y han ido disminuyendo durante la última década. La variable rezagada de lluvias también resultó no significativa estadísticamente y se omitió. Lo anterior indica que el efecto de las lluvias no se prolonga en el tiempo, o bien, la naturaleza de la variable no permite hacer este tipo de inferencias, dado que es discreta e indica si hubo precipitaciones, y no toma en cuenta la intensidad de las mismas o su duración.

De la Tabla 2 se observa que en general todas las variables tienen el signo esperado, particularmente en los modelos con la variable dependiente rezagada. Los modelos de las columnas (2) a (4) indican que los rezagos son importantes para explicar la contaminación, pero cuantitativamente la contaminación del día anterior es la que tiene mayor importancia.

Los resultados para el índice Misumi, confirman la relación positiva entre las condiciones de la inversión térmica de la cuenca y los niveles de concentración de MP10, lo que ratifica el condicionamiento climático de las condiciones de contaminación atmosférica en la cuenca de Santiago. Esta relación es decreciente, como se observa del signo negativo relacionado con la variable al cuadrado.²⁰

La actividad económica también tiene un impacto positivo sobre las concentraciones. La variable IMACEC es mensual, pero los resultados reportados no se alteran significativamente si se utiliza esta variable interpolada diariamente.

Tal como se esperaba, se observa que restricciones mayores en los envíos de gas desde Argentina impactan de forma directa en la contaminación ambiental, donde un 100% de restricción al suministro de gas en un día implica un aumento de alrededor de más de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones en el corto plazo y más de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el largo plazo según los modelos con rezagos.²¹ Esto se explicaría por una reconversión del sector industrial hacia fuentes energéticas más contaminantes para hacer frente a los cortes en los suministros.

Por otra parte, se observa un efecto negativo de las lluvias sobre las concentraciones de MP10, lo que era de esperarse, debido al efecto disipador de las precipitaciones. Como se señaló más arriba, este efecto disipador no se extiende en el tiempo por más allá del día en que ocurre la precipitación.

²⁰ Estimar el modelo sin incluir la variable Misumi al cuadrado no altera los resultados presentados aquí.

²¹ Para obtener el impacto de largo plazo, se debe dividir el parámetro asociado a los cortes de gas por uno menos la suma de los coeficientes de las variables rezagadas.

Se observa también una tendencia en el tiempo a la baja de los niveles de contaminación, lo que podría estar relacionado con una mejora tecnológica constante de la composición del parque automotriz en materia medioambiental (mayor eficiencia, por ejemplo) u otros cambios tecnológicos graduales.

Es particularmente interesante observar el resultado de la variable discreta para las alertas y pre-emergencias el día anterior. Los resultados de la columna (2) indican que el decretar un episodio de alerta ambiental está asociado a mayores concentraciones de MP10 para el día siguiente. Sin embargo, al incluir la variable dependiente rezagada este efecto se torna negativo, como se esperaba. Además, el impacto negativo es menor que en el caso de las pre-emergencias, lo cual es razonable si se considera que estos últimos episodios gatillan medidas regulatorias más agresivas, como el cierre de fuentes fijas y la imposición de restricción vehicular a los autos con convertidor catalítico.

Con respecto al azufre, se observa que existe una relación positiva entre los contenidos del mismo en los combustibles expendidos y las concentraciones evidenciadas de MP10 en la ciudad. Sin embargo, este efecto no es estadísticamente significativo en los modelos con rezagos de la variable dependiente. En parte esto último podría deberse a que la variable de tendencia podría estar capturando parte del efecto de la disminución del contenido de azufre en los combustibles, ya que como se muestra en la Tabla 1, la reducción de este contaminante fue gradual durante la década pasada.

Aunque no se presentan en la tabla, las variables de efectos fijos por estación de monitoreo indican que las concentraciones de MP10 recogidas en la estación de Las Condes son considerablemente menores a las otras estaciones. Esto puede deberse a que el uso del suelo en dicha comuna y sus aledañas, es principalmente residencial (y no industrial) contando, además, con más áreas verdes que otras comunas, y por otro lado, a que las mejores condiciones económicas de sus habitantes permiten un uso de mejores y más modernos vehículos y equipos de calefacción. Por otra parte, las estaciones de La Florida y Pudahuel, corresponden a las dos estaciones con un mayor registro de concentraciones de MP10, debido a sus características geográficas y de ventilación. Se destaca también que en los días domingo hay una menor concentración, debido a una menor actividad generadora de contaminantes, y este efecto persiste hasta el día lunes.

Tampoco se reportan los coeficientes del día de la semana. Pero los resultados para estas variables son consistentes con lo esperado. El día viernes corresponde al de mayor nivel de concentraciones en la semana. Tal situación se entiende debido a un aumento de los viajes realizados hacia afuera de la ciudad, y un efecto acumulativo de la actividad de la semana laboral.

Finalmente, se observa que, consistente con la hipótesis central de este estudio, las concentraciones de MP10 han disminuido desde el año 2007 en adelante. En el modelo sin rezago esta disminución es de $-3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en los modelos con rezago va desde un $-2,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (modelo columna (2)) a $-3,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (modelo columna

(4)) en el corto plazo, lo que corresponde a una disminución entre $-3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $-4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el largo plazo. Por lo tanto, existe evidencia de una disminución en la contaminación que podría atribuirse a la implementación del plan de transporte urbano Transantiago.

5. Robustez de la estimación²²

La inferencia respecto al impacto del Transantiago se hace utilizando una variable discreta para el período 2007 a 2010. Esta inferencia podría estar errada si es que esta variable está captando no linealidad o efectos de tendencia no controlados en el modelo. Para examinar la robustez de los resultados se realizaron dos ejercicios adicionales. Primero, se estimó el modelo incorporando una tendencia cuadrática para analizar si existen no linealidades en la especificación. Segundo, se realizó un test de falsificación, incorporando una variable dicotómica en los años 2005 y 2006, para luego realizar la misma regresión especificada arriba pero sólo hasta el año 2006 (previo a la implementación del Transantiago). Si esta variable sale estadísticamente significativa y con signo negativo, podría ser entonces que la variable D07 en los modelos de más arriba, al igual que D05, están capturando alguna no-linealidad que nada tienen que ver con el Transantiago.

Los resultados para las variables de interés se presentan en la Tabla 3. Se puede ver que al incluir una tendencia al cuadrado, ésta variable no resulta estadísticamente significativa y además no cambia el signo ni la significancia de la variable D07. Por otro lado, al acortar la muestra hasta el año 2006 e incluir una variable discreta para el año 2005 y 2006, esta última variable no es estadísticamente significativa. Por lo tanto, ambos resultados sugieren que los resultados expuestos en la sección anterior son robustos y que la variable D07 está efectivamente controlando por algo que ocurrió a partir de esa fecha.

TABLA 3 ANÁLISIS DE ROBUSTEZ

VARIABLES	(1)	(2)
	Modelo tendencia cuadrática	Modelo datos hasta 2006
Tiempo	-0.03* (0.012)	-0.02** (0.001)
tiempo2	0.00 (0.000)	-
d07	-3.52** (1.292)	-
d05	-	1.51 (1.618)
Observaciones	13,049	9,936

²² Agradecemos a Eduardo Fajnzylber por proponer varios de los test de robustez que se presentan aquí.

R-squared	0.66	0.66
Adj. R-squared	0.65	0.66
Ftest	840.09	680.79

Fuente: Elaboración propia. Nota: Errores estándar entre paréntesis. ** p<0.01, * p<0.05

6. Valoración Económica de las Disminuciones en las Concentraciones de MP10

En esta sección se valoran económicamente los efectos medioambientales que según los resultados de la sección anterior se pueden atribuir al Transantiago. Estos efectos se refieren a la disminución que se observa de las concentraciones de MP10 a partir del año 2007 cuando el Transantiago entró en funcionamiento. Se debe dejar en claro que cualquier valoración tenderá a subestimar el verdadero valor de tales efectos, ya que las concentraciones de MP10 tienen múltiples repercusiones en el bienestar de los individuos expuestos a dichas concentraciones. El presente estudio se centra en la dimensión de salud de la reducción de las concentraciones diarias de MP10 provocada por el Transantiago.

Para estimar la reducción en las concentraciones de MP10 a que está expuesta la población de Santiago se utilizan los resultados del modelo de la columna (2) de la Tabla 2, por ser los más conservadores entre los modelos con rezagos. Dicho modelo indica que en el largo plazo el efecto en las concentraciones MP10 es de $-3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se consideró el mismo efecto para toda la ciudad de Santiago.

Se calculan los efectos de la reducción de la contaminación sobre la salud humana, específicamente en mortalidad y morbilidad (admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares, visitas a salas de urgencia por enfermedades respiratorias, días de actividad restringida, enfermedades respiratorias bajas en niños, bronquitis crónica, síntomas respiratorios agudos y ataques de asma). Para ello se usan funciones de daño o concentración-respuesta lineales recopiladas por Sánchez, Valdés y Ostro (1998) y los ponderadores utilizados por dichos autores para tres escenarios (bajo, medio y alto).²³ Los parámetros de estas funciones se presentan en el Anexo 1.

Para calcular los cambios en riesgos de salud de la población se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta ES_i = \alpha * Pobi * \Delta MP10_i$$

donde:

ΔES_i = Cambio en el riesgo salud de la población, del efecto en salud *i*
 α = ponderador de la función de daño, equivale a la pendiente de la misma
 $Pobi$ = Población en riesgo relativo al efecto en salud *i*

²³ Las funciones de daño o dosis-respuesta buscan enlazar la exposición a contaminantes atmosféricos de una población, con diferentes efectos de salud observados en la misma población, entregando como resultado un número de casos (morbilidad) o vidas perdidas (mortalidad).

$\Delta MP10_i =$ Cambio en la concentración atmosférica de MP10

Como población expuesta o afectada se utiliza al total de población de la provincia de Santiago, ya que como se dijo anteriormente, se estimó un efecto parejo para toda la ciudad. Estas cifras son reportadas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

En algunos casos, las funciones de daño requieren el uso de las admisiones hospitalarias en lugar de población en la ecuación anterior. En estos casos, se usan los datos entregados por el Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) del Ministerio de Salud (MINSAL) para todos los Servicios de Salud de la región, los que se encuentran desglosados únicamente para los años 2008 y 2009, y de los que se usan los correspondientes al periodo abril-agosto. Para el año 2007, sólo están disponibles los datos de hospitalizaciones totales para la región, por lo cual, para establecer las admisiones hospitalarias específicas para las enfermedades en cuestión, se supuso que la proporción de éstas era igual a la proporción promedio de los años 2008 y 2009. Cabe destacar, que sólo se utilizan las admisiones hospitalarias del sector público, debido a que los registros del sector privado no se encuentran disponibles, razón por la cual se puede indicar que las estimaciones para las admisiones hospitalarias estarían ligeramente subvaluadas, aún cuando se considera suficiente la información ya que el sector público representa más del 70% de las atenciones totales.

Para las enfermedades respiratorias bajas se consideraron las atenciones por neumonía (J12-J18), bronquitis y bronquiolitis aguda (J20-J21) y crisis obstructiva bronquial (J40-J46). Además se consideró la tasa de mortalidad cruda calculada por CEPAL para el quinquenio 2005-2010 de 5,36 muertes por 1000 habitantes, debido a que aún no se cuenta con los datos oficiales de mortalidad para el año 2009.

La Tabla 4 presenta las estimaciones de efectos para el escenario de nivel medio producto de la disminución de la concentración promedio de MP10 desde el 2007 al 2010 atribuible al Transantiago.

Para la valoración económica de los impactos en salud se usaron los cálculos realizado por Holz (2000), los que debieron ser actualizados a precios del 2010. Holz (2000) calcula para cada enfermedad tanto sus costos directos como indirectos. Los primeros se definen en función de los costos promedio de tratar la enfermedad. Dichos valores fueron actualizados según la variación del índice de precios al consumidor de salud reportado por el INE. Los segundos representan los días de trabajo perdidos, tanto por la enfermedad del individuo enfermo en hospitalizaciones y atenciones de urgencia, como por las horas de trabajo perdidas por quienes deben acompañar a menores de edad en dichos procedimiento. Estos costos se actualizaron mediante la variación del Índice de Remuneraciones Generales (French-Davis, 2010).

Los valores finales utilizados se presentan en la Tabla 5. En el Anexo 2 se presentan los valores desagregados antes y después de su actualización.

TABLA 4: NÚMERO DE CASOS NO SUCEDIDOS PRODUCTO DEL PLAN TRANSANTIAGO

Motivo	2007	2008	2009	2010	Total
Mortalidad					
Mortalidad	123	124	126	127	500
Morbilidad					
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	28	27	36	11	103
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	12	13	13	14	52
Visitas a sala de urgencia por enfermedades respiratorias	140	137	182	56	515
Días de actividad restringida	432.545	439.605	382.800	335.648	1.590.598
Enfermedades respiratorias bajas en niños (bronquitis y tos)	690	677	659	1041	3.067
Bronquitis crónica	842	856	870	885	3.453
Síntomas respiratorios agudos	3.430.149	3.458.243	3.550.236	3.632.551	14.071.179
Ataques de asma	63147	63721	64297	64871	256.036

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 5: COSTOS DE CADA ENFERMEDAD (PESOS DE 2010)

Motivo	Valor (Pesos de 2010)
Mortalidad	30.797.105
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	978.703
Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovascular	19.683.872
Visitas de sala de urgencias	44.765
Enfermedad baja en niños	100.846
Bronquitis crónica	82.704.641
Síntomas respiratorios agudos	5.308
Ataques de asma	100.293
Día de Actividad Restringida	9.399

Fuente: Elaboración propia. Actualización de valores de Holz (2000)

Considerando todo lo anterior, para el escenario medio se estiman los ahorros en menores costos de salud presentados en la Tabla 6. Se destaca que los ahorros son producto de los siguientes costos evitados: costos directos de tratar las enfermedades, costos indirectos de vidas perdidas y días no trabajados producto de padecer las enfermedades consideradas.

TABLA 6 AHORROS (EN \$ DE 2010) PRODUCTO DEL PLAN TRANSANTIAGO

Motivo	Ahorro Promedio	Ahorro total (2007-2010)
Mortalidad	3.849.506.307	15.398.025.228
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	25.188.132	12.771.776
Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovascular	254.540.255	7.983.244
Visitas de sala de urgencias	5.760.370	19.157.535
Enfermedad baja en niños	3.737.503.053	14.950.012.213
Bronquitis crónica	77.315.647	230.590.434
Síntomas respiratorios agudos	71.395.455.453	284.810.738.064
Ataques de asma	18.674.097.709	37.059.659.392
Día de Actividad Restringida	6.419.628.688	15.882.447.350
	104.438.995.614	368.371.385.237

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Tabla 7 muestra el desglose de los costos directos e indirectos evitados. Este desglose permite esclarecer qué proporción de este ahorro es percibido por el sector público y por los agentes privados. Se observa que del total de los costos, 12,5% equivale al ahorro fiscal por concepto de menores prestaciones médicas, considerando que este estudio no incluye datos para el sector privado de salud. La mayor parte del ahorro es internalizada por los agentes privados.

TABLA 7 DESGLOSE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS EN SALUD, 2007-2010
(\$ DE 2010)

Motivo	Total Casos	Costos directos (\$)	Costos indirectos (\$)
Mortalidad	500	-	15.398.025.228
Admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias	103	87.980.750	12.771.776
Admisiones hospitalarias por enfermedades cardiovasculares	52	1.010.177.775	7.983.244
Visitas a sala de urgencia por enfermedades respiratorias	515	3.883.944	19.157.535
Días de actividad restringida	1.590.598	-	14.950.012.213
Enfermedades respiratorias bajas en niños	3.067	78.672.156	230.590.434
Bronquitis crónica	3.453	771.083.748	284.810.738.064
Sintomas Respiratorios Agudos	14.071.179	37.636.731.444	37.059.659.392
Ataques de Asma	256.036	9.796.067.401	15.882.447.350
Total		49.384.597.218	368.371.385.237

Fuente: Elaboración Propia

7. Conclusiones

En el presente trabajo se estimó una disminución de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones atmosféricas de MP10 en la ciudad de Santiago desde el año 2007, lo que es coincidente con el año de la implementación del plan de reforma y reestructuración del sistema de transporte público de la ciudad, conocido como Transantiago. Este resultado sería consistente con la hipótesis planteada aquí de que la reforma del transporte público habría contribuido a la descontaminación de la capital. Este efecto se estima aislado de la influencia de otras variables relevantes como las restricciones del suministro de gas proveniente de Argentina, las condiciones meteorológicas, y una tendencia decreciente en el tiempo en los niveles de contaminación en Santiago debido a cambios tecnológicos, de estructura económica, etc.

Utilizando una metodología de funciones dosis-respuesta y de valoración económica se obtiene que en promedio cada año se logra un ahorro de más de \$104.439 millones (o US\$ 197,5 millones)(en un escenario medio) como consecuencia de la reducción de las concentraciones atribuibles al plan de transportes, de los cuales aproximadamente el 12% equivale a ahorro fiscal por concepto de gasto en salud.

Cabe señalar además que el ahorro total anual del \$104.439 por la reducción de la contaminación estimada en este trabajo, es cercano al subsidio permanente establecido para el plan de transportes de la capital en la Ley 20.378 del año 2009 y que asciende a \$115.000 (o US\$ 217,5) millones anuales (y lo supera ampliamente en un escenario alto).

También es interesante observar que de acuerdo al modelo estimado en el presente trabajo, los cortes en la provisión de gas natural proveniente de Argentina —que justamente se intensificaron a partir del año 2007— tuvieron un impacto en las concentraciones de material particulado de sentido contrario al provocado por el Transantiago, y que supera en magnitud la reducción estimada como consecuencia de la implementación de dicho plan de modernización del transporte público. En efecto, mientras que el Transantiago redujo la contaminación en cerca de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los días con 100% de corte de suministro de gas argentino implicaron un aumento de cerca de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de material particulado en Santiago. Estos resultados sugieren que el efecto negativo de estos cortes en el suministro de gas argentino enmascaró el efecto benéfico del Transantiago sobre las concentraciones de MP10, que no se pudo observar inmediatamente después de su puesta en marcha el año 2007.

La metodología usada, tiene diversas limitaciones que responden al hecho de trabajar con datos agregados, como también, a la escasez de datos relacionados al fenómeno analizado. Para aumentar los niveles de confianza de los beneficios estimados, quedan abiertas algunas líneas de investigación a desarrollar. Primero, la incorporación a los modelos estimados de variables concernientes a la intensidad de uso de modos de transporte, tanto del parque automotriz como del transporte público, que permitan esclarecer los cambios en la asignación modal de los viajes. En segundo lugar, avanzar en una identificación geográfica más localizada de los cambios en las concentraciones

de contaminantes productos del plan estudiado, lo que permitiría cuantificar de forma más precisa los efectos sobre los segmentos de la población realmente afectados. Por último, es necesario levantar información acabada y actualizada, con base médica, de los costos de los padecimientos de las enfermedades, tanto en su forma directa como indirecta, teniendo en cuenta las variaciones en los precios relativos y las mejoras tecnológicas que se han producido desde el estudio empleado para la valoración (Holz, 2000).

Este trabajo aporta desde una sola dimensión a la valoración completa del plan de transporte de Santiago, ya que existen otros beneficios tales como posibles reducciones en los tiempos de espera, viajes más expeditos, disminución de la contaminación acústica, reducción de accidentes y mejores condiciones laborales de los choferes, que no fueron contemplados. Debe considerarse también que el análisis realizado representa una mirada parcial del plan, en cuanto no hace referencia a los posibles costos del mismo.

8. Referencias

Arellano, M. and S. Bond (1991), 'Some tests of Specification for Panel data: Montecarlo Evidence and an Application to Employment Equations', *Review of Economic Studies*, 58, pp. 277-292.

Atal, R. (2009), "Efectos de las medidas de Gestión de Episodios Críticos en la calidad del aire en Santiago, Chile", Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Centro Mario Molina Chile (2007), *Estudio 'Evaluación del Impacto de Transantiago en la Calidad del Aire de la Región Metropolitana, año 2007'*, Informe Final, N°BIP 30069882-0.

Clerc, J. (2007), "Valoración de mejoras ambientales en Santiago: Teoría, supuestos y aplicación", Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago.

CONAMA Región Metropolitana (2006), *Informe Seguimiento Plan de Prevención y de Descontaminación para la Región Metropolitana*, CONAMA RM, Santiago.

CONAMA Región Metropolitana (2009), *Resultados Plan Operacional para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable MP10*, CONAMA RM, Santiago.

ENAP (2004), *Memoria Anual*, Santiago.

Ffrench-Davis, R. (2010), "Economic Reforms in Chile. From Dictatorship to Democracy" Palgrave Macmillan, Londres.

Gallego, F., J.P. Montero y C. Salas (2011), 'The Effect of Transport Policies on Car Use: Theory and Evidence from Latina American Cities', Draft, Departamento de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Garreaud, R. D. y J. Rutllant (2006), 'Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica', en R. Morales (ed.), *Contaminación Atmosférica Urbana Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, pp. 36-40. Editorial Universitaria. Santiago, Chile

Holz, J. (2000), "Estimación de Costos Unitarios en Morbilidad y Mortalidad y su aplicación para calcular los beneficios del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana", Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Chile, Santiago.

Judson, R.A. and A.L. Owen (1999), 'Estimating dynamic panel data models: a guide for macroeconomists', *Economic Letters*, 65, pp. 9-15.

Merino, M, (2006), 'Factores Episodios de alta concentración de contaminantes: material particulado MP10 y ozono troposférico', en R. Morales (ed.), *Contaminación Atmosférica Urbana Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, pp. 56-60. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.

Merino, M, G. Alvarado, & E. Figueroa (2005), 'Aire', en Geo Chile (ed.), *Estado del Medio Ambiente en Chile: Informe País*, LOM Impresiones. Santiago, Chile. pp. 37-70.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1996), Decreto Supremo N° 131.

Ostro, B. (1998), "Cómo estimar los efectos de la contaminación atmosférica en Salud", Centro de Estudios Públicos, Santiago.

Sánchez, J., Valdés, S., & Ostro, B. (1998), "Estimación de los beneficios en salud del Plan de descontaminación de Santiago", *El Trimestre Económico*, 363-406.

Sectra (2007), 'Análisis Ambiental de las Emisiones del Actual Sistema de Transporte Público de Buses de Santiago año 2007', Secretaria Interministerial de Transportes, Santiago.

ANEXO 1. FUNCIONES DE CONCENTRACIÓN RESPUESTA

FUNCIONES DE CONCENTRACIÓN RESPUESTA

MORTALIDAD:

$$\text{Número de Casos Anuales} = \alpha * \frac{dMP10}{100} * \text{tasa de mortalidad cruda} * \text{población afectada}$$

MORBILIDAD:

- **Admisiones Hospitalarias por Enfermedades Respiratorias**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \frac{\text{admisiones hospitalarias por E.R}}{\text{población total}} * \text{población expuesta}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,000788
Nivel Medio	0,000673
Nivel Alto	0,000588

- **Admisiones Hospitalarias por Enfermedades Cardiovasculares**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \frac{\text{admisiones hospitalarias por E.C}}{\text{población total}} * \text{población expuesta}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,00048
Nivel Medio	0,00064
Nivel Alto	0,00079

- **Visitas de Urgencia**

$$\text{Visitas de Urgencia} = 6 * \text{Admisiones Hospitalarias por Enfermedades Respiratorias}^{24}$$

- **Días de Actividad Restringida**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \text{población adulta}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,0097
Nivel Medio	0,0168
Nivel Alto	0,0238

- **Enfermedades Respiratorias Bajas en Niños**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \text{tasa anual de consultas por infecciones respiratorias bajas} * \text{población niños}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,0007
Nivel Medio	0,0011
Nivel Alto	0,0016

²⁴ Esto debido a que para el año 1995, 1 de 6 visitas a las salas de urgencia terminaba en hospitalización.

- **Bronquitis Crónica**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \text{población mayor de 25 años}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,00003
Nivel Medio	0,000061
Nivel Alto	0,000093

- **Síntomas Respiratorios Agudos**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * \text{población expuesta}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,0803
Nivel Medio	0,1679

- **Ataques de Asma**

$$\text{Casos Anuales} = \alpha * dMP10 * 4,7\% * \text{población expuesta}$$

Escenario	α
Nivel Bajo	0,0329
Nivel Medio	0,0584
Nivel Alto	0,1971

AJUSTES

Es necesario realizar algunos ajustes para evitar la doble contabilidad de casos, debido, por ejemplo, a que las hospitalizaciones son también atenciones de urgencia. Se estima además que la hospitalización respiratoria dura en promedio 7,3 días y la cardiovascular 10.

- Visitas a sala de urgencia Neta, hay que restar las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias
- Días de actividad restringida Neto = Días de actividad restringida - Porcentaje de la población adulta * (10*Admisiones Hospitalarias Respiratorias + 7,3*Admisiones Hospitalarias Cardiovasculares + Visitas Sala de Urgencia Neta + Días con ataque de Asma.
- Síntomas respiratorios Agudos Netos = Síntomas respiratorios Agudos – Días de Actividad Restringida

ANEXO 2. ACTUALIZACIÓN DE COSTOS

Se presenta los costos unitarios de las enfermedades consideradas, en sus montos originales (Holz, 2000), y sus montos actualizados.

Montos en(\$1998)		Montos en(\$2010)	
Mortalidad	\$24.509.263	Mortalidad	\$ 30.797.105
Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias		Admisión hospitalaria por enfermedades respiratorias	
Costos directos	\$ 669.719	Costos directos	\$ 854.639
Costos indirectos	\$ 98.734	Costos indirectos	\$ 124.064
Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovascular		Admisión hospitalaria por enfermedades cardiovascular	
Costos directos	\$ 15.303.887	Costos directos	\$ 19.529.534
Costos indirectos	\$ 122.827	Costos indirectos	\$ 154.338
Visitas de sala de urgencias		Visitas de sala de urgencias	
Costos directos	\$ 5.913	Costos directos	\$ 7.546
Costos indirectos	\$ 29.620	Costos indirectos	\$ 37.219
Enfermedad baja en niños		Enfermedad baja en niños	
Costos directos	\$ 20.103	Costos directos	\$ 25.654
Costos indirectos	\$ 59.840	Costos indirectos	\$ 75.192
Bronquitis crónica		Bronquitis crónica	
Costos directos	\$ 174.989	Costos directos	\$ 223.306
Costos indirectos	\$ 65.641.128	Costos indirectos	\$ 82.481.334
Síntomas respiratorios agudos		Síntomas respiratorios agudos	
Costos directos	\$ 2.096	Costos directos	\$ 2.675
Costos indirectos	\$ 2.096	Costos indirectos	\$ 2.634
Ataques de asma		Ataques de asma	
Costos directos	\$ 29.982	Costos directos	\$ 38.261
Costos indirectos	\$ 49.367	Costos indirectos	\$ 62.032
Día de Actividad Restringida		Día de Actividad Restringida	
Total	\$ 7.480	Total	\$ 9.399

Fuente: Elaboración propia en base a Holz (2000).

ANEXO 3. MODELO DE 12.00 HRS.

Se presenta a continuación los resultados del modelo incorporando como variable dependiente las concentraciones de MP10 a las 12.00 hrs. de cada día (no su valor promedio diario).

Variables	(1) Modelo 12.00 hrs.
misumi	6.47** (0.119)
misumi2	-0.10** (0.004)
imacec	1.60** (0.067)
gas	8.28** (1.680)
dlluvias	-10.91** (0.685)
tiempo	-0.03** (0.001)
dlagalerta	6.12** (0.836)
azufre	0.00** (0.000)
d07	-3.38** (1.137)
Constante	295.92** (11.551)
Observaciones	13,421
R ²	0.59
R ² Adj.	0.59
F test	814.26

Fuente: Elaboración propia. *Nota:* Errores estándar entre paréntesis ** p<0.01, * p<0.05