



**“Efectividad de Episodios Ambientales en la
Reducción de Material Particulado: El Caso de Los
Ángeles, Chile”**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO

Alumno: Cristian Concha Faúndez

Profesor Guía: Nathaly M. Rivera

Santiago, Junio 2023

Efectividad de Episodios Ambientales en la Reducción de Material Particulado: El Caso de Los Ángeles, Chile.

Cristian Concha Faúndez

Prof. Guía: Nathaly M. Rivera

27 de junio de 2023

Resumen

Existe amplia evidencia que relaciona la exposición a material particulado e impactos negativos en salud. Sin embargo, aún un tercio de la población mundial usa combustibles altamente contaminantes para cocinar y calefacción, especialmente en países de bajos ingresos. El presente trabajo realiza una evaluación ex-post del Programa Gestión de Episodios Críticos, el cual impone restricciones al uso de artefactos a leña durante Episodios Críticos de calidad del aire en la ciudad de Los Ángeles, Chile. Utilizando estimaciones de regresión discontinua, los resultados muestran las restricciones generan una reducción significativa en las concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$, equivalentes a un 34,7% y 34,9%, respectivamente, durante episodios de emergencia ambiental. Estas estimaciones sugieren que, a pesar de que el Programa de Gestión de Episodios Críticos es efectivo, los niveles de contaminación aún están lejos de niveles adecuados para la salud de la población.

Abstract

Despite extensive evidence linking exposure by particulate matter (PM) pollution with negative health impacts. One third of the world's population uses highly polluting fuels for cooking and heating, especially in low-income countries. This paper carries out an ex-post evaluation of the Critical Episode Management Program, which imposes restrictions on the use of firewood appliances during Critical Episodes on air quality levels in the city of Los Ángeles, Chile. Using a regression discontinuity design. The results show a significant reduction in the daily concentrations of 34.7% in PM_{10} and 34.9% in $PM_{2,5}$ respectively during Emergency episodes. These estimates suggest that, despite the fact that the Critical Episode Management Program is effective, contamination levels are still far from adequate levels for the health of the population.

1. Introducción

La calefacción residencial en base a la combustión de leña es una importante fuente de contaminación atmosférica (Plejdrup *et al.*, 2016). La quema de leña emite principalmente de material particulado (Samburova *et al.*, 2016), contaminante responsable de una serie de efectos dañinos en salud, como mortalidad prematura (Huang *et al.*, 2018), cáncer al pulmón (Lepeule *et al.*, 2018) y enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Kim *et al.*, 2017). El deterioro de la calidad del aire debido a la quema de este combustible es considerable incluso en áreas urbanas (Hellén *et al.*, 2008). En Chile, particularmente en la zona centro-sur, existe una fuerte preferencia cultural por la utilización de leña para calefaccionar, debido a la abundante disponibilidad histórica del recurso (Schueftan *et al.*, 2016). Dramático es el caso de la ciudad de Los Ángeles, en la Región del Bío Bío, donde este combustible es el más usado para la calefacción de hogares, siendo responsable del 96 % y 86 % de las emisiones de material particulado fino ($MP_{2,5}$) y grueso (MP_{10}) respectivamente. Actualmente, Los Ángeles es la sexta ciudad más contaminada de Chile por material particulado y una de las 20 mas contaminada de América del Sur.

En 2018, en el marco del Plan de Descontaminación de la ciudad de Los Ángeles (PDA), se implementa el Programa para la Gestión de Episodios Críticos (PGEC), el cual incluye medidas de prevención y mitigación que se implementan rápidamente para enfrentar en el corto plazo los días de Episodios Críticos por alta contaminación. El PGEC consiste en la designación de episodios ambientales, Alertas, Pre-emergencias y Emergencias, que desencadenan una serie de medidas para el control de la contaminación. Así por ejemplo, en el caso de una Pre-emergencia, se prohíbe el uso de artefactos a leña por vivienda durante la tarde, mientras que durante una Emergencia, se prohíben durante todo el día.

Este estudio busca determinar la efectividad del PGEC en la ciudad de Los Ángeles. Específicamente, se analiza empíricamente el impacto de las prohibiciones de uso de artefactos a leña durante estos Episodios Críticos en los niveles de material particulado fino y grueso. La estrategia de identificación consiste en un diseño de Regresión Discontinua *Sharp*. Para implementar la estrategia de identificación en esta evaluación ex-post, se cuenta con datos históricos de concentraciones diarias y horarias de material particulado para el período 2018-2022 proveniente de estaciones de monitoreo ubicadas en zonas con restricción para el período previo y posterior a la ocurrencia de un episodio.

Los resultados muestran que las restricciones impuestas por el PGEC respecto al uso de artefactos a leña generan una reducción de 34,7 % y 34,9 % de las concentraciones promedio diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$, respectivamente, durante los episodios de Emergencia. Sin embargo, al tomar episodios de Pre-emergencia, no existe reducción en ambos contaminantes. Esto

indica que si bien el programa muestra cierta efectividad, es necesario tomar en cuenta que el nivel promedio de contaminación de la ciudad es alto. Por lo tanto, es pertinente su complementariedad con otros programas ambientales de mediano y largo plazo dado los altos niveles base de contaminación atmosférica.

Este trabajo contribuye a la evaluación de programas de política enfocados en la reducción de contaminación *indoor*. Además, existe escasa literatura asociada a evaluación ex-post de este tipo de políticas en la zona sur del país, especialmente afectada por contaminación producto de la combustión a leña. De este modo, evaluar la efectividad de una regulación temporal sobre una gran cantidad fuentes emisoras residenciales (hogares), los altos costos de cumplimiento de esta (asociados a el reemplazo de artefactos y combustible) y que al mismo tiempo beneficia a los mismos hogares, resulta de interés, para la literatura de evaluación de impacto ambiental, la economía ambiental o los estudios de políticas publicas.

Este documento está organizado como sigue. La sección 2 revisa brevemente literatura sobre efectividad de Programas de Descontaminación en el mundo y Chile. La sección 3 describe el contexto de la situación de contaminación del aire en Los Ángeles. La sección 4 analiza y describe los datos utilizados. La estrategia empírica se detalla en la sección 5. Los resultados se ofrecen en la sección 6, así como análisis de robustez en la sección 7. La sección 8 concluye.

2. Revisión de Literatura

El material particulado (MP) consiste en pequeñas partículas sólidas o líquidas que permanecen suspendidas en el aire. Estas pueden provenir tanto de procesos industriales, combustión de leña, quemas agrícolas, polvo en suspensión y/o tránsito vehicular, entre otras fuentes. La caracterización del material particulado se realiza de acuerdo a su diámetro. Así, partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrones son conocidas como MP₁₀, mientras que partículas con un diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones son conocidas como MP_{2,5}. Debido a su tamaño, el MP₁₀ sedimenta rápidamente y no permanece en el aire un tiempo suficiente para ser trasladadas más allá de algunos metros. En cambio, el MP_{2,5} puede permanecer en el aire durante más tiempo generando un efecto acumulativo residual día a día (Saide *et al.*, 2016).

Concentraciones atmosféricas de MP afectan la salud de la población debido a que pueden ser inhaladas y penetrar las vías respiratorias. Estudios epidemiológicos han identificado efectos en salud debido a exposición prolongada a altas concentraciones de MP. Por ejemplo, aumento en la mortalidad prematura (Khaniabadi *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018b; Huang *et al.*, 2018; Maji *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017; Mannucci *et al.*, 2015; Mardones *et al.*, 2015),

frecuencia de cáncer pulmón (Lepeule *et al.*, 2018; Shahadin *et al.*, 2018), enfermedades respiratorias (Kim *et al.*, 2017) y cardiovasculares (Kim *et al.*, 2017; Maji *et al.*, 2017). En Chile, la literatura ha identificado una relación entre exposición a $MP_{2,5}$ y asma en niños (Prieto-Parra *et al.*, 2017), efectos varios en tasas de mortalidad y morbilidad (Ruiz-Rudolph *et al.*, 2016; Sanhueza *et al.*, 2006; Almonacid, 2013) y en incidencia de epilepsia (Cakmak *et al.*, 2010).

2.1. Efectividad de Programas de Descontaminación Atmosférica

Actualmente, muchos países regulan y fijan límites a las concentraciones de material particulado, y Chile no es la excepción. El país cuenta con normas primarias de calidad ambiental de alcance nacional que regulan las concentraciones máximas de material particulado, así como también, de otros contaminantes nocivos para la salud. Los límites establecidos son $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como concentración de 24 horas, y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como concentración anual para MP_{10} . Y, de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como concentración de 24 horas y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como concentración anual para $MP_{2,5}$.

Diversos estudios han abordado la efectividad de planes de descontaminación ambiental en el mundo. Por ejemplo, en respuesta a los altos índices de contaminación en Estados Unidos se introdujo la ley “*Clean Air Act*” en 1970. Bajo esta legislación, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*EPA*, por su sigla en inglés) asigna anualmente a cada condado un estado de cumplimiento o no cumplimiento (con regulaciones más estrictas en los condados bajo cumplimiento). En este contexto, Chay y Greenstone (2003) examinaron los efectos de las partículas totales en suspensión (TSP) sobre la salud de lactantes. Los autores utilizan el estado de no cumplimiento como variable instrumental en los condados de no cumplimiento de TSP para estimar el impacto sobre los cambios de mortalidad infantil en el primer año de vigencia de la ley. Como resultado obtienen que condados con estado de cumplimiento están asociados con fuertes reducciones en la contaminación y la mortalidad infantil.

Posteriormente, Greenstone (2004) evalúa si la “*Clean Air Act*” contribuyó a la disminución de las concentraciones ambientales de dióxido de azufre (SO_2), para lo cual aplica la técnica *propensity score matching* con el fin de controlar por diferencias observables entre los condados en estado de cumplimiento y no cumplimiento. Los resultados indican que los condados en estado de no cumplimiento presentan igualmente reducciones en los niveles de SO_2 , lo cual sugiere que la designación de estado de no cumplimiento a un condado no condiciona la reducción de las concentraciones de SO_2 . Mas recientemente, en el Estado de Carolina del Norte, Giovanis (2015) evalúa mediante un estimador de diferencias cuádruples (DDDD) si

las alertas de smog de ozono del programa voluntario “*Clean Air Works*” son efectivas. Como resultado de este estudio, se encuentra una reducción en los niveles de ozono a nivel del suelo y la mejora de la calidad del aire en el grupo de tratamiento en donde se implementa el programa, logrando una disminución de 1,5 partes por billón (ppb) con respecto al grupo de control. En conclusión, el estudio sugiere que el sistema de alerta de ozono asociada a los programas voluntarios puede ayudar a la limpieza del aire y mejorar la salud pública.

Chen *et al.* (2013) estudiaron los efectos de una serie de medidas radicales para mejorar la calidad del aire durante los Juegos Olímpicos de 2008 en Beijing. Utilizando un enfoque de diferencias en diferencias encuentran que estas acciones mejoraron efectivamente la calidad del aire de Beijing en un 24,9% durante este evento, en comparación con un año antes de cualquier acción motivada por los Juegos Olímpicos. Sin embargo, gran parte de esta mejora en la calidad del aire se disipó un año después del evento.

Li *et al.* (2017) estudiaron los efectos de la regulación de la contaminación atmosférica del Plan de Acción de prevención y Control de la Contaminación del Aire implementado en septiembre de 2013 por el gobierno Chino mediante un enfoque de diferencias en diferencias. Los resultados de este estudio muestran que las reformas en la estrategia de gestión ambiental y el control de la cantidad total de emisiones trajo una mejora sustancial a corto plazo en la calidad del aire en Beijing.

Calzada y Sanz (2018) estudiaron los efectos del programa Fondo de Inclusión Social Energético (FISE), que subsidia la sustitución de estufas tradicionales por estufas de gas implementados por el gobierno peruano en 2012. Con la información recopilada de cinco distritos del Departamento de Ayacucho en 2015 aplicaron *propensity score matching* para evaluar los efectos del programa. Los resultados demostraron que el FISE favoreció la adopción de las estufas de gas licuado de petróleo, pero que muchos hogares todavía combinan su uso con estufas tradicionales. Por lo que no se encontró evidencia de que el uso de estufas de gas licuado haya reducido los problemas respiratorios en los hogares beneficiarios.

2.2. Efectividad de Programas de Descontaminación Atmosférica en Chile

Estudios sobre contaminación atmosférica en Chile incluyen análisis costo-beneficio donde se comparan los beneficios y costos ambientales (Carrasco Vidal *et al.*, 2016; O’Ryan y Sánchez, 2008), y análisis costo-efectividad que comparan los costos de diversas alternativas regulatorias considerando la efectividad para reducir emisiones o concentraciones ambientales (Gómez *et al.*, 2014; Escobedo *et al.*, 2008). Efectividad de medidas regulatorias para la reducción de la contaminación (Jorquera *et al.*, 2018; Schueftan *et al.*, 2016; Reyes *et al.*,

2015; Schueftan y González, 2015; Toro *et al.*, 2014; Troncoso *et al.*, 2012). Y análisis de beneficios en el cual se cuantifican los beneficios económicos de los efectos sobre la salud de las distintas mejoras ambientales analizadas (Mardones *et al.*, 2015).

Sin embargo, la evaluación ex-post de políticas ambientales es relativamente reciente. Entre los estudios disponibles se pueden mencionar los trabajos de Calfucura y Montero (2013) quienes realizaron una evaluación ex-post de los efectos de un programa de descontaminación y calidad del aire en la región Metropolitana sobre la reducción de la contaminación atmosférica desde el año 2001. Para ello, implementaron estimaciones de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y regresión discontinua. Bajo el enfoque de MCO los resultados arrojaron reducciones en todas las estaciones de monitoreo, mientras que con el enfoque de regresión discontinua solo se evidencian efectos significativos en la estación con mayores niveles de contaminación. Contrastando con los resultados de las evaluaciones ex-ante de los impactos en calidad del aire del programa.

Mullins y Bharadwaj (2015) examinaron los efectos de restricciones temporales en los días en que se pronostica mala calidad de aire con el fin de disminuir las concentraciones de contaminantes y reducir los impactos negativos en la salud en el corto plazo en Santiago. Para lo anterior aplican un enfoque de diferencias en diferencias en conjunto con *propensity score matching* para emparejar cada día de episodio ambiental con días similares en los cuales no hubo episodio. Los resultados mostraron una reducción de aproximadamente 20% en las concentraciones de MP_{10} en el corto plazo al decretar episodios ambientales.

Mardones y Cornejo (2020) realizan una evaluación ex-post del Programa de Gestión de Episodios Críticos que impone restricciones al uso de estufas a leña en episodios críticos para la ciudad de Temuco. Utilizando una regresión con datos de panel los resultados muestran una reducción significativa en concentraciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} .

El presente estudio es similar a (Mardones y Cornejo, 2020) en el sentido que se evalúa un programa del Plan de Descontaminación Atmosférica. No obstante, se evalúa para la ciudad de Los Ángeles donde las restricciones asociadas a los Episodios Críticos son distintas que para Temuco. Además, se utiliza una estrategia empírica diferente y se evalúan impactos heterogéneos por tipo de episodio y temporalidad, efectos prolongados en el tiempo y otros análisis de robustez.

3. Contexto

La comuna de Los Ángeles es la capital de la provincia del Bio Bío y a su vez la comuna más poblada de dicha provincia. La comuna fue declarada zona saturada por $MP_{2,5}$ y MP_{10} , ambas como concentración diaria, lo cual dio lugar al Plan de Descontaminación

Atmosférica (PDA). ¹ Este plan tiene por objetivo dar cumplimiento a la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP_{2,5} y a la norma primaria de calidad ambiental para material particulado MP₁₀ en un plazo de 10 años, beneficiando a una población de 202.331 personas (Censo 2017).

El PDA considera una serie de medidas para el control de la contaminación del tipo estructural, y a corto, mediano y largo plazo ([Ministerio del Medio Ambiente, 2019](#)). Dentro de las principales medidas de corto plazo está el Programa de Gestión de Episodios Críticos (PGEC), el cual se compone de medidas y acciones que tienen por objetivo enfrentar los Episodios Críticos de contaminación por material particulado respirable MP_{2,5} y/o MP₁₀. El PGEC es el plan objetivo del presente estudio.

3.1. Plan Operacional para la Gestión de Episodios Críticos (PGEC)

El PGEC contempla actividades de levantamiento y análisis de información de calidad del aire y variables meteorológicas, coordinadas multisectorialmente para la aplicación y fiscalización del cumplimiento de las medidas establecidas. Operativamente se aplican medidas de prevención y mitigación, cuando los niveles de contaminación para MP_{2,5} y MP₁₀ pudieran desencadenar un episodio definido como Alerta, Pre-emergencia y Emergencia. Específicamente implementa restricciones horarias al uso de artefactos a leña ([SEREMI del Medio Ambiente, 2020](#)). Asimismo, se comunican estos niveles de contaminación a la población durante el período comprendido entre el 01 de abril al 30 de septiembre de cada año.

Los niveles de concentración que originan episodios de Emergencia Ambiental se establecen de acuerdo a un índice de calidad del aire. Los valores asignados corresponden a los valores promedio diario permitidos por la Norma Primaria de Calidad Ambiental para cada contaminante. Un valor menor a 50 µg/m³ para el caso de MP_{2,5} y 150 µg/m³ para el caso de MP₁₀ es considerado como bueno y con un bajo riesgo para la salud. Cualquier nivel superior a estos valores implica algún riesgo para la salud, entre más grande es el valor del índice mayor es la contaminación y el riesgo.

La Tabla 1 muestra los niveles de calidad del aire, con el objeto de facilitar la comprensión de la relación entre los niveles de contaminación del aire y los efectos en la salud de la

¹La declaración de zona saturada se da a través del decreto supremo N° 11, del 2 de marzo de 2015, del Ministerio del Medio Ambiente. De acuerdo a la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y al Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación, una vez declarada la zona saturada, se debe elaborar un Plan de Descontaminación. El PDA fue dictado de acuerdo al D.S.N°4/2017 del Ministerio del Medio Ambiente.

población.

Tabla 1: Niveles de Calidad del Aire

Condición	MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	Recomendaciones
Bueno	0 - 149	0 - 50	Realizar cualquier actividad al aire libre
Regular	150 - 194	51 -79	Personas vulnerables debe limitar esfuerzos prolongados al aire libre
Alerta	195 -239	80 -109	Población de riesgo deben limitar esfuerzos prolongados al aire libre
Pre-emergencia	240 - 329	110 - 169	Población general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre y los vulnerables evitarlo
Emergencia	≥ 330	≥ 170	Población general debe suspender todos los esfuerzos al aire libre

Notas: Esta tabla muestra los diferentes niveles de calidad del aire considerados por el Ministerio del Medio Ambiente (Chile), su equivalencia en concentraciones promedio diarias de material particulado fino (MP_{2,5}) y material particulado grueso (MP₁₀), y las recomendaciones de política para la población incluidas en la Norma Primaria de Calidad Ambiental para estos contaminantes. Material particulado está medido en microgramos por metro cúbico. Datos obtenidos del Ministerio de Medio Ambiente.

En los episodios de Alerta, no hay medidas restrictivas. En estos, la autoridad solo entrega recomendaciones para la protección de la salud y se hace un llamado al uso responsable y eficiente de la calefacción. En condiciones de Pre-emergencia y Emergencia existen restricciones adicionales las cuales se encuentran especificadas en el PGEC. Para el caso de Pre-emergencia, se prohíben el uso de calefactores y cocinas a leña entre las 18:00 y las 24:00 horas, el funcionamiento de hornos tradicionales chilenos durante las 24 horas, y el funcionamiento de calderas con emisiones mayores a 30 mg/m³ de MP entre las 18:00 y 24:00 horas. Para el caso de emergencias, se prohíbe el uso de calefactores y cocinas a leña durante las 24 horas, el funcionamiento de calderas con emisiones mayor o igual a 30 mg/m³ de MP durante las 24 horas, además de restricción de quemas controladas.

3.2. Fuentes emisoras

Según el inventario de emisiones atmosféricas (estimación de las emisiones de cada tipo de fuente en la zona saturada). La principal fuente responsable de las emisiones anuales de MP_{2,5} y/o MP₁₀, corresponde a la combustión residencial de leña, con el 86% y 96% respectivamente, empleándose tanto para calefacción de las viviendas como para cocción de alimentos.

Además, se estima que el 87% de las viviendas en el área urbana de Los Ángeles utilizan leña como principal fuente energética para calefaccionar y/o cocinar, alcanzándose un consumo de aproximadamente 263.956 m³ estéreos/año ²(Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Al comparar la cantidad total de artefactos a leña (48.860) versus la cantidad de hogares

²De acuerdo a encuesta de consumo energético para calefacción y cocción en el sector residencial, elaborada por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) en 2014.

presentes en la comuna (54.000), la gran mayoría de los hogares posee al menos un calefactor o una cocina a leña o bien ambos.

3.3. Fiscalización PGEC

El Ministerio de Salud y el Ministerio del Medio Ambiente en conjunto a través de sus respectivas Secretarías Ministeriales Regionales, tienen la obligación de fiscalizar las prohibiciones. Dentro de las cuales, se incluyen: Utilización de chimeneas de hogar abierto; quema en calefactores y cocinas a leña; uso de calefactores a leña en establecimientos comerciales y órganos de administración del Estado; uso de calefactores a leña en edificio de departamentos; uso de salamandras, calefactores hechizos y de cámara simple de combustión a leña y sus derivados; uso de cocinas a leña, además del uso de calefactores que no cumplan con la normativa de emisión de material particulado vigente.

Con estos fines, desde el 2021 cuentan con 24.956 viviendas bajo vigilancia, 402 fiscalizadas y 139 sumarios. Donde quienes no cumplan, arriesgan multas desde los 63 mil pesos (1 UTM ³) hasta el millón doscientos mil pesos (20 UTM) aproximadamente.

No obstante lo anterior, la máxima autoridad comunal, ha cuestionado públicamente ⁴ el PDA en su efectividad señalando que debe ser revisado.

4. Datos

Concentraciones horarias/diarias de $MP_{2,5}$ y/o MP_{10} , así como también, datos meteorológicos como humedad, temperatura, presión y velocidad del viento son obtenidos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la red MACAM-2 del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). ⁵ Los datos de los días con prohibición de uso de leña los pronósticos de Alerta, Pre-emergencia o Emergencia Ambiental fueron solicitados a través de la ley de Transparencia a la Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de Medio Ambiente de la Región del Bío Bío. La Tabla 2 muestra los días en los cuales se han implementado prohibiciones de uso de leña por pronóstico de Pre-emergencia o Emergencia Ambiental.

La Figura 1 y 2 muestran el perfil diario, tanto para MP_{10} como para $MP_{2,5}$ en días de Pre-emergencia y Emergencia respectivamente. Con un marcado ciclo horario, donde las

³Unidad Tributaria Mensual (UTM): Unidad definida en Chile que corresponde a un monto de dinero expresado en pesos y determinado por ley, el cual se actualiza en forma permanente por el Índice de Precios al Consumidor.

⁴<https://www.latribuna.cl/noticias/2021/06/30/krause-el-plan-de-descontaminacion-en-los-angeles-hay-que-revisarlo.html>.

⁵<https://sinca.mma.gob.cl/>.

Tabla 2: Días de Gestión de Episodios Críticos en Los Ángeles

Días			
Año	Pre-emergencia	Emergencia	Total
2018	35	12	47
2019	14	2	16
2020	20	1	21
2021	13	3	16
2022	18	1	19
Total	100	19	119

Notas: Esta tabla muestra el número total de días de Pre-emergencias y emergencias decretadas desde el 2018 al 2022 en la ciudad de Los Ángeles. Datos obtenidos de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región del Bío Bío.

altas concentraciones se presentan a partir de las 18:00, alcanzando los valores máximos entre las 20:00 y las 00:00 horas de cada día. Además, se observa que los niveles de contaminación en los días previos a una Pre-emergencia son mas bajos que durante el día de Pre-emergencia en sí, para casi todas horas. Caso contrario para los días previos a una Emergencia, donde los días previos tienen concentraciones mas altas prácticamente en todas las horas.

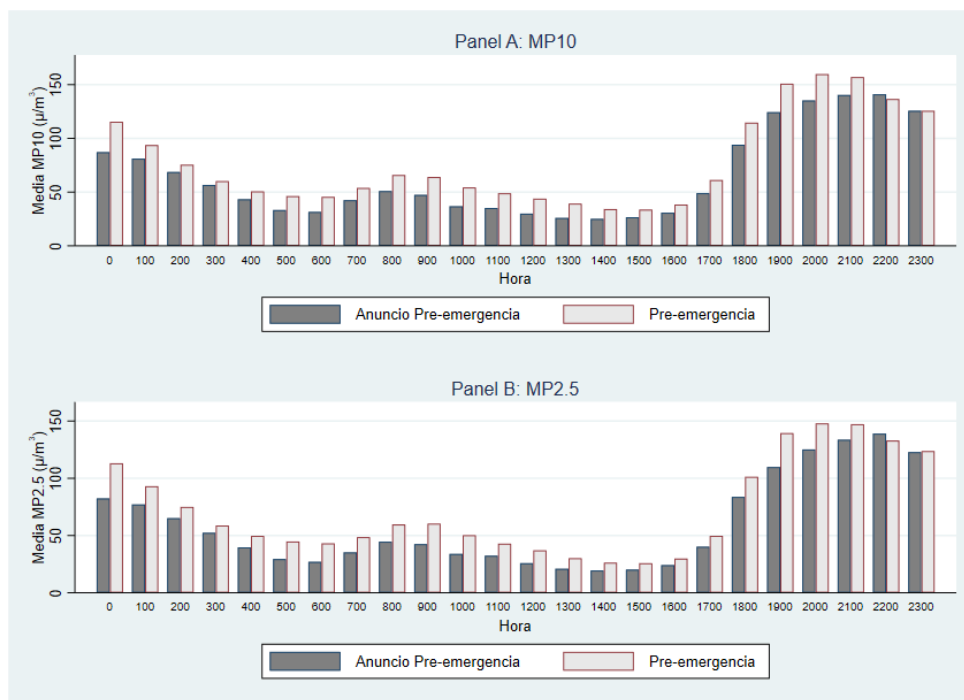


Figura 1: Concentraciones Horarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en Pre-emergencias Los Ángeles
Notas: Esta figura muestra las concentraciones horarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ durante días de Pre-emergencia y días previos para Los Ángeles desde el 2018 al 2022. Material particulado está medido en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Datos obtenidos desde el SINCA.

La Figura 3 presenta el perfil anual, muestra concentraciones diarias para Los Ángeles,

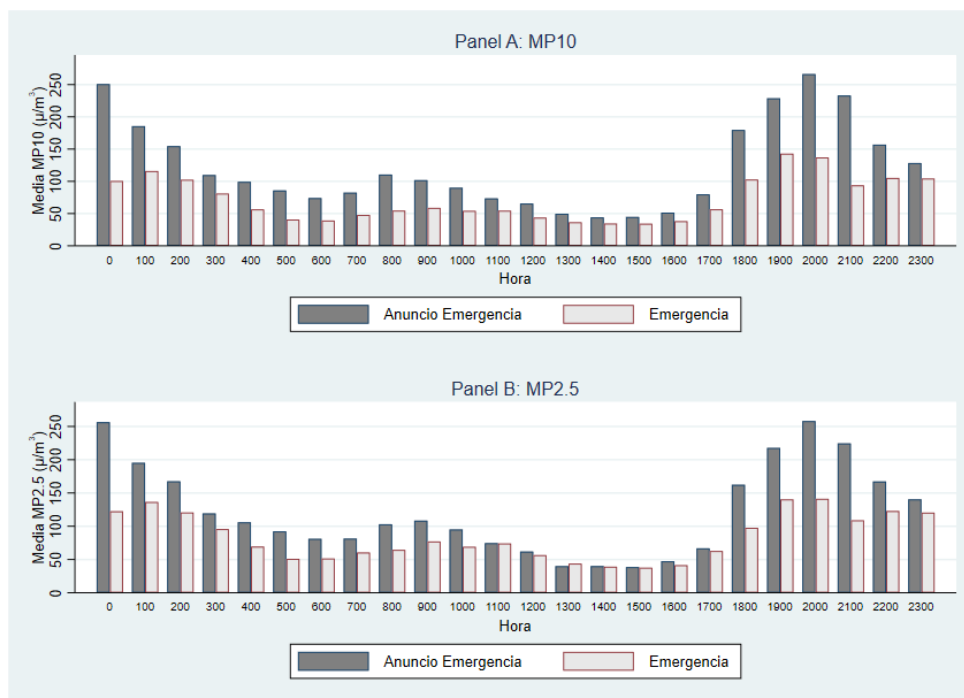


Figura 2: Concentraciones Horarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en Emergencias Los Ángeles
Notas: Esta figura muestra las concentraciones horarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ durante días de Emergencia y días previos para Los Ángeles desde el 2018 al 2022. Material particulado está medido en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Datos obtenidos desde el SINCA.

con una marcada estacionalidad, donde las mayores concentraciones se producen en meses de otoño e invierno. Esta estacionalidad se explica por dos condiciones. Primero, debido a la presencia en otoño e invierno de condiciones meteorológicas que desfavorecen la dispersión de los contaminantes (mala ventilación, bajas temperaturas, inversión térmica, altas presiones, etc.). Segundo, porque aumentan las emisiones de material particulado en el área, ya que la principal fuente emisora es el uso de leña para calefacción, cuyo uso aumenta con las bajas temperaturas de los meses entre abril y septiembre.

Durante parte del periodo monitoreado, se sobrepasa la norma chilena de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} como concentración de 24 horas, especialmente en los meses de otoño. Además, las mediciones para el MP_{10} también evidencian en casi la totalidad del periodo concentraciones superiores al nivel sugerido por la *World Health Organization* (*WHO*) de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 horas, lo que representa un evidente riesgo para la salud de la población (*World Health Organization*, 2016).

El análisis para las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ muestra que en gran parte del periodo analizado se presentan concentraciones de 24 horas superiores al nivel propuesto por la *WHO* de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para este contaminante. Y en los meses de otoño-invierno en todos los periodos

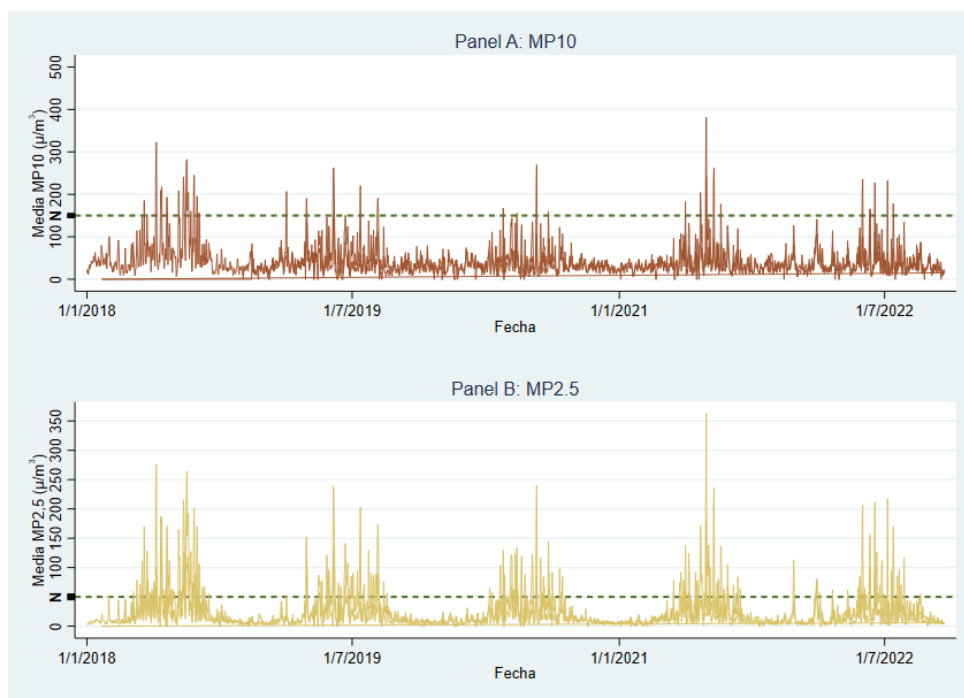


Figura 3: Concentraciones Diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en Los Ángeles

Notas: Esta figura muestra las concentraciones promedio diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ desde el 2018 al 2022, para las estaciones de monitoreo de Los Ángeles, Norma Chilena en verde. Material particulado está medido en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Datos obtenidos del SINCA.

se sobrepasa la norma chilena de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 24 horas.

La Tabla 3 presenta la estadística descriptiva de las variables disponibles en la base de datos para episodios de Emergencia y Pre-emergencia. Los datos, al igual que la Figura 2, muestran que las medias de ambos contaminantes disminuyen durante un día con restricciones en episodios de Emergencias, en relación al día previo. A diferencia de las Pre-emergencias. Lo cual es un indicio de que el programa podría tener resultados de acuerdo al tipo de episodio.

4.1. Variables de Control

Las condiciones meteorológicas son un factor incontrolable pero fundamental en la variabilidad de la contaminación atmosférica. De acuerdo a la disponibilidad de datos las variables meteorológicas que se pueden incluir como variables de control son temperatura, humedad y velocidad del viento.

La temperatura tiene un efecto inverso sobre la acumulación de contaminantes atmosféricos, es decir, a menores temperaturas mayores son las concentraciones de material particulado (Lyu *et al.*, 2018). Esto se debe principalmente al mayor uso de calefacción a leña a medida

Tabla 3: Estadística descriptiva de las variables de interés

Panel A: Totales					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
MP ₁₀	84253	36.52	53.52	0	1394
MP _{2,5}	84253	22.01	47.17	0	1383
Panel B: Días Previos a Episodios de Emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
MP ₁₀	912	110.76	153.51	0	1124
MP _{2,5}	912	120.52	130.38	0	1019
Panel C: Días con Episodios de Emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
MP ₁₀	912	72.49	114.81	0	955
MP _{2,5}	912	83.71	100.45	0	908
Panel D: Días Previos a Episodios de Pre-emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
MP ₁₀	4800	72.80	124.04	0	1384
MP _{2,5}	4800	68.09	112.89	0	1383
Panel E: Días con Episodios de Pre-emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
MP ₁₀	4800	77.97	119.34	0	1394
MP _{2,5}	4800	72.19	106.86	0	1360

Notas: Esta tabla muestra estadísticas descriptivas de los contaminantes MP₁₀, MP_{2,5} y variables meteorológicas en frecuencia horaria entre 2018-2022. Panel A muestra datos de todo el periodo de las variables. Panel B y C muestra datos de las variables durante días previos a un Episodio de Emergencia y durante un Episodio de Emergencias respectivamente. Panel D y E muestra datos de las variables durante días previos a un Episodio de Pre-emergencia y durante un Episodio de Pre-emergencia respectivamente. Material particulado está medido en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Elaboración propia en base a datos del SINCA.

que las temperaturas disminuyen en la zona centro-sur de Chile y por el fenómeno de inversión térmica que ocurre cuando bajan las temperaturas (Fuller *et al.*, 2014; Schueftan *et al.*, 2016).

La velocidad del viento es una de las más importantes variables meteorológicas que influyen en las concentraciones de material particulado. Su efecto principal está asociado con la dispersión y dilución de partículas finas (Clements *et al.*, 2016; Bel y Holst, 2018). Cuando aumenta la velocidad del viento en la zona donde está localizada una fuente de emisión de contaminantes, el volumen de aire que se desplaza por unidad de tiempo es mayor. En consecuencia, la concentración de contaminantes disminuye si la emisión es constante, generándose el proceso denominado dispersión atmosférica (Venegas *et al.*, 2014).

La humedad relativa se relaciona negativamente con partículas gruesas, ya que reduce la resuspensión lo que no necesariamente ocurre con las partículas más finas (Bel y Holst, 2018; Clements *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2015).

La Tabla A1 de Anexos muestra la estadística descriptiva de estas variables para Los

Ángeles en el periodo de estudio.

5. Estrategia Empírica

Este trabajo busca evaluar el impacto causal de las medidas de Pre-emergencia y Emergencia del PGEC de Los Ángeles sobre las concentraciones diarias y horarias de material particulado. Para ello, se define como variable de tratamiento la denominación de episodios de Pre-emergencia y Emergencia. Es decir, la variable de tratamiento corresponde a una variable dicotómica que adopta el valor uno si en un día y hora determinada se decretó un Episodio Crítico en una estación de monitoreo ubicada en una zona con restricción, o cero si no se decretó Episodio Crítico. También, se incluye variables meteorológicas (temperatura, velocidad del viento, y humedad). Además, de variables dicotómicas para medir efectos temporales y por estación.

5.1. Estaciones de Monitoreo

Actualmente, Los Ángeles posee una red de monitoreo de calidad del aire que cuenta con dos estaciones, ambas con representatividad poblacional. La Estación 21 de Mayo y Estación Los Ángeles Oriente, ambas con la misma fecha de instalación y puesta en marcha, disponen con información de calidad del aire de $MP_{2,5}$ y/o MP_{10} a partir del año 2012. La declaración de zona saturada por ambos contaminantes en su métrica diaria para la comuna se fundamentó en los registros obtenidos mediante el monitoreo oficial de $MP_{2,5}$ y/o MP_{10} , a través del cual se constató la superación de la norma primaria diaria, para ambos contaminantes en el año 2013 ([Ministerio del Medio Ambiente, 2015](#)).

5.2. Polígono de Restricción

A partir de las estaciones de monitoreo instaladas en el polígono que delimita la zona con prohibición de uso de calefactores representado en la Figura 4 es posible obtener el nivel de contaminación ambiental antes y después de la declaración de un Episodio Crítico (grupo de tratamiento).

5.3. Regresión Discontinua

El diseño de regresión discontinua (RD) es de los métodos más importantes en la evaluación de políticas públicas recientes. Se puede utilizar para medir el efecto causal de las variables de resultado bajo la influencia de alguna política que presente una discontinuidad y

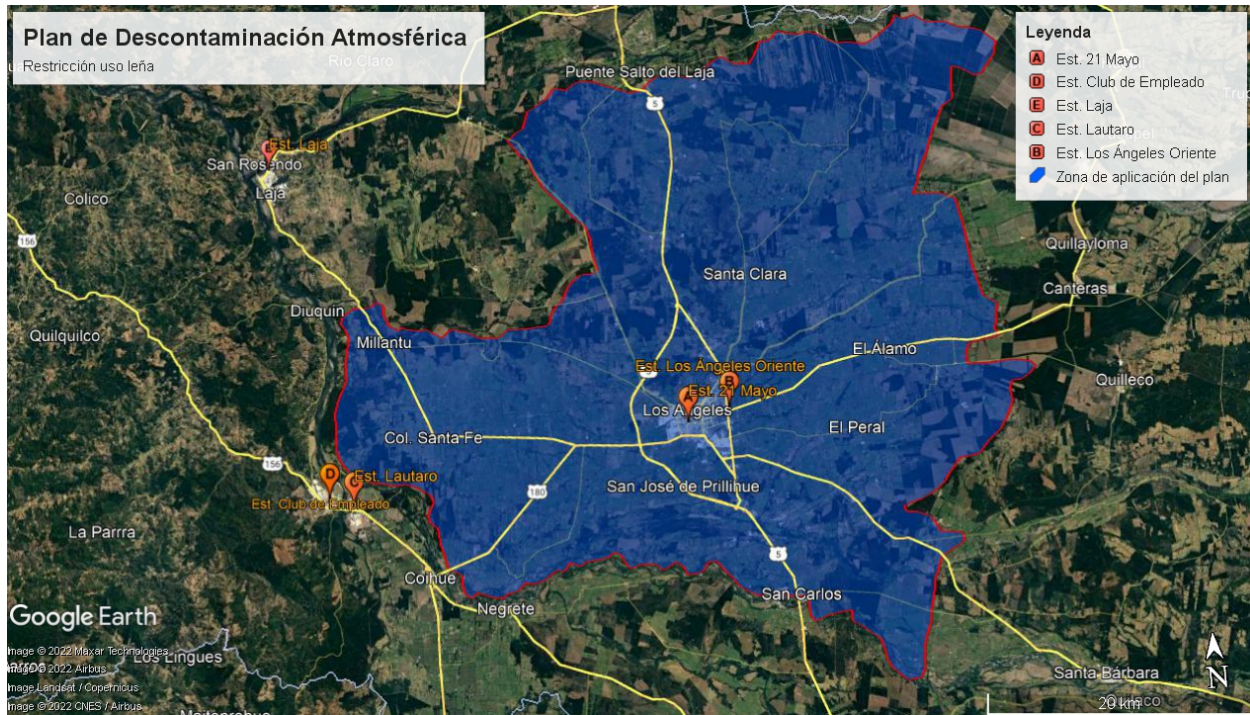


Figura 4: Polígono Restricción Uso de Leña, Los Ángeles

Notas: Esta figura muestra el polígono de restricción para el uso de leña en Los Ángeles y las estaciones de monitoreo. Datos obtenidos de Resolución Exenta N°130 de la SEREMI de Medio Ambiente de la Región del Bío Bío.

abordar eficazmente el problema de la coincidencia entre el grupo de tratamiento y el grupo de control.

La idea principal tras este diseño es explotar la discontinuidad observable en la probabilidad de tratamiento en relación con una variable de asignación. Para implementar RD se requiere que la probabilidad de tratamiento tenga un cambio discontinuo en algún valor de esta variable de asignación. Al ser un agrupamiento aleatorio cerca del punto de corte, la regresión discontinua generalmente se considera un cuasi-experimento. En este sentido, puede considerarse como un experimento aleatorio local. Así, la RD puede reflejar el impacto de la implementación de Programa de Gestión de Episodios Críticos en la contaminación atmosférica.

En general, bajo supuestos plausibles, se puede señalar que en la vecindad de un punto de corte (*cutoff*) c . Un cambio discontinuo en la variable de interés (Y) se puede atribuir al cambio en la probabilidad de tratamiento. Además, en torno a c el nivel de tratamiento puede ser considerado una asignación aleatoria, como si se tratase de un diseño experimental. De lo anterior se desprende que los parámetros estimados por el método de RD posean la mayor validez interna entre los estimadores cuasi experimentales (Lee, 2008).

En el caso de la Regresión Discontinua Sharp (RDS), se tiene que la probabilidad de

tratamiento es una función determinística de la variable de asignación. Es decir, la probabilidad de tratamiento pasa de cero a uno en c . Esto es, todas las observaciones cuyo valor sea mayor a c forman parte del grupo de tratamiento, mientras que todas las observaciones cuyo valor sea menor a c forman parte del grupo control (Imbens y Lemieux, 2008; Lee y Lemieux, 2010). Así, cuando la variable de asignación x_1 es mayor que el punto de corte c , la zona en la estación i es tratada.

D_i es la función determinista de x_i , con dos estados:

$$D_{it} = \begin{cases} 1 & x_i > c \\ 0 & x_i \leq c \end{cases} \quad (1)$$

Con dos resultados: $Y_i(1)$ y $Y_i(0)$. $Y_i(1)$ representa la variable de resultado afecta por la política y $Y_i(0)$ representa la variable de resultado no afecta por la política. Por lo tanto, Y_i se puede expresar de la siguiente manera:

$$Y_i = Y_0(1 - D_i) + Y_1D_i = Y_0 + (Y_1 - Y_0)D_i \quad (2)$$

Siendo la forma más sencilla de medir el efecto de la política, calcular la diferencia entre $Y_i(1)$ y $Y_i(0)$. En realidad, es imposible observar ambos al mismo tiempo, pero el diseño de discontinuidad de regresión puede resolver este problema de manera efectiva (Imbens y Lemieux, 2008).

De lo discutido en la sección anterior, existen factores climatológicos que afectan la calidad del aire, con fechas específicas para la aplicación de restricciones debido a la ocasión de Episodios Críticos. En consecuencia, en el corto plazo (días) entre episodios, las condiciones climáticas tienen la misma distribución de probabilidad. Por lo tanto, podemos considerar un período de tiempo antes y después de la aplicación de un Episodio Crítico, como una agrupación aleatoria local y utilizar el método de RDS para identificar si las restricciones del PGEC reducen los niveles de contaminación del material particulado.

Usando la forma funcional lineal, se especifica el siguiente modelo para RDS (Lee y Lemieux, 2010):

$$p_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 EP_{it} + \alpha_2 f(x) + \alpha_3 EP_{it} f(x) + \lambda X_{it} + \delta_i + \mu_t + \varepsilon_{it}, \quad (3)$$

donde i representan la estación y t el día u hora de acuerdo a la estimación. p_{it} representa las concentraciones en logaritmo natural de $MP_{2,5}$ y MP_{10} . EP_{it} es una variable dicotómica del periodo de restricción. x es la variable de asignación, $x = [t - c]$ indica la cantidad de días (horas) antes y después de un episodio de restricción. c es el día de restricción, por lo que x es 0 en este día, siendo un valor negativo antes y un valor positivo después del episodio.

$f(x)$ es una función polinómica de primer orden con x como variable independiente. X_{it} es un conjunto de variables de control, que incluye variables meteorológicas (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa). δ_i es el efecto fijo por estación i . μ_t es un efecto fijo en el tiempo (año, mes, día de la semana y hora del día). ϵ_{it} es el término error aleatorio.

El coeficiente de interés en la Ecuación 3 es α_1 , el cual captura la diferencia en la concentraciones de material particulado antes y después de un episodio de restricción.

Por otra parte, mencionar que la elección de la forma funcional del polinomio de ajuste en la RDS es un aspecto importante que debe considerarse. Cuando se utiliza un polinomio de ajuste, se está imponiendo una estructura específica en la relación entre la variable de asignación x y la variable resultado p_{it} . Si la relación real entre estas variables no se ajusta bien a la forma funcional del polinomio elegido, el modelo puede no capturar correctamente la verdadera relación y puede conducir a estimaciones sesgadas o ineficientes.

Por lo tanto, es recomendable explorar diferentes formas funcionales y técnicas flexibles para modelar la relación entre las variables de manera más precisa. Además, es importante realizar pruebas de sensibilidad y verificar la robustez de los resultados.

6. Resultados

6.1. Impacto de Episodios Críticos Sobre las Concentraciones Diarias de Material Particulado

La Figura 5 muestra el lineal ajuste de las concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$, 30 días antes y después de un Episodio Crítico (Pre-emergencia y Emergencia), es decir, una *pooled regression*, donde se juntan ambos tipos de episodios y se tratan como si fuesen un solo evento. La línea vertical indica si se aplican las restricciones al uso de la leña (punto de corte). Si bien, se observa un alza en los días previos a un episodio, y posteriormente una caída en los niveles de ambos contaminantes, la diferencia antes y después, de acuerdo al ajuste no es significativa. Lo que sugiere que las restricciones considerando ambos Episodios Críticos no tendrían un efecto en la mejora de la calidad del aire.

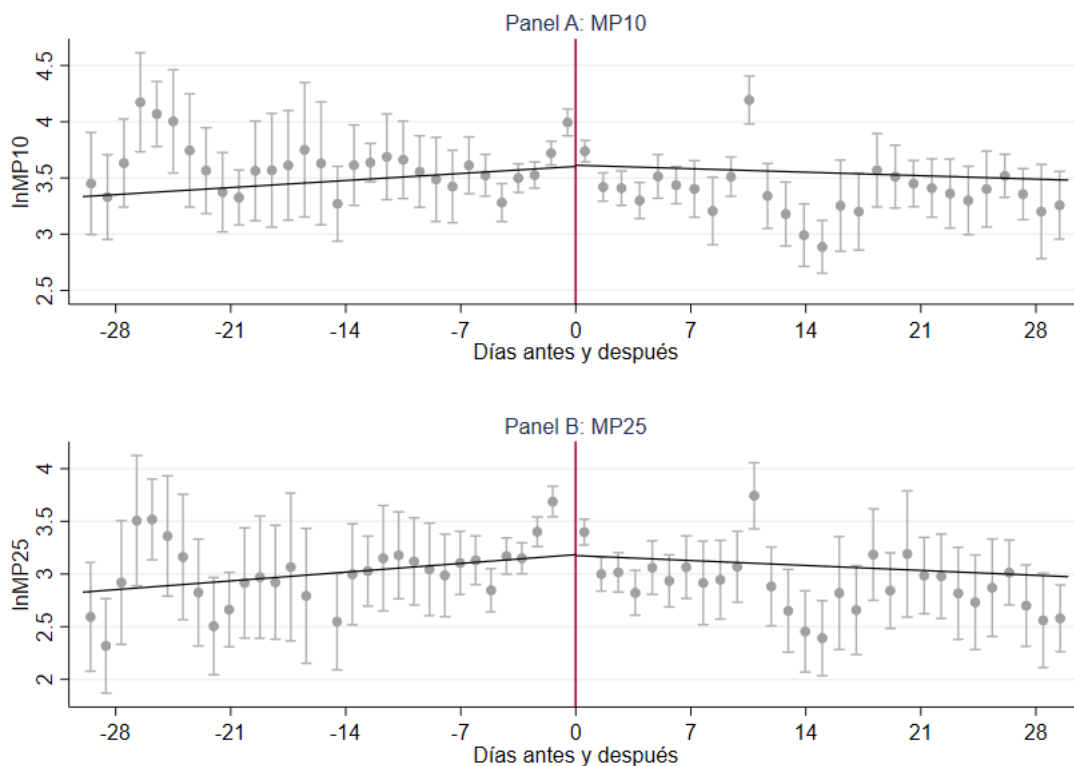


Figura 5: Impacto Episodios Crítico en la Contaminación Atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones diarias de material particulado para 30 días antes y después de un Episodio Crítico (Pre-emergencia y Emergencia): Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

Tabla 4: Impacto de Episodio Crítico en la Contaminación Atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	0.166 (0.407)	0.114 (0.447)	-0.0954 (0.0948)	0.0444 (0.411)	-0.0316 (0.463)	-0.181 (0.118)
Observaciones	1405	1405	1405	1405	1405	1405
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	47.62	47.62	47.62	47.62	47.62	47.62
<i>Mean right</i>	37.02	37.02	37.02	37.02	37.02	37.02
<i>Bandwidth</i>	11.08	9.714	3.327	12.20	10.01	5.631
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2
Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	0.169 (0.659)	0.103 (0.701)	-0.125 (0.116)	0.0482 (0.615)	0.0157 (0.671)	-0.213 (0.131)
Observaciones	1413	1413	1413	1413	1413	1413
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31	34.31
<i>Mean right</i>	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81	18.81
<i>Bandwidth</i>	12.19	10.94	3.050	11.31	11.36	4.708
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de los Episodios Críticos (Pre-emergencia y Emergencia) en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE ([Calonico et al., 2014](#)). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

La Tabla 4 muestra los resultados para la estimación de RDS de la Ecuación (3) ⁶ para 3 modelos utilizando un polinomio de primer orden: El primero (1) incluye la variable explicativa de interés. El segundo (2) modelo agrega variables de control meteorológicas y en el tercer (3) y principal modelo, se incluyen efectos fijos por estación y en el tiempo. Además, se incluyen 3 modelos análogos adicionales ((4),(5),(6)) utilizando un polinomio de segundo orden.

⁶Para efectos de validación de la estimación RDS, los apartados C.1 y C.1.1 de los anexos muestran que los datos cumplen con la prueba de validación y continuidad de variables observables (Figura A1).

Los resultados muestran que al establecer restricciones durante días de Episodios Críticos, no se observan coeficientes estadísticamente significativos en ninguno de los modelos.

6.1.1. Impactos Heterogéneos por Tipo de Episodio

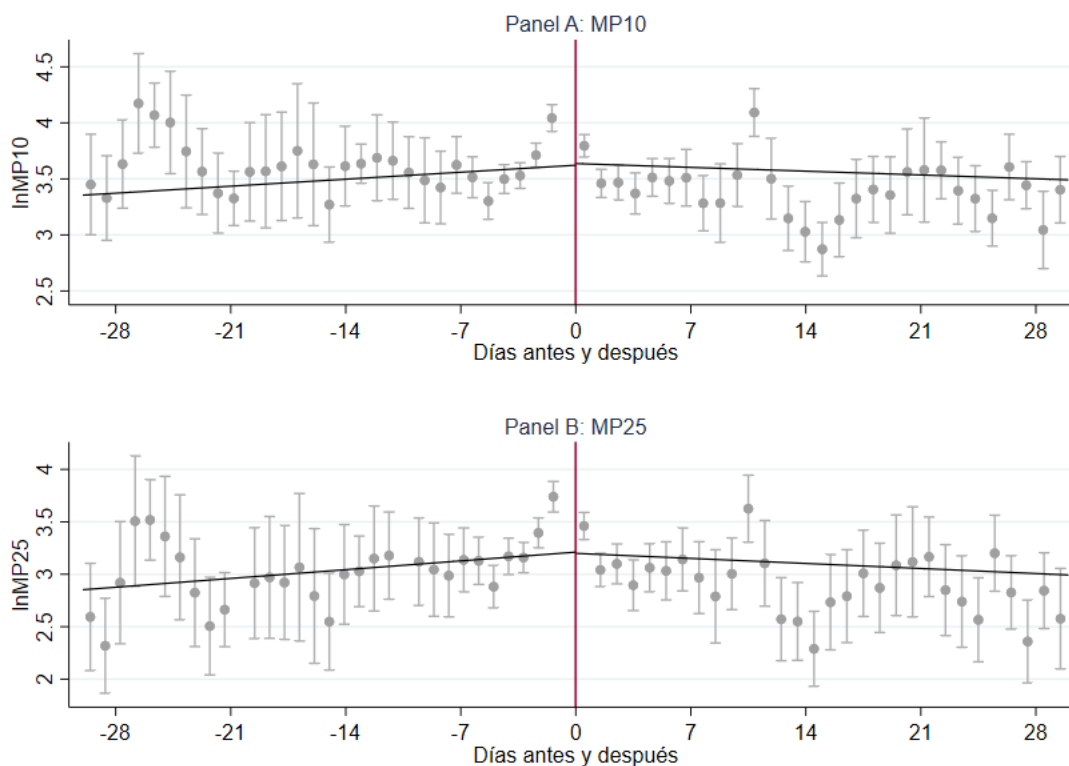


Figura 6: Impacto de Pre-emergencias en Contaminación atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones diarias de material particulado para 30 días antes y después de un Episodio Crítico de Pre-emergencia: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

La Figura 6 muestra el ajuste de las concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para episodios de Pre-emergencia, mientras que la Tabla 5 muestra los resultados de la estimación. Al igual que para el caso de anterior, no se observa una caída en los niveles de concentraciones de ambos contaminantes. Así, las restricciones impuestas en Pre-emergencias no tendrían un efecto significativo en las concentraciones atmosféricas de material particulado.

Del mismo modo, la Figura 7 muestra el ajuste de las concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en episodios de Emergencia, mientras que los resultados de la estimación se presentan en la Tabla 6. En este caso, si se observa una caída clara en los niveles de concentraciones

Tabla 5: Impacto de Pre-emergencias en Contaminación Atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Pre-emergencia	0.177 (0.398)	0.102 (0.442)	-0.0761 (0.0894)	0.0643 (0.401)	-0.00470 (0.454)	-0.152 (0.110)
Observaciones	1379	1379	1379	1379	1379	1379
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	46.97	46.97	46.97	46.97	46.97	46.97
<i>Mean right</i>	36.48	36.48	36.48	36.48	36.48	36.48
<i>Bandwidth</i>	11.96	10.55	3.359	12.22	10.77	6.090
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2
Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Pre-emergencia	0.177 (0.651)	0.0813 (0.711)	-0.101 (0.131)	0.0612 (0.604)	0.0282 (0.671)	-0.150 (0.129)
Observaciones	1387	1387	1387	1387	1387	1387
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	33.74	33.74	33.74	33.74	33.74	33.74
<i>Mean right</i>	18.23	18.23	18.23	18.23	18.23	18.23
<i>Bandwidth</i>	12.25	13.10	2.968	8.957	11.91	5.084
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de Pre-emergencias en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

de ambos contaminantes. Lo que sugiere que las restricciones durante emergencias pueden tener relación con la mejora en la calidad del aire.

Los resultados muestran que al establecer restricciones durante días de Emergencia se observa un coeficientes negativo y estadísticamente significativos en los modelos principales con controles y efectos fijos. Específicamente, se encuentra una disminución estadísticamente significativa al 1 % de un 34,7 % en concentraciones diarias de MP₁₀ y de 34,9 % para MP_{2,5} al usar un polinomio de primer orden. Además, de una reducción de un 50,0 % y 43,2 % para MP₁₀ y MP_{2,5} respectivamente en los modelos con un polinomio de segundo orden.

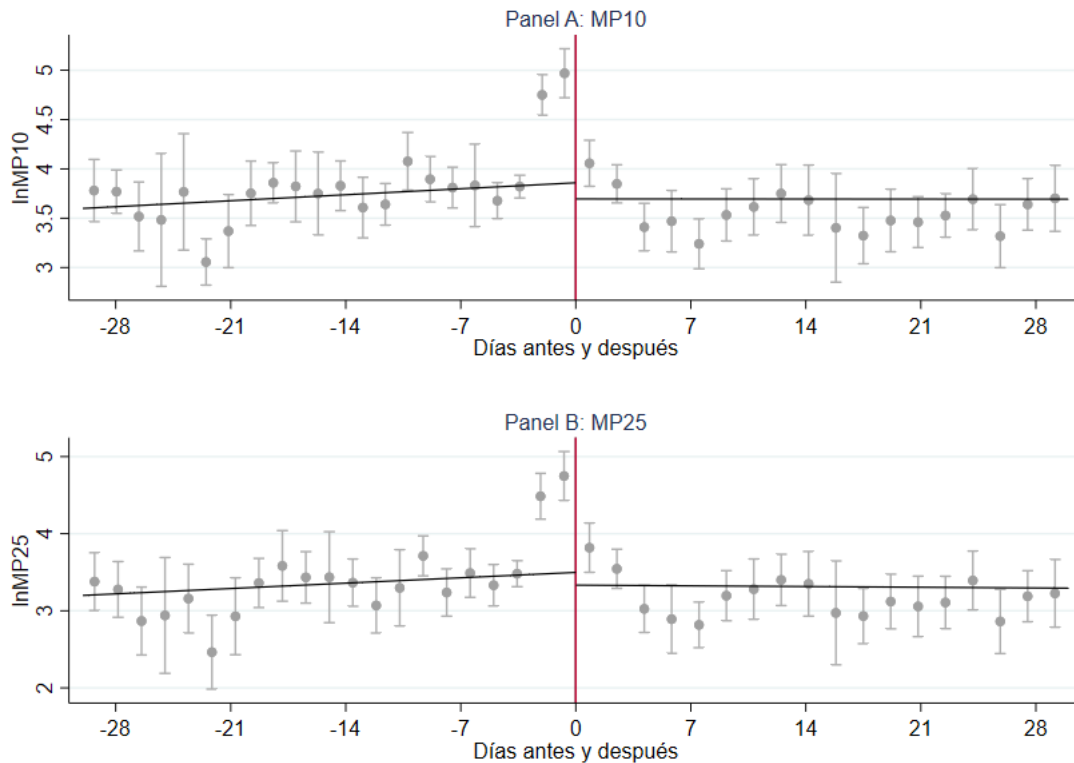


Figura 7: Impacto de Emergencias en Contaminación Atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones diarias de material particulado para 30 días antes y después de un Episodio Crítico de Emergencia: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

6.1.2. Impactos Heterogéneos por Año

Con el objetivo de observar la evolución de la política desde su implementación durante los años, la Tabla 7 muestra efectos heterogéneos por años para el caso de todos los Episodios combinados, y para Pre-emergencias y Emergencias por separado.

Al igual que en las Tablas 6 y 10, los resultados muestran la efectividad de sólo los episodios de Emergencia. Específicamente, se encuentra una reducción significativa al 10 % de un 37,5 % para MP_{10} y de 35,5 % para $MP_{2,5}$ en el 2019 en relación al 2018, año de inicio del Programa. Durante los años 2020 y 2021, no existe efecto de las restricciones, lo cual es consistente con las prohibiciones a las personas producto de la pandemia COVID que obligó a la población a permanecer largos periodos en sus hogares y, probablemente, disponer de más calefacción. Finalmente, durante el año 2022 existe una reducción estadísticamente significativa de 38,8 % para MP_{10} y de 69,1 % para $MP_{2,5}$.

Tabla 6: Impacto de Emergencias en Contaminación Atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Emergencia	-0.572 (0.432)	-0.102 (0.450)	-0.347*** (0.0296)	-0.746 (0.486)	-0.466 (0.426)	-0.503*** (0.0585)
Observaciones	626	626	626	626	626	626
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	49.71	49.71	49.71	49.71	49.71	49.71
<i>Mean right</i>	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70
<i>Bandwidth</i>	7.559	8.787	4.938	12.46	10.70	8.003
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2
Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Emergencia	-0.826** (0.332)	-0.395 (0.266)	-0.349*** (0.113)	-1.145*** (0.406)	-0.597* (0.333)	-0.432*** (0.128)
Observaciones	629	629	629	629	629	629
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44	37.44
<i>Mean right</i>	16.90	16.90	16.90	16.90	16.90	16.90
<i>Bandwidth</i>	4.466	4.970	4.150	7.790	8.062	7.139
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de emergencias en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

6.2. Impacto de Episodios Críticos Sobre las Concentraciones Horarias de Material Particulado

La Figura 8 muestra el ajuste de las concentraciones horarias de MP₁₀ y MP_{2,5}, 7 días antes y después de un Episodio Crítico (Pre-emergencia y Emergencia), la línea vertical indica si se aplican las restricciones al uso de la leña (punto de corte). No se observa una caída clara en los niveles de ambos contaminantes. Lo que sugiere que las restricciones no tendrían un efecto en la mejora de la calidad del aire.

Al igual que las Tablas 4, 5 y 6, la Tabla 8 muestra los resultados para la estimación de

Tabla 7: Efectos Heterogéneos por años (2018-2022) del Impacto de Episodios Críticos: Regresión Discontinua *Sharp*

Año	Panel A: MP ₁₀			Panel B: MP _{2,5}		
	Episodio	Pre-emergencia	Emergencia	Episodio	Pre-emergencia	Emergencia
2019	-0.0593 (0.123)	-0.0907 (0.210)	-0.375* (0.197)	-0.0950 (0.123)	0.0697 (0.210)	-0.355* (0.197)
2020	0.101 (0.103)	0.0666 (0.103)	0.129 (0.150)	0.0727 (0.111)	0.123 (0.191)	0.0311 (0.157)
2021	-0.0776 (0.111)	-0.0820 (0.116)	0.0747 (0.121)	-0.151 (0.121)	-0.356* (0.209)	0.0110 (0.130)
2022	-0.0220 (0.112)	-0.0583 (0.111)	-0.388** (0.195)	-0.0890 (0.127)	-0.105 (0.236)	-0.691*** (0.245)
Constant	11.32*** (0.788)	11.44*** (0.824)	8.885*** (2.251)	9.664*** (0.836)	11.33*** (1.017)	7.136*** (2.147)
Observaciones	1405	1379	626	1413	1387	629
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Bandwidth</i>	3.327	3.359	4.938	3.050	2.968	4.150
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	1	1	1

Notas: Esta tabla muestra los efectos heterogéneos por años durante el período 2018-2022 del impacto de los Episodios Críticos, Pre-emergencias y emergencias en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

RDS de la Ecuación 3 para 3 modelos utilizando un polinomio de primer orden, y se incluyen 3 modelos adicionales ((4),(5),(6)) utilizando un polinomio de segundo orden.

Los resultados muestran que al establecer restricciones durante días de Episodios Críticos (Pre-emergencias y Emergencias) no se observan reducciones significativas en las concentraciones horarias de MP₁₀ y MP_{2,5} en ninguno de los modelos, lo cual es consistente con el análisis diario.

6.2.1. Impacto Heterogéneos por Tipo de Episodio

La Figura 9 muestra el ajuste de las concentraciones horarias de MP₁₀ y MP_{2,5} 7 días antes y después de una de Pre-emergencia. Los resultados de la estimación se presentan en la Tabla 9. Al igual que para en la Figura 8, no se observa una caída abrupta en los niveles de ambos contaminantes. Este resultado es corroborado en las estimaciones presentes en la Tabla 9.

La Figura 10 muestra el ajuste de las concentraciones horarias de MP₁₀ y MP_{2,5} durante

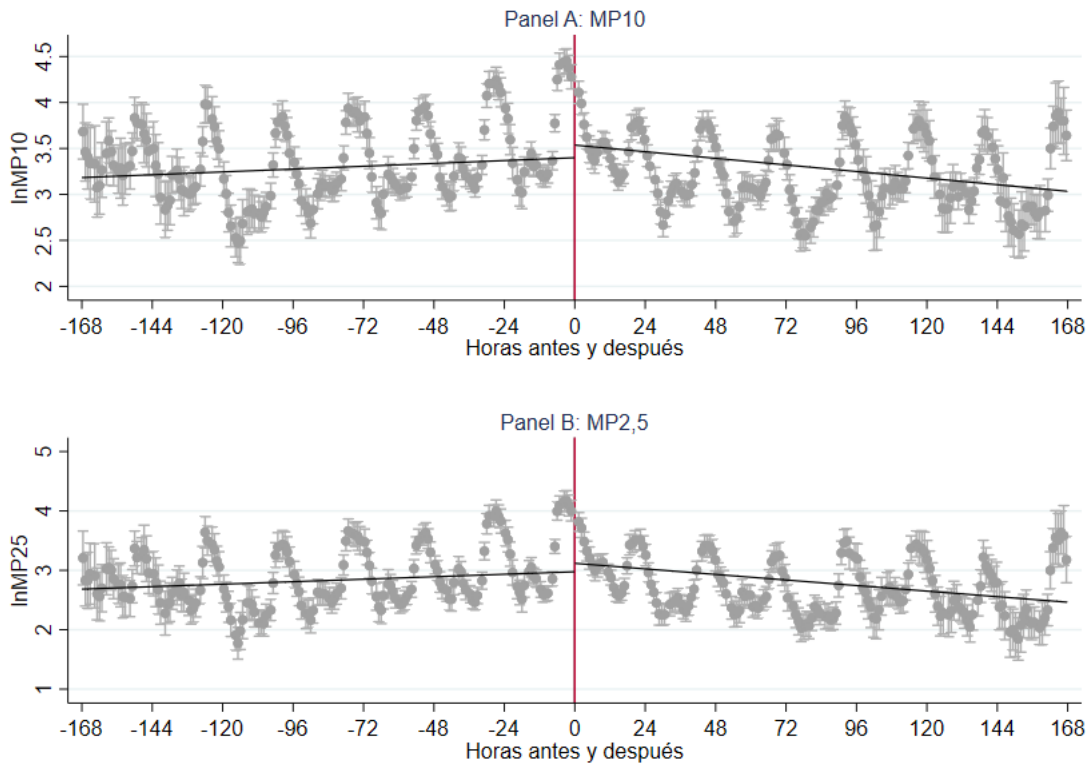


Figura 8: Impacto Episodios Críticos en Contaminación Atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones horarias de material particulado para 7 días antes y después de un Episodio Crítico: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

episodios de Emergencia. Aquí, si se observa una caída clara en los niveles de las concentraciones, sugiriendo que las restricciones pueden tener relación con la mejora en la calidad del aire durante las horas de la Emergencia. La Tabla 10 muestra los resultados de esta estimación. Se observan coeficientes negativos y estadísticamente significativos en todos los modelos para MP_{10} y en 5 de los 6 de $MP_{2,5}$. Específicamente, se encuentra una disminución estadísticamente significativa al 1% en el modelo principal con controles, efectos fijos y con un función polinómica de primer orden de un 29,1% en concentraciones horarias de MP_{10} y de 24,5% para $MP_{2,5}$.

6.2.2. Impactos Heterogéneos por Hora

Para efectos de identificar efectos diferenciados a través de las horas durante episodios de restricción. La Tabla 11 muestra efectos heterogéneos por hora del día para Episodios

Tabla 8: Impacto de Episodios Críticos (24 Horas) en Contaminación Atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	-0.0115 (0.407)	-0.0953 (0.432)	0.149 (0.135)	-0.252 (0.489)	-0.252 (0.511)	0.147 (0.189)
Observaciones	22210	22210	22210	22210	22210	22210
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	51.17	51.17	51.17	51.17	51.17	51.17
<i>Mean right</i>	38.94	38.94	38.94	38.94	38.94	38.94
<i>Bandwidth</i>	40.09	49.11	55.26	50.22	59.35	72.67
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2
Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	0.0436 (0.626)	-0.0448 (0.663)	0.187 (0.138)	-0.265 (0.704)	-0.256 (0.743)	0.184 (0.157)
Observaciones	22210	22210	22210	22210	22210	22210
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	40.22	40.22	40.22	40.22	40.22	40.22
<i>Mean right</i>	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90	19.90
<i>Bandwidth</i>	42.86	58.68	51.71	49.26	60.66	80.27
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de Episodios Críticos en las concentraciones horarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes, día de la semana y hora del día. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

Críticos combinados (*pooled regression*), Pre-emergencias y Emergencias.

Utilizando rangos horarios por periodos de 3 horas consecutivas, y tomando como base el bloque entre 15:00 y 18:00, es decir previo a las restricciones interpuestas. Los resultados muestran que para MP₁₀ existe una disminución estadísticamente significativa al 5% y 1%, en casi todos los bloques, especialmente en la madrugada a partir de las 0:00 horas hasta las 6:00, durante la mañana desde las 9:00 a las 12:00 horas y durante la tarde noche desde las 18:00 hasta las 23:00 horas, siendo durante episodios de Emergencia de mayor magnitud respecto a Episodios combinados y de Pre-emergencias en todos los casos, con una reducción de un 3,25% durante las 0:00 y 3:00 horas. Para MP_{2,5}, igualmente existe una reducción

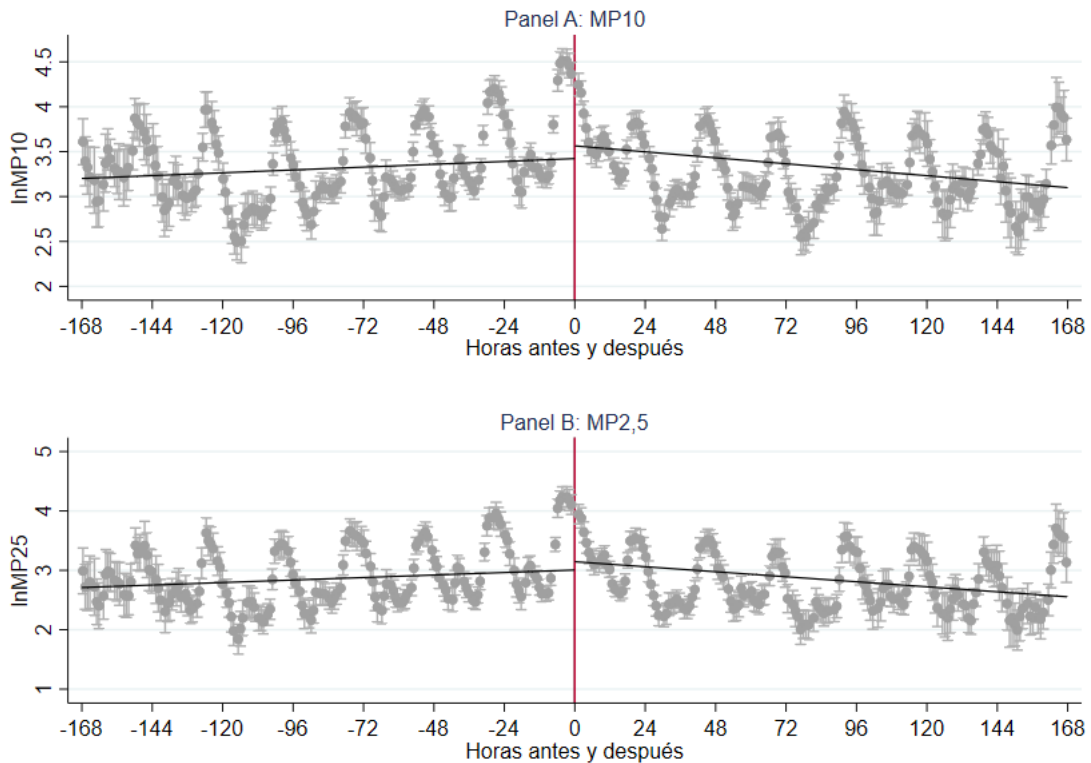


Figura 9: Impacto de Pre-emergencias en contaminación atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones horarias de material particulado para 7 días antes y después de una Pre-emergencia : Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

mayor en episodios de Emergencia, a partir de las 0:00 hasta la 9:00 horas, estadísticamente significativas al 1 % con una disminución de 2,9 % durante las 0:00 y 3:00 horas.

6.3. Efectos Prolongados en el Tiempo

Una de las particularidades del estudio sobre contaminantes, se debe a la propia naturaleza de este (tasa de descomposición natural por ejemplo) o a factores (climatológicos por ejemplo) que lo pueden disipar, mitigar o aumentar. Particularmente, el material particulado puede permanecer en el aire durante el tiempo generando un efecto acumulativo residual día a día.

Tomando esto en cuenta, la Tabla 12 muestra los resultados para la especificación principal en concentraciones diarias para Episodios combinados (*pooled regression*), Pre-emergencias y Emergencias, tomando el día siguiente de un episodio como punto de corte

Tabla 9: Impacto de Pre-emergencia (24 Horas) en contaminación atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Pre-emergencia	-0.00712 (0.402)	-0.101 (0.426)	0.155 (0.128)	-0.280 (0.499)	-0.268 (0.514)	0.161 (0.211)
Observaciones	21559	21559	21559	21559	21559	21559
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	50.29	50.29	50.29	50.29	50.29	50.29
<i>Mean right</i>	38.42	38.42	38.42	38.42	38.42	38.42
<i>Bandwidth</i>	40.49	49.98	53.65	48.96	56.45	62.36
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Pre-emergencia	0.0499 (0.624)	-0.0495 (0.658)	0.194 (0.137)	-0.340 (0.722)	-0.274 (0.748)	0.214 (0.203)
Observaciones	21559	21559	21559	21559	21559	21559
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	39.46	39.46	39.46	39.46	39.46	39.46
<i>Mean right</i>	19.32	19.32	19.32	19.32	19.32	19.32
<i>Bandwidth</i>	43	58.90	49.03	46.53	57.14	60.36
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de las Pre-emergencias en las concentraciones horarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes, día de la semana y hora del día. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

($c+1$). Así, los resultados del impacto de la política si fuese el día consecutivo a la restricción real, indican que tanto Episodios y Pre-emergencia no existe un efecto significativo en ambos contaminantes, al igual que los resultados mostrados anteriormente. Por el contrario, si existe una reducción significativa al 1 % tanto para MP₁₀ como MP_{2,5} con una reducción de 46,3 % y 44,4 % respectivamente. Por ende, efectivamente existe un efecto prolongado en la reducción de material particulado producto de las restricciones en episodios de Emergencias. Lo cual es un beneficio para la salud de la población con una reducción mayor de ambos contaminantes.

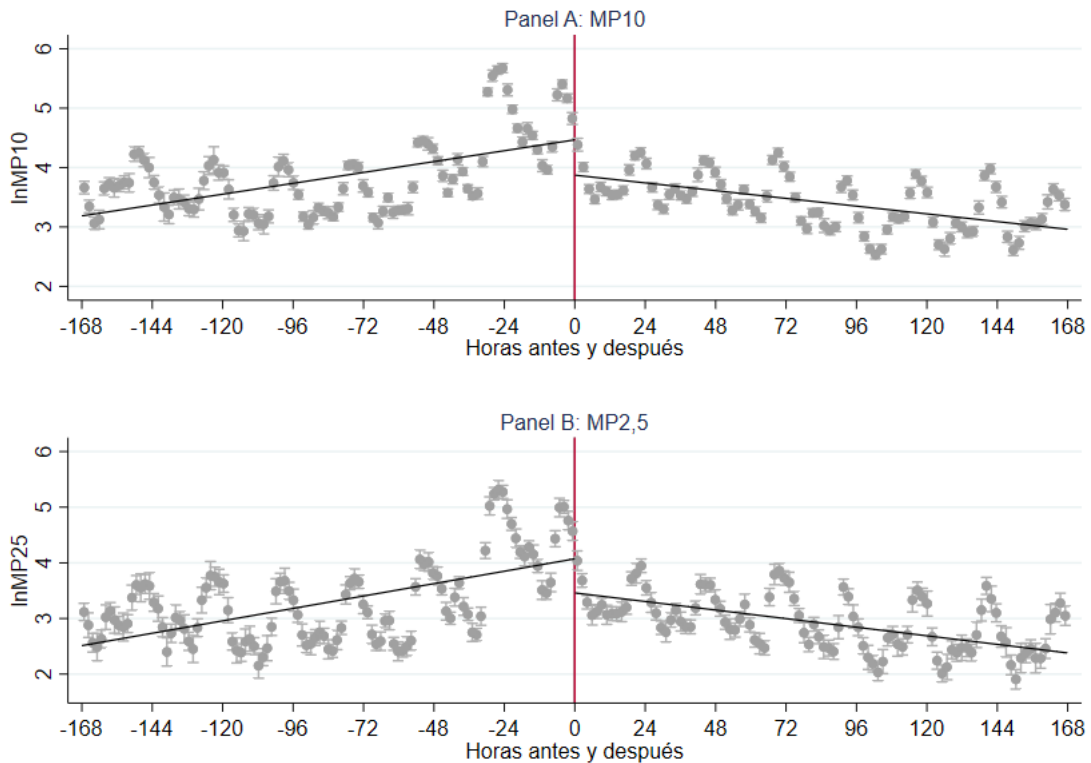


Figura 10: Impacto de emergencias en contaminación atmosférica

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones horarias de material particulado para 7 días antes y después de una Emergencia: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2,5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

7. Análisis de Robustez

7.1. Impacto de Episodios Aislados

Durante el periodo de estudio existen ciertos Episodios Críticos consecutivos, es decir, ya sean Pre-emergencias o Emergencias en dos días seguidos. La Figura 11, muestra el ajuste de las concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2,5}$ 30 días antes y después de un Episodio Crítico (Pre-emergencia y Emergencia), sin considerar episodios continuos. Al igual que la figura 5, no se observa una caída en los niveles de concentraciones de MP_{10} ni $MP_{2,5}$. Lo que sugiere que tampoco tendrían un efecto en la mejora de la calidad del aire.

La Tabla 13 muestra los resultados para la estimación de RDS de la Ecuación (3) de forma análoga a la Tabla 4. Los resultados muestran que al establecer restricciones durante días de Episodios Críticos, no se observan coeficientes estadísticamente significativos en la

Tabla 10: Impacto de Emergencias (Horas) en contaminación atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP ₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Emergencia	-1.011*** (0.107)	-0.488*** (0.0608)	-0.291*** (0.0699)	-1.247*** (0.159)	-0.534*** (0.0764)	-0.154** (0.0728)
Observaciones	6333	6333	6333	6333	6333	6333
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	88.08	88.08	88.08	88.08	88.08	88.08
<i>Mean right</i>	38.54	38.54	38.54	38.54	38.54	38.54
<i>Bandwidth</i>	21.63	36.39	19.27	20.58	48.74	38.97
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Panel B: MP _{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Emergencia	-1.034*** (0.121)	-0.499*** (0.0694)	-0.245*** (0.0719)	-1.413*** (0.152)	-0.491*** (0.0813)	-0.117 (0.0762)
Observaciones	6333	6333	6333	6333	6333	6333
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	70.96	70.96	70.96	70.96	70.96	70.96
<i>Mean right</i>	20.44	20.44	20.44	20.44	20.44	20.44
<i>Bandwidth</i>	20.55	33.27	18.57	27.74	52.36	37.16
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de las emergencias en las concentraciones horarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes, día de la semana y hora del día. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

mayoría de los modelos. Siendo significativos al 10% en el ultimo modelo secundario con función polinómica de segundo orden. Por lo tanto, en general consistentes con los resultados previos.

7.2. Impacto de Alertas

Como se mencionó anteriormente, los episodios de Alerta ambiental no consideran medidas restrictivas para lo hogares, solamente recomendaciones para la salud y uso responsable de la calefacción. Por ende, se espera que estos episodios no tengan efectos sobre las concen-

Tabla 11: Efectos Heterogéneos por hora del día del Impacto de Episodios Críticos: Regresión Discontinua *Sharp*

Hora	Panel A: MP ₁₀			Panel B: MP _{2,5}		
	Episodios	Pre-emergencia	Emergencia	Episodios	Pre-emergencia	Emergencia
0:00 ≤ h < 3:00	-0.0133*** (0.00296)	-0.0123*** (0.00326)	-0.0324*** (0.00511)	-0.0163*** (0.00384)	-0.0186*** (0.00384)	-0.0299*** (0.00758)
3:00 ≤ h < 6:00	-0.00921*** (0.00310)	-0.00837** (0.00345)	-0.0235*** (0.00574)	-0.0133*** (0.00414)	-0.0145*** (0.00400)	-0.0263*** (0.00784)
6:00 ≤ h < 9:00	-0.00425 (0.00308)	-0.00538 (0.00347)	-0.00912 (0.00630)	-0.00479 (0.00412)	-0.00605 (0.00393)	-0.0228*** (0.00843)
9:00 ≤ h < 12:00	-0.00751*** (0.00287)	-0.00889*** (0.00315)	-0.0112** (0.00533)	-0.0145*** (0.00398)	-0.0161*** (0.00357)	-0.0119 (0.00787)
12:00 ≤ h < 15:00	-0.00355 (0.00285)	-0.00339 (0.00314)	-0.00404 (0.00432)	-0.00683* (0.00387)	-0.00652* (0.00366)	-0.0113 (0.00769)
18:00 ≤ h < 21:00	-0.0112*** (0.00231)	-0.0122*** (0.00276)	-0.0114*** (0.00409)	-0.00717* (0.00378)	-0.00901** (0.00369)	-0.00599 (0.00641)
21:00 ≤ h ≤ 23:00	-0.0126*** (0.00230)	-0.0133*** (0.00267)	-0.00935** (0.00396)	-0.0114*** (0.00318)	-0.0130*** (0.00322)	-0.00524 (0.00635)
Constant	6.925*** (0.164)	6.981*** (0.172)	5.017*** (0.337)	4.514*** (0.189)	4.554*** (0.200)	2.205*** (0.418)
Observaciones	22210	21559	6333	22210	21559	6333
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Bandwidth</i>	55.256	53.647	19.270	51.714	49.032	18.570
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	1	1	1

Notas: Esta tabla muestra los efectos heterogéneos por rangos horarios durante el período 2018-2022 del impacto de los Episodios Críticos, Pre emergencias y Emergencias en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes, día de la semana y hora del día. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

traciones de material particulado.

La Figura 12 y la Tabla 14 muestran los resultados para concentraciones diarias de MP₁₀ y MP_{2,5} en días de Alerta. Los resultados, solo presentan coeficientes estadísticamente significativos apenas al 10% en el modelo para de MP_{2,5} con función polinómica de segundo orden con controles y efectos fijos, con un aumento 7,9%. Sin embargo, en general no se aprecian reducciones en los niveles de contaminación en días con Alerta ambiental.

7.3. Estaciones de monitoreo fuera del área de restricción

Como se observa en la Figura 4, en la zona sur oeste de Los Ángeles, se encuentra ubicada a 30 km la ciudad de Nacimiento. Esta comuna, tiene la particularidad de estar en un área

Tabla 12: Impacto de Episodios Críticos rezagados en Contaminación Atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP ₁₀						
	Episodio		Pre-emergencia		Emergencia	
VARIABLES	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀
Episodio Crítico	-0.105 (0.138)	-0.192 (0.149)	-0.0409 (0.119)	-0.109 (0.119)	-0.463*** (0.0108)	-0.575*** (0.0894)
Observaciones	1405	1405	1379	1379	622	622
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Mean left</i>	53.88	53.88	52.69	52.69	52.31	52.31
<i>Mean right</i>	34.89	34.89	34.49	34.49	34.36	34.36
<i>Bandwidth</i>	3.604	6.257	3.807	7.214	4.457	7.459
<i>Order polyn.</i>	1	2	1	2	1	2

Panel B: MP _{2,5}						
	Episodio		Pre-emergencia		Emergencia	
VARIABLES	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}
Episodio Crítico	-0.123 (0.114)	-0.208 (0.138)	-0.0591 (0.0869)	-0.129 (0.0860)	-0.444*** (0.0561)	-0.537*** (0.176)
Observaciones	1413	1413	1387	1387	625	625
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Mean left</i>	40.04	40.04	39.11	39.11	39.83	39.83
<i>Mean right</i>	16.69	16.69	16.17	16.17	16.56	16.56
<i>Bandwidth</i>	3.902	5.724	4.266	7.262	4.187	7.177
<i>Order polyn.</i>	1	2	1	2	1	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto según tipo de los Episodios Críticos rezagados un día (horas) en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

fuera del polígono de restricción y por lo tanto, no afecta a la regulación. Además, cuenta con 2 estaciones de monitoreo de la calidad de aire, aunque con posterior instalación (2019) y por lo tanto, menos cantidad datos respecto a las estaciones de Los Ángeles. Sin embargo, sirven de un escenario contrafactual para medir el efecto de la política en una comuna con características geográficas y climatológicas similares.

De este modo, la Tabla 15 muestra los resultados para la especificación principal en

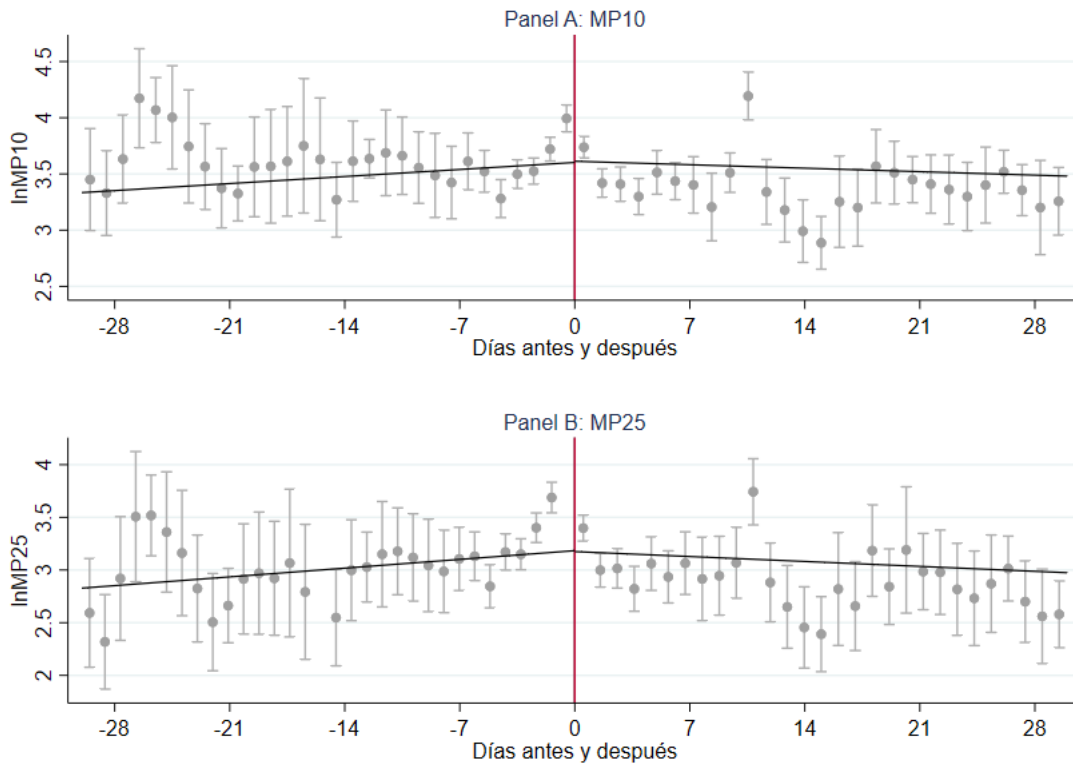


Figura 11: Regresión Discontinua *Sharp* aislado

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones diarias de material particulado para 30 días antes y después de un Episodio Crítico (aislados): Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2.5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

concentraciones diarias de MP_{10} y $MP_{2.5}$ para Episodios (*pooled regression*), Pre-emergencias y Emergencias, utilizando los datos de las estaciones de Nacimiento. Los resultados del impacto de la política fuera del área de restricción por lo tanto, indican que en ninguno de los casos existe un efecto significativo en ambos contaminantes. Por ende, como se esperaría, efectivamente la política no ha sido efectiva en una zona donde no existen restricciones aún.

7.4. Prueba de falsificación

A pesar que los resultados son robustos en signo y magnitud para la estimación de RDS en episodios de Emergencia. Es posible utilizar los datos para realizar una prueba de falsificación. En particular, se asigna arbitrariamente el punto de corte (*cutoff*), utilizando -2,-1 días antes y +1,+2 días después de un episodios de Emergencia respectivamente. Aquí, se espera que este desplazamiento en el punto de corte no genere estimaciones estadísticamente

Tabla 13: Impacto de Episodios Críticos Aislados en contaminación atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP ₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	0.133 (0.409)	0.125 (0.441)	-0.131 (0.0966)	0.0354 (0.401)	-0.00378 (0.453)	-0.204* (0.116)
Observaciones	1363	1363	1363	1363	1363	1363
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	47.66	47.66	47.66	47.66	47.66	47.66
<i>Mean right</i>	36.09	36.09	36.09	36.09	36.09	36.09
<i>Bandwidth</i>	12.13	9.595	3.163	12.56	10.09	5.482
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Panel B: MP _{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Episodio Crítico	0.132 (0.667)	0.117 (0.702)	-0.155 (0.120)	0.0458 (0.602)	0.0472 (0.659)	-0.232* (0.122)
Observaciones	1371	1371	1371	1371	1371	1371
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33	34.33
<i>Mean right</i>	17.89	17.89	17.89	17.89	17.89	17.89
<i>Bandwidth</i>	13.12	11.86	2.972	11.10	11.28	4.779
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de los Episodios Críticos aislados en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

significativas.

La Tabla 16 presenta los resultados de estas estimaciones, donde se confirma la pertinencia del método utilizado, al no existir coeficientes estadísticamente significativos para ambos contaminantes.

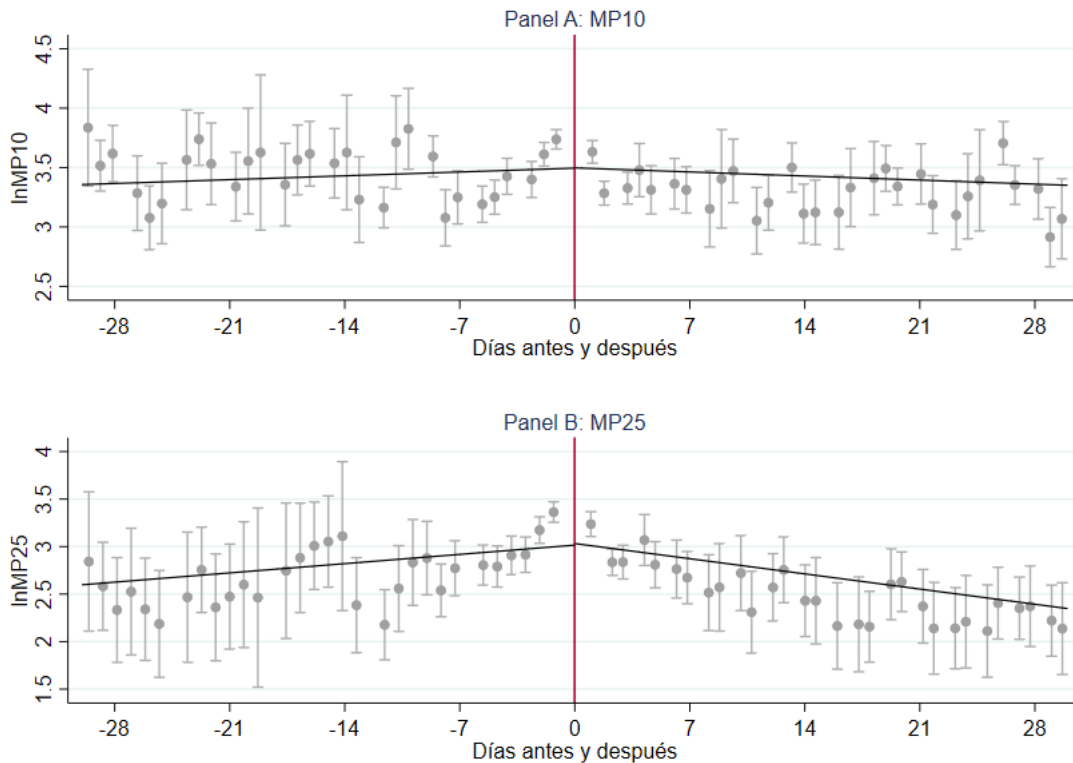


Figura 12: Regresión Discontinua *Sharp* alerta

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las concentraciones diarias de material particulado para 30 días antes y después de un Episodio Crítico de alerta: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para MP_{10} . Panel B muestra los resultados para $MP_{2.5}$. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cúbico. Elaboración propia en base a datos del SINCA.

8. Conclusiones

Este estudio evalúa el impacto a corto plazo que tiene las restricciones de uso de leña del Programa de Gestión de Episodios Críticos, establecido en el Plan de Descontaminación Atmosférica en la ciudad de Los Ángeles, sobre los niveles de material particulado fino y grueso durante el período de invierno.

Utilizando un análisis de Regresión Discontinua *Sharp*, los resultados muestran una reducción significativa tanto de las concentraciones diarias como horarias de MP_{10} y $MP_{2.5}$ para los episodios de Emergencia. Esto indica que las restricciones de uso de leña en estos casos contribuyen de forma relevante para mejorar la calidad del aire en el corto plazo. Estas reducciones se observan principalmente durante el primer año de implementación y durante el último del estudio (2022), además se producen mayormente en las horas de noche y madrugada.

Tabla 14: Impacto de de Alertas en contaminación atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Alerta	0.175 (0.321)	0.0307 (0.360)	0.0259 (0.0502)	0.185 (0.345)	-0.0238 (0.352)	0.0449 (0.0545)
Observaciones	1379	1379	1379	1379	1379	1379
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06
<i>Mean right</i>	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47	35.47
<i>Bandwidth</i>	7.395	8.394	2.131	8.836	11.60	6.289
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2
Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Alerta	0.227 (0.636)	0.0835 (0.698)	0.0327 (0.0279)	0.166 (0.616)	0.0572 (0.671)	0.0796* (0.0484)
Observaciones	1390	1390	1390	1390	1390	1390
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Efectos Fijos Estación	NO	NO	SI	NO	NO	SI
Efectos Fijos Tiempo	NO	NO	SI	NO	NO	SI
<i>Mean left</i>	23.34	23.34	23.34	23.34	23.34	23.34
<i>Mean right</i>	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09	17.09
<i>Bandwidth</i>	16.54	20.18	4.382	12.37	13.44	5.482
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	2	2	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de las alertas en las concentraciones promedio diarias de material particulado. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calónico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

No obstante lo anterior, para el análisis de los Episodios de Pre-emergencias, no existen reducciones de las concentraciones de ambos contaminantes. Lo cual indica, que el programa no ha sido efectivo en para estos episodios, donde las restricciones solo se encuentran focalizadas durante la tarde-noche de estos días.

Es importante mencionar que las concentraciones de material particulado tienden a ser más altas en los días previos a las Emergencias. Y, puede que sin la presencia de las restricciones naturalmente tiendan a disminuir en los días siguientes (la regresión a la media podría explicar parte de esa reducción). De todos modos, si bien es mas probable que suceda en el

Tabla 15: Impacto de Episodios Críticos en contaminación atmosférica para Nacimiento: Regresión Discontinua *Sharp*

Panel A: MP₁₀						
VARIABLES	Episodios		Pre-emergencia		Emergencia	
	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀
Episodio Crítico	0.00588 (0.0743)	0.0253 (0.0925)	0.00925 (0.0814)	0.113 (0.0843)	-0.280 (0.206)	-0.410 (0.280)
Observaciones	1022	1022	1011	1011	498	498
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Mean left</i>	64.90	64.90	64.56	64.56	82.84	82.84
<i>Mean right</i>	43.38	43.38	43.44	43.44	43.56	43.56
<i>Bandwidth</i>	6.395	6.797	7.412	5.363	2.898	5.837
<i>Order polyn.</i>	1	2	1	2	1	2

Panel B: MP_{2,5}						
VARIABLES	Episodio		Pre-emergencia		Emergencia	
	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}
Episodio Crítico	-0.0233 (0.0709)	-0.00196 (0.0844)	-0.0186 (0.0731)	0.0447 (0.0786)	-0.200 (0.240)	-0.345 (0.287)
Observaciones	1021	1021	1010	1010	497	497
Controles	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>Mean left</i>	57.78	57.78	57.67	57.67	69.53	69.53
<i>Mean right</i>	28.61	28.61	28.60	28.60	30.17	30.17
<i>Bandwidth</i>	6.265	6.641	6.794	7.863	4.262	7.412
<i>Order polyn.</i>	1	2	1	2	1	2

Notas: Esta tabla muestra el impacto de los Episodios Críticos, Pre-emergencias y emergencias en las concentraciones promedio diarias de material particulado para la comuna de Nacimiento. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes y día de la semana. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

caso del análisis diario, el ejercicio de robustez para la comuna de Nacimiento muestra que no existen caídas en los Episodios Críticos. Así, es más plausible que las reducciones sean causada por las restricciones mismas, en lugar de factores aleatorios o tendencias naturales.

Por otro lado, es importante señalar que los niveles de contaminación exceden las re-

Tabla 16: Impacto de emergencias en contaminación atmosférica: Regresión Discontinua *Sharp* utilizando *cutoff* arbitrarios

Panel A: MP₁₀				
VARIABLES	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀	lnMP ₁₀
Emergencia	-0.280 (0.236)	0.149 (0.201)	0.248 (0.166)	-0.0347 (0.162)
Observaciones	6364	6364	6364	6364
Controles	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI
<i>Bandwidth</i>	26.14	30.32	26.66	40.31
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	1
<i>Cutoff</i>	-48	-24	24	48
Panel B: MP_{2,5}				
VARIABLES	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}	lnMP _{2,5}
Emergencia	-0.233 (0.250)	-0.112 (0.298)	0.00849 (0.0459)	0.0115 (0.146)
Observaciones	6379	6379	6379	6379
Controles	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Estación	SI	SI	SI	SI
Efectos Fijos Tiempo	SI	SI	SI	SI
<i>Bandwidth</i>	27.81	26.13	27.50	37.49
<i>Order polyn.</i>	1	1	1	1
<i>Cutoff</i>	-48	-24	24	48

Notas: Esta tabla muestra el impacto de las emergencias en las concentraciones horarias de material particulado utilizando diferentes *cutoff*. Panel A muestra los resultados para MP₁₀. Panel B muestra los resultados para MP_{2,5}. Las regresiones incluyen controles meteorológicos (temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) y efectos fijos por estación de monitoreo, año, mes, día de la semana y hora del día. Ancho de banda óptimo utilizando minimización de MSE (Calonico *et al.*, 2014). Errores estándar ajustados para clusters en estaciones en paréntesis. Niveles de significancia: *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1. Material particulado está medido como el logaritmo naturales de las concentraciones en microgramos por metro cubico.

comendaciones internacionales y nacionales, especialmente en las horas y días previos a un Episodio Crítico. Como consecuencia, la población se encuentra igualmente expuesta a niveles de contaminación que no son adecuados para la salud.

Como sugerencia de política pública, se recomienda realizar un análisis costo-beneficio exhaustivo para evaluar la eficiencia del PGEC, considerando los impactos negativos de la exposición temprana a la contaminación en la salud, y el desarrollo de los niños, particularmente en rendimiento escolar (Miller y Vela, 2013; Bharadwaj *et al.*, 2017) y desarrollo cognitivo (Sanders, 2012; Zhang *et al.*, 2018a). Es importante tener en cuenta que estos efectos podrían traducirse en niveles más bajos de capital humano y, como consecuencia, salarios

futuros más bajos.

Además, se destaca la importancia de reducir el uso de leña y promover alternativas de calefacción más limpias en los hogares. En ese sentido, es crucial priorizar el programa de recambio de calefactores como parte integral del PDA y subsidios a los combustibles alternativos. De modo que la población no vea afectada su confort térmico, y en consecuencia, endurecer las prohibiciones para quienes continúen utilizando artefactos a leña. Es decir, aumentar la ventana horaria de restricciones durante episodios de Pre-emergencia y, además incorporar medidas parciales de prohibición en horas crítica en episodios de Alerta para impedir pasar a un episodio peor.

Este estudio se puede mejorar en varios frentes. Primero, es importante considerar la posible presencia de una estructura temporal en los datos, lo cual podría generar autocorrelación en los errores. Por ello, estimaciones futuras podrían utilizar el estimador *Newey-West* (Newey y West, 1986), que ajusta la matriz de covarianza de los errores para tener en cuenta esta correlación estimada. De esta manera, se obtendrán estimaciones más precisas y confiables. Segundo, el análisis de RDS asume un ajuste lineal, el cuál puede ser considerado rígido. Extensiones de este trabajo podrían explorar diferentes formas funcionales y técnicas flexibles que permitan modelar la relación en ambos lados del umbral de manera más precisa. Esto podría ampliar la capacidad del modelo para capturar la complejidad de la relación y mejorar la interpretación de los resultados obtenidos. Finalmente, y en cuanto al posible fenómeno de regresión a la media, se sugiere implementar otro método de estimación, como el enfoque de diferencias en diferencias, utilizando un grupo de control sin restricciones y en condiciones similares para comparar si la reducción en los días con restricciones es mayor de lo esperado debido a la regresión a la media.

Referencias

- Almonacid, G. T. V. (2013). Distribución temporal de la contaminación atmosférica (MP10 y MP2,5) entre 2010 y 2012 y sus consecuencias en la salud de los habitantes de la comuna de Valdivia,(Región de Los Ríos, Chile). Tesis de máster, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile.
- Bel, G. y Holst, M. (2018). *Evaluation of the impact of bus rapid transit on air pollution in Mexico City. Transport Policy*, 63:209–220.
- Bharadwaj, P., Gibson, M., Zivin, J. G., y Neilson, C. (2017). *Gray matters: Fetal pollution exposure and human capital formation. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(2):505–542.

- Cakmak, S., Dales, R. E., y Vidal, C. B. (2010). *Air pollution and hospitalization for epilepsy in Chile. Environment international*, 36(6):501–505.
- Calfucura, E. y Montero, R. (2013). Programas de descontaminación y calidad del aire en América Latina: Una evaluación ex-post para el caso de Santiago de Chile. Technical report, Facultad de Economía y Empresa, Universidad Diego Portales.
- Calonico, S., Cattaneo, M. D., y Titiunik, R. (2014). *Robust data-driven inference in the regression-discontinuity design. The Stata Journal*, 14(4):909–946.
- Calzada, J. y Sanz, A. (2018). *Universal access to clean cookstoves: Evaluation of a public program in Perú. Energy policy*, 118:559–572.
- Carrasco Vidal, R., Jiménez del Río, J., y Mardones Poblete, C. (2016). Análisis costo-beneficio de la calefacción distrital en la zona central de Chile. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(1):35–45.
- Chay, K. y Greenstone, M. (2003). *Air quality, infant mortality, and the Clean Air Act of 1970. National Bureau of Economic Research*.
- Chen, Y., Jin, G. Z., Kumar, N., y Shi, G. (2013). *The promise of Beijing: Evaluating the impact of the 2008 Olympic Games on air quality. Journal of Environmental Economics and Management*, 66(3):424–443.
- Clements, N., Hannigan, M. P., Miller, S. L., Peel, J. L., y Milford, J. B. (2016). *Comparisons of urban and rural PM 10- 2.5 and PM 2.5 mass concentrations and semi-volatile fractions in northeastern Colorado. Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11):7469–7484.
- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodriguez, M., y Crane, D. E. (2008). *Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile’s policy of using urban forests to improve air quality. Journal of environmental management*, 86(1):148–157.
- Fuller, G. W., Tremper, A. H., Baker, T. D., Yttri, K. E., y Butterfield, D. (2014). *Contribution of wood burning to PM10 in London. Atmospheric environment*, 87:87–94.
- Giovanis, E. (2015). *Evaluation of the ‘Clean Air Works’ program on actual ozone concentrations: a case study in North Carolina. International Journal of Environmental Technology and Management*, 18(5-6):465–477.
- Gómez, W., Salgado, H., Vásquez, F., y Chávez, C. (2014). *Using stated preference methods to design cost-effective subsidy programs to induce technology adoption: an application to a stove program in southern Chile. Journal of Environmental Management*, 132:346–357.

- Greenstone, M. (2004). *Did the Clean Air Act cause the remarkable decline in sulfur dioxide concentrations?* *Journal of environmental economics and management*, 47(3):585–611.
- Hausman, C. y Rapson, D. S. (2018). *Regression Discontinuity in time: Considerations for empirical applications.* *Annual Review of Resource Economics*, 10:533–552.
- Hellén, H., Hakola, H., Haaparanta, S., Pietarila, H., y Kauhaniemi, M. (2008). *Influence of residential wood combustion on local air quality.* *Science of the total environment*, 393(2-3):283–290.
- Huang, J., Pan, X., Guo, X., y Li, G. (2018). *Impacts of air pollution wave on years of life lost: A crucial way to communicate the health risks of air pollution to the public.* *Environment international*, 113:42–49.
- Imbens, G. W. y Lemieux, T. (2008). *Regression discontinuity designs: A guide to practice.* *Journal of econometrics*, 142(2):615–635.
- Jorquera, H., Barraza, F., Heyer, J., Valdivia, G., Schiappacasse, L. N., y Montoya, L. D. (2018). *Indoor PM_{2.5} in an urban zone with heavy wood smoke pollution: The case of Temuco, Chile.* *Environmental Pollution*, 236:477–487.
- Khaniabadi, Y. O., Sicard, P., Takdastan, A., Hopke, P. K., Taiwo, A. M., Khaniabadi, F. O., De Marco, A., y Daryanoosh, M. (2019). *Mortality and morbidity due to ambient air pollution in Iran.* *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(2):222–227.
- Kim, Y., Knowles, S., Manley, J., y Radoias, V. (2017). *Long-run health consequences of air pollution: Evidence from Indonesia’s forest fires of 1997.* *Economics & Human Biology*, 26:186–198.
- Lee, D. S. (2008). *Randomized experiments from non-random selection in US House elections.* *Journal of Econometrics*, 142(2):675–697.
- Lee, D. S. y Lemieux, T. (2010). *Regression discontinuity designs in economics.* *Journal of economic literature*, 48(2):281–355.
- Lepeule, J., Litonjua, A. A., Gasparri, A., Koutrakis, P., Sparrow, D., Vokonas, P. S., y Schwartz, J. (2018). *Lung function association with outdoor temperature and relative humidity and its interaction with air pollution in the elderly.* *Environmental research*, 165:110–117.

- Li, X., Qiao, Y., Zhu, J., Shi, L., y Wang, Y. (2017). *The “APEC blue” endeavor: Causal effects of air pollution regulation on air quality in China. Journal of cleaner production*, 168:1381–1388.
- Lyu, R., Zhang, J., Xu, M., y Li, J. (2018). *Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in Northern Ningxia, China. Land Use Policy*, 77:163–173.
- Maji, S., Ahmed, S., Siddiqui, W. A., y Ghosh, S. (2017). *Short term effects of criteria air pollutants on daily mortality in Delhi, India. Atmospheric Environment*, 150:210–219.
- Mannucci, P. M., Harari, S., Martinelli, I., y Franchini, M. (2015). *Effects on health of air pollution: a narrative review. Internal and emergency medicine*, 10(6):657–662.
- Mardones, C. y Cornejo, N. (2020). *Ex-post evaluation of a program to reduce critical episodes due to air pollution in southern Chile. Environmental Impact Assessment Review*, 80:106334.
- Mardones, C., Saavedra, A., y Jiménez, J. (2015). Cuantificación económica de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación por mp10 en Concepción Metropolitano, Chile. *Revista médica de Chile*, 143(4):475–483.
- McCrary, J. (2008). *Manipulation of the running variable in the regression discontinuity design: A density test. Journal of econometrics*, 142(2):698–714.
- Miller, S. y Vela, M. (2013). *The effects of air pollution on educational outcomes: evidence from Chile.*
- Ministerio del Medio Ambiente, C. (2015). DS-11-2015 ”Declara-zona-saturada por MP25 y por MP10 ambas como concentración diaria a la comuna de Los Ángeles.
- Ministerio del Medio Ambiente, C. (2019). Plan de Descontaminación Atmosférica para la comuna de Los Ángeles.
- Mullins, J. y Bharadwaj, P. (2015). *Effects of Short-Term Measures to Curb Air Pollution: Evidence from Santiago, Chile. American Journal of Agricultural Economics*, 97(4):1107–1134.
- Newey, W. K. y West, K. D. (1986). *A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelationconsistent covariance matrix.*

- O’Ryan, R. y Sánchez, J. M. (2008). *Comparison of net benefits of incentive-based and command and control environmental regulations: The case of Santiago, Chile. The World Bank Economic Review*, 22(2):249–269.
- Plejdrup, M. S., Nielsen, O.-K., y Brandt, J. (2016). *Spatial emission modelling for residential wood combustion in Denmark. Atmospheric environment*, 144:389–396.
- Prieto-Parra, L., Yohannessen, K., Brea, C., Vidal, D., Ubilla, C. A., y Ruiz-Rudolph, P. (2017). *Air pollution, PM_{2.5} composition, source factors, and respiratory symptoms in asthmatic and nonasthmatic children in Santiago, Chile. Environment international*, 101:190–200.
- Reyes, R., Nelson, H., Navarro, F., y Retes, C. (2015). *The firewood dilemma: Human health in a broader context of well-being in Chile. Energy for Sustainable Development*, 28:75–87.
- Ruiz-Rudolph, P., Arias, N., Pardo, S., Meyer, M., Mesías, S., Galleguillos, C., Schiattino, I., y Gutiérrez, L. (2016). *Impact of large industrial emission sources on mortality and morbidity in Chile: A small-areas study. Environment international*, 92:130–138.
- Saide, P. E., Mena-Carrasco, M., Tolvett, S., Hernandez, P., y Carmichael, G. R. (2016). *Air quality forecasting for winter-time PM_{2.5} episodes occurring in multiple cities in central and southern Chile. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1):558–575.
- Samburova, V., Connolly, J., Gyawali, M., Yatavelli, R. L., Watts, A. C., Chakrabarty, R. K., Zielinska, B., Moosmüller, H., y Khlystov, A. (2016). *Polycyclic aromatic hydrocarbons in biomass-burning emissions and their contribution to light absorption and aerosol toxicity. Science of the Total Environment*, 568:391–401.
- Sanders, N. J. (2012). *What doesn’t kill you makes you weaker prenatal pollution exposure and educational outcomes. Journal of Human Resources*, 47(3):826–850.
- Sanhueza, P., Vargas, C., y Mellado, P. (2006). *Impacto de la contaminación del aire por MP₁₀ sobre la mortalidad diaria en Temuco. Revista médica de Chile*, 134(6):754–761.
- Schueftan, A. y González, A. D. (2015). *Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. Energy Policy*, 79:48–57.
- Schueftan, A., Sommerhoff, J., y González, A. D. (2016). *Firewood demand and energy policy in south-central Chile. Energy for Sustainable Development*, 33:26–35.
- SEREMI del Medio Ambiente, R. d. B. B. (2020). *Plan operacional para la gestión de episodios críticos en el marco del Plan de Descontaminación Atmosférica de Los Ángeles.*

- Shahadin, M. S., Mutalib, N. S. A., Latif, M. T., Greene, C. M., y Hassan, T. (2018). *Challenges and future direction of molecular research in air pollution-related lung cancers. Lung Cancer*, 118:69–75.
- Song, C., Wu, L., Xie, Y., He, J., Chen, X., Wang, T., Lin, Y., Jin, T., Wang, A., y Liu, Y. (2017). *Air pollution in China: status and spatiotemporal variations. Environmental pollution*, 227:334–347.
- World Health Organization, e. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*.
- Toro, Richard and Canales, Mauricio and Gonzalez-Rojas, Claudio and others (2014). *Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. Building and Environment*, 79:115–123.
- Troncoso, R., de Grange, L., y Cifuentes, L. A. (2012). *Effects of environmental alerts and pre-emergencies on pollutant concentrations in Santiago, Chile. Atmospheric Environment*, 61:550–557.
- Venegas, L. E., Mazzeo, N. A., y Dezzutti, M. C. (2014). *A simple model for calculating air pollution within street canyons. Atmospheric Environment*, 87:77–86.
- Zhang, X., Chen, X., y Zhang, X. (2018a). *The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(37):9193–9197.
- Zhang, Y., Qu, S., Zhao, J., Zhu, G., Zhang, Y., Lu, X., Sabel, C. E., y Wang, H. (2018b). *Quantifying regional consumption-based health impacts attributable to ambient air pollution in China. Environment international*, 112:100–106.
- Zheng, G., Duan, F., Su, H., Ma, Y., Cheng, Y., Zheng, B., Zhang, Q., Huang, T., Kimoto, T., y Chang, D. (2015). *Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions. Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(6):2969–2983.

Anexos

A. Características Geográficas y Meteorológicas de Los Ángeles

En el aspecto geográfico ([Ministerio del Medio Ambiente, 2019](#)), la comuna de Los Ángeles se emplaza en la depresión intermedia, entre la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa, al Este y al Oeste, respectivamente. La Cordillera de los Andes en esta zona posee alturas sobre los 2.000 m.s.n.m.⁷ y está conformada por relieves glaciares y volcánicos. Los valles glaciares se encuentran actualmente ocupados por cuerpos de agua, como el Valle del Lago Laja, y por la actual red de drenaje, delimitando las principales cuencas hidrográficas.

Meteorológicamente ([Ministerio del Medio Ambiente, 2019](#)), la comuna de Los Ángeles se caracteriza por un clima templado cálido con estación seca prolongada con temperaturas inferiores a 18 °C y superiores a 3 °C en el mes más frío. Las precipitaciones aumentan de norte a sur de 800 a 1.200 mm aproximadamente. La humedad es moderada y aumenta hacia el sur de 66 a 74 %. Las temperaturas medias son de 14 °C a 13 °C y una amplitud térmica elevada de 12,8 °C a 12,4 °C. Durante los meses de verano las temperaturas medias fluctúan entre 18 °C y 20,6 °C; en invierno alcanzan los 8,2 °C. La intensidad de las precipitaciones mayores o iguales a 10 mm diarios alcanza a 42 días al igual que las precipitaciones mayores o iguales a 50 mm. Por otra parte, los valores absolutos de precipitaciones mensuales más elevados, se registran en el mes de junio y alcanzan a 546 mm³. Respecto a la temperatura, existe clara estacionalidad presentando las menores temperaturas para los meses de mayo a agosto.

La Tabla [A1](#) presenta la estadística descriptiva de las variables meteorológicas disponibles en la base de datos.

⁷Metros sobre nivel del mar

Tabla A1: Estadística descriptiva de las variables meteorológicas

Panel A: Totales					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
Vel. Viento	77907	2.24	1.42	.003	10.449
Temperatura	83604	13.62	6.87	-4.92	39.27
Humedad Rel.	83604	71.34	22.18	6.956	100
Panel B: Días Previos a Episodios de Emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
Vel. Viento	624	0.85	0.78	.0122	5.732
Temperatura	912	5.79	5.07	-3.28	21.90
Humedad Rel.	912	86.35	14.59	30.17	100
Panel C: Días con Episodios de Emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
Vel. Viento	624	1.27	0.95	.049	6.429
Temperatura	912	6.31	3.77	-2.848	16.39
Humedad Rel.	912	89.27	10.69	54.16	100
Panel D: Días Previos a Episodios de Pre-emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
Vel. Viento	3942	1.49	1.38	.012	10.449
Temperatura	4782	7.73	4.53	-3.98	23.35
Humedad Rel.	4782	84.09	15.77	22.29	100
Panel E: Días con Episodios de Pre-emergencia					
Variable	<i>Obs</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	Min	Max
Vel. Viento	3945	1.13	0.94	.006	7.039
Temperatura	4785	7.78	4.66	-4.92	22.35
Humedad Rel.	4785	84.75	15.41	24.76	100

Notas: Esta tabla muestra estadísticas descriptivas de las variables meteorológicas en frecuencia horaria entre 2018-2022. Panel A muestra datos de todo el periodo de las variables. Panel B muestra datos de las variables durante días previos a un Episodio de Emergencia. Panel C muestra datos durante un Episodio de Emergencias. vent: velocidad del viento en metros por segundo (m/s), temp: temperatura en grados Celsius(°C) , hum: humedad relativa en porcentaje (%). Elaboración propia en base a datos del SINCA.

B. Detalle medidas PDA Los Ángeles

Las medidas a implementar por el Plan de Descontaminación Atmosférica de Los Ángeles (Ministerio del Medio Ambiente, 2019), son:

a) Uso y mejoramiento de la calidad de la leña

La calidad de la leña utilizada para la calefacción y en particular su contenido de humedad influye de manera importante sobre el nivel de emisiones generado. Las regulaciones implementadas indican que toda la leña que sea comercializada en la zona saturada deberá cumplir los requerimientos técnicos de acuerdo a la especificación de "leña seca". Definida

por el Ministerio del Medio Ambiente como aquella que tiene un contenido de humedad menor o igual a 25 % en base seca.

b) Uso y mejoramiento de artefactos

La Seremi del Medio Ambiente, diseñará y ejecutará anualmente un programa de recambio voluntario de calefactores o cocinas que combustionen leña, para lo cual procurará financiamiento sectorial y/o del Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR). El programa contemplará un recambio de al menos 22.000 equipos que combustionen leña en la zona saturada, en un plazo de ocho años.

c) Mejoramiento de la eficiencia térmica de las viviendas

La Seremi de Vivienda y Urbanismo, focalizará en la comuna de Los Ángeles, la entrega gradual de 20.000 subsidios especiales para el Acondicionamiento Térmico de viviendas existentes, dentro del plazo de 10 años, en el marco del Programa de Protección del Patrimonio Familiar (PPPF).

d) Control de emisiones asociadas a quemas

Se prohíbe en la zona saturada, durante todo el año, quemar neumáticos, hojas secas, ramas y/o todo tipo de residuos al aire libre, en la vía pública o recintos privados. La fiscalización y sanción de esta medida corresponderá al Ministerio de Agricultura, a través de la Corporación Nacional Forestal (Conaf) y del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

e) Control de emisiones de fuentes fijas

Las calderas nuevas, con una potencia térmica nominal menor a 75 kWt, deberán cumplir con un límite máximo de emisión de material particulado y eficiencia.

f) Control de emisiones asociadas a fuentes móviles

La Seremi de Transportes y Telecomunicaciones deberá incorporar en las medidas de ordenamiento, gestión y mejoras tecnológicas del transporte público de la comuna de la

zona saturada, exigencias orientadas a reducir las emisiones de MP y NOx provenientes del sistema de transporte público en un 6 % y 20 % respectivamente.

g) Compensación de emisiones

Todos aquellos proyectos o actividades, incluidas sus modificaciones, que se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, que generen directa o indirectamente emisiones respecto de su situación base, iguales o superiores a 1 ton/año de MP. Deberán compensar sus emisiones en un 120 % del monto total anual de las emisiones de la actividad o proyecto.

h) Gestión de Episodios Críticos de contaminación

La Seremi del Medio Ambiente desarrollará un Plan Operacional de Gestión de Episodios Críticos. El objetivo es enfrentar los episodios de MP_{2,50} y/o MP₁₀, que se presenten en la zona saturada, de forma de proteger la salud de la población a través de acciones coordinadas entre los distintos servicios públicos. Pudiendo disminuir o evitar las situaciones de riesgo como consecuencia de una exposición a niveles de concentraciones elevadas de material particulado respirable.

i) Programa de difusión y educación

La Seremi del Medio Ambiente, con apoyo del Gobierno Regional y servicios competentes, según corresponda, realizarán el diseño, desarrollo, implementación y difusión de programas, integrados en los Planes Comunales de Educación para el Desarrollo Sustentable.

C. Supuestos metodológicos

C.1. Prueba de manipulación

Una condición fundamental en la estimación de un modelo RD es que la variable asignación no sea manipulable. Si así fuera, las unidades de observación podrían elegir su posición

con respecto al punto de corte para influenciar recibir o no un tratamiento por ejemplo. (McCrary, 2008) propuso mirar la densidad de observaciones de la variable de asignación. Si se observa una fuerte discontinuidad en la densidad a nivel del umbral de tratamiento (punto de corte), entonces podemos pensar que los agentes fueron capaces de manipular su situación frente al tratamiento.

Sin embargo, como indican (Hausman y Rapson, 2018), a pesar de ser un estándar en diseños de RD transversales. No es aplicable cuando el tiempo es la variable de asignación, dado que en este caso la densidad de la variable sigue una distribución uniforme a lo largo de la discontinuidad. Por lo tanto, la prueba se vuelve irrelevante.

C.1.1. Continuidad de variables observables

Otras de las condiciones para el modelo, es que el comportamiento de otras características diferentes al tratamiento deberían ser continuos alrededor del punto de corte. Es decir, corroborar que lo único que cambia alrededor de este punto es la probabilidad de ser tratado.

Por lo tanto, al observar las variables de control utilizadas, en general, se debería encontrar continuidad, es decir, no debería existir un cambio abrupto en el nivel de ninguno de los controles en la discontinuidad.

La Figura A1 presenta la estimación por el método de RD de las variables temperatura y humedad relativa durante episodios de restricción. Como se observa, no se aprecia un salto o discontinuidad abrupta antes y después del puntaje de corte.

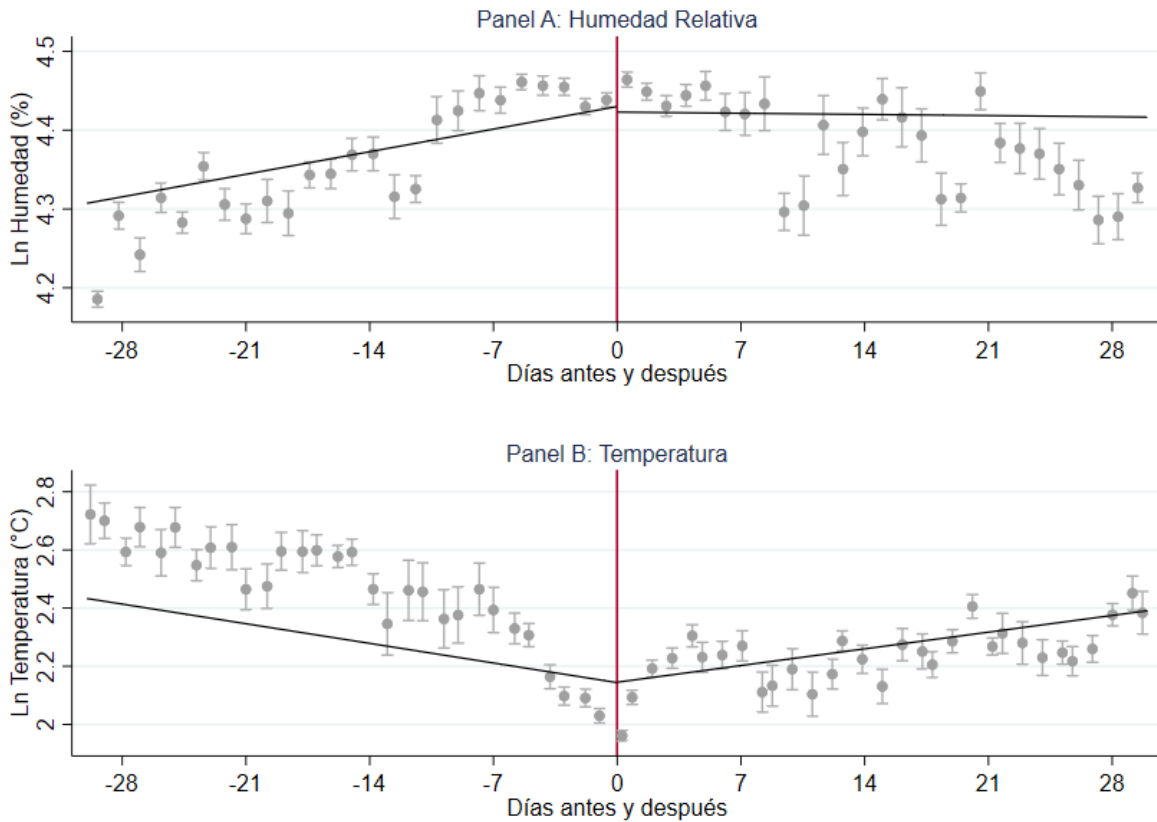


Figura A1: Continuidad Variables de Control

Notas: Esta figura muestra el efecto de las restricciones en las variables de control temperatura y humedad relativa para 30 días antes y después de un Episodio Crítico: Resultado de una RDS. Panel A muestra los resultados para la humedad relativa temperatura. Panel B muestra los resultados para temperatura. Temperatura y humedad están medido como el logaritmo naturales de los grados Celsius y porcentaje humedad respectivamente. Elaboración propia en base a datos del SINCA.