

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C



CAMBIO CLIMÁTICO, LA PENALIDAD DEL OZONO Y LA MORTALIDAD
ASOCIADA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN ECONOMÍA

PRESENTA

ANDRÉS DEL RÍO CAMARGO

DIRECTOR DE LA TESINA: DR. RUBÉN IRVIN ROJAS VALDÉS

CIUDAD DE MÉXICO

2020

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por apoyarme en cualquier momento y por su amor incondicional. A mi papá por siempre motivarme a hacer lo que me apasiona. A mi mamá por mostrarme que siempre puedes crear tus propios medios para ser feliz. A mi hermana y hermano por su compañía y empatía.

Gracias a mis mejores amigos por acompañarme en este pedazo de mi vida. A Fer y Ana por siempre ser sensatas y honestas conmigo y por darme un espacio seguro para hablar de cualquier cosa; me han ayudado a crecer muchísimo. A Lu por siempre estar presente sin importar la distancia. A Rebeca por enseñarme tanto y por toda la felicidad que me has dado.

Gracias a mis profesores. A mi asesor, Irvin Rojas, por guiarme en este último esfuerzo de la carrera. A mis lectores, David Heres y John Scott por aconsejarme.

RESUMEN

El cambio climático ha afectado los procesos de producción y acumulación del ozono troposférico—i.e. al nivel del suelo. En específico, el aumento de temperaturas ha sido uno de los medios por el cual el cambio climático ha tenido un impacto sobre este contaminante del aire. Este medio, conocido como la penalidad climática sobre el ozono, es el enfoque de este trabajo de investigación en el cual se cuantifica su efecto sobre las tasas de mortalidad diaria en municipios de la Zona Metropolitana del Valle de México. En esta investigación es demostrado que sí existe una penalidad sobre el ozono troposférico y que este contaminante del aire afecta negativamente la salud de las personas. Particularmente, los resultados demuestran que los adultos mayores de 60 años son la población más vulnerable a aumentos de ozono troposférico. Aunado a esto, otro hallazgo relevante es que la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares es la más afectada por este contaminante. Estos resultados destacan la importancia de considerar los efectos del cambio climático al estimar el impacto de la contaminación del aire en la salud.

Contenidos

1. Introducción.....	1
2. Literatura previa.....	3
3. Datos.....	7
4. Metodología.....	9
5. Resultados.....	11
6. Discusión.....	16
7. Conclusión.....	19
8. Bibliografía.....	21
9. Apéndice.....	23

Tablas

Tabla 1. Efecto de la multa climática en el ozono.....	12
Tabla 2. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad (MCO).....	13
Tabla 3. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad.....	14
Tabla 4. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupos de edad.....	15
Tabla 5. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por causa de defunción.....	15
Tabla 6. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupo de edad y causa de defunción.....	16
Tabla 7. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupo de edad y causa de defunción.....	16
Apéndice 1. Monitores de SEDEMA disponibles por año.....	23

1. Introducción

En los últimos 50 años, el aumento en la formación de contaminantes y gases invernadero ha propiciado el alza de temperaturas y el cambio climático. Aunado a esto, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, en inglés) reportó en 2019 que la temperatura global ha aumentado a una tasa promedio de 0.07°C por década desde 1880 y a una tasa de 0.18°C desde 1981¹. Este aumento de temperatura ha sido acompañado con la degradación de la calidad del aire en distintas partes del mundo. Esto ha tenido repercusiones en la salud de las personas y en la mortalidad. En particular, la Organización Mundial de la Salud (OMS) reportó que mueren alrededor de 4.2 millones de personas al año debido a contaminación en el exterior².

Una parte de la literatura—en diversas áreas de estudios—ha analizado el efecto de los contaminantes del aire en la salud (Currie, 2014) y en la mortalidad (Gryparis et al., 2004; Filleul et al., 2006). En específico, se han investigado los efectos del ozono (O_3) al nivel del suelo en la salud. El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno y su relevancia se debe a sus efectos negativos en las vías respiratorias de las personas—por exposición de corto y largo plazo. El ozono se forma al nivel del suelo (ozono troposférico) cuando se activan reacciones en presencia de energía solar entre compuestos orgánicos de alta volatilidad (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x)³. Algunas de las fuentes más importantes de COV y NO_x son las emisiones de vehículos e industrias, aerosoles, aromatizantes, entre otros. Por tanto, las áreas metropolitanas alrededor del mundo son más propensas a presentar concentraciones de ozono dañinas a la salud debido a que acumulan diversas fuentes de COV y NO_x en una misma área geográfica.

Ahora bien, respecto a la relación del cambio climático y la contaminación del aire, existe una rama de estudio que ha buscado cuantificar el efecto del cambio climático sobre el

¹ NOAA, “Global Climate Report – Annual 2019”, (Fecha de consulta: 3 de agosto de 2020), <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>.

² World Health Organization, “Air pollution”, (Fecha de consulta: 28 de febrero de 2020), https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/air_pollution/es/.

³ United States Environmental Protection Agency, “Ground-level Ozone Basics”, (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020), <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation>.

ozono troposférico. Esta literatura es conocida como la penalidad climática sobre el ozono y es motivada por la evidencia de que el cambio climático—a través del calentamiento global— puede favorecer el deterioro de la calidad del aire (Fu y Tian, 2019). Debido a esto, en este trabajo se investiga uno de los canales causales por los cuales el cambio climático tiene efectos negativos en la salud de las personas y tiene un impacto positivo en la mortalidad: la multa climática sobre el ozono.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es un espacio geográfico ideal para estimar los efectos del cambio climático en el ozono y en la mortalidad. Por un lado, la ZMVM permite evaluar el efecto del cambio climático en la contaminación debido a que presenta variación en la concentración de ozono troposférico y en las temperaturas a lo largo del año y a través de distintos años. En particular, la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) reportó en 2017 que:

Uno de los principales contaminantes responsables del deterioro de la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana es el ozono. A pesar de que en los últimos años se ha observado una reducción importante en las concentraciones máximas, éstas aún superan los valores establecidos por la NOM-020-SSA1-2014.⁴

Donde la NOM-020-SSA1-2014 es una norma que “tiene por objeto establecer los valores límite permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente para la protección de la salud humana”⁵.

Por otro lado, es posible estimar el efecto del cambio climático en la mortalidad debido a la relevancia poblacional de la región y a la heterogeneidad espacial y temporal en cuanto a exposición a ozono troposférico. En específico, en la ZMVM se encuentran las 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo. Además, es una de las metrópolis más grandes del mundo con una extensión territorial de 7,866 km² y una población de más de 20 millones de personas—17% de la población nacional—en el año 2015; esto implica que su densidad poblacional es de alrededor de 13,500 personas por kilómetro cuadrado⁶. Por tanto, al tomar en cuenta la población y los reportes de

⁴ SEDEMA, Informe anual calidad del aire 2017 (Ciudad de México: SEDEMA, 2018), 13.

⁵ SEDEMA, “NOM-020-SSA1-2014”, (Fecha de consulta: 28 de febrero de 2020), <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-020-SSA1-2014.pdf>.

⁶ OCDE, “Estudios Territoriales: Valle de México, México”, (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020), <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/56213/valle-de-mexico-OCDE.pdf>.

la SEDEMA, es posible apreciar que un gran número de personas se encuentra expuesta a niveles de ozono que pueden ser nocivos para su salud.

El objetivo de este trabajo de investigación es cuantificar dicho impacto—en la ZMVM—mediante estrategias econométricas. Se emplea un modelo de variables instrumentales que permite ajustar las concentraciones de ozono troposférico por efectos de temperatura (primera etapa) para luego estimar los efectos del ozono en la mortalidad (segunda etapa). Por lo tanto, las preguntas de investigación son: ¿Cuál es el efecto de la temperatura sobre las concentraciones de ozono troposférico en la ZMVM? ¿Cuánto afecta el ozono troposférico en la mortalidad en la ZMVM? El resultado principal es que un aumento de 1°C en la media móvil de temperaturas de los últimos 15 años se traduce en un incremento en la concentración de ozono troposférico horario de 2.868 partes por billón (ppb)—respecto a una media diaria de 90 ppb entre los meses de febrero a julio. También, se estima que el ozono troposférico sí tiene un efecto positivo en la mortalidad de la ZMVM. En particular, se encuentra que las tasas de mortalidad—por cada 100,000 habitantes—de la población adulta mayor a 60 años aumentan en 0.04072 si la concentración de ozono troposférico aumenta en una unidad de ppb. Asimismo, se destaca que el ozono troposférico afecta principalmente a las tasas de mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares.

Con los coeficientes obtenidos se realizaron estimaciones respecto al beneficio monetario que implicaría una mejora en la calidad del aire en términos de una reducción en ozono troposférico. Esto destacó que, si la concentración de ozono troposférico disminuye en 1 ppb durante el año 2010, se evitarían 112 muertes en adultos mayores de 60 años en la ZMVM, lo que se traduce en un beneficio de alrededor de 190 millones de dólares. Estos beneficios deben ser considerados en la evaluación de los costos y beneficios de las distintas políticas que tienen como objetivo la reducción de emisiones en la ZMVM.

2. Literatura previa

El presente estudio se centra en identificar el efecto causal de la presencia de un contaminante en específico: el ozono (O_3) troposférico— i.e. ozono al nivel del suelo. Sin embargo, estimar un modelo de mortalidad en función de ozono es problemático porque ignora el efecto que el cambio climático tiene sobre el contaminante. Por tanto, la evidencia de la multa climática sobre

el ozono troposférico permite establecer una relación entre el cambio climático y la mortalidad a través del ozono.

En este trabajo se usa la variación exógena producida por el cambio climático sobre el ozono troposférico para identificar el impacto de éste en la mortalidad. Empero, es importante cuestionar la validez de este instrumento debido a la evidencia que indica un impacto directo de la temperatura en la morbilidad y mortalidad. Este efecto ha sido documentado en otras investigaciones y se ha observado que el aumento de temperaturas—por *shocks* o por cambio climático—causa un incremento en morbilidad y mortalidad. Por tanto, es importante mantener en consideración el efecto que tiene la temperatura en la morbilidad al estimar los efectos del cambio climático en la mortalidad por medio del ozono troposférico.

Multa del cambio climático en el ozono

Existen estudios recientes que han investigado la relación entre el cambio climático y el desarrollo y acumulación del ozono. Esta línea de estudio es conocida como la *penalty* o multa del cambio climático sobre el ozono y se ha replicado en distintas partes del mundo. El objetivo de estas investigaciones es conocer el cambio en niveles de O_3 dado el aumento de temperaturas que acompañan al cambio climático. Esto es relevante porque, como mencionan Fu y Tian (2019), el cambio climático afectará la emisión, transporte, evolución química y dispersión de contaminantes del aire y sus precursores. Además, estos autores destacan que el calentamiento global antropogénico—generado por aumentos de gases invernadero por actividad humana—tendrá impactos en la calidad del aire a través de cambios en condiciones físicas del clima (p.ej. temperatura, precipitación, humedad, entre otros) que afectan procesos atmosféricos.

En esta literatura también se destaca la importancia del diseño de políticas que tomen en cuenta la relación entre el cambio climático y la calidad del aire. Por ejemplo, Reis, Drouet, Dingenen y Emmerling (2018) utilizan índices de calidad de aire para identificar a los principales precursores y con esto comparar políticas integradas. Aunado a esto, se encuentra el texto de Rasmussen, Hu, Mahmud y Kleeman (2013) en el que realizaron una evaluación de la *penalty* al ozono para entender en qué regiones se deben realizar más esfuerzos para reducir emisiones de NO_x y COV . En este acercamiento toman en cuenta las características de acumulación de NO_x —limitada y saturada—en las regiones que analizaron. Concluyen que

estas características son relevantes debido a que una región limitada en NO_x no presentará una *penalty* tan alta por aumentos de temperatura, como una región saturada en NO_x .

Un trabajo clave sobre el que se basa la identificación econométrica del presente trabajo es de los autores Bento, Miller, Mookerjee y Severnini (2020). Estos autores integran tendencias de largo plazo en temperaturas a su estudio de la *penalty* y la adaptación de agentes a los cambios en temperaturas. Los autores destacan que se podría subestimar la *penalty* al ozono si se consideran exclusivamente las temperaturas contemporáneas a los niveles de ozono estudiados. Los autores proponen un modelo que integra choques diarios y tendencias de largo plazo en temperatura. A partir de sus resultados, derivan una medida de adaptación de los agentes que corresponde a los cambios de comportamientos de las personas al experimentar choques de temperatura.

Por último, Fu y Tian (2019), recopilan una serie de estudios que se han realizado respecto a la *penalty* del cambio climático sobre el ozono incluyen procesos meteorológicos, químicos y biológicos que—hasta el momento—no son bien comprendidos. Aunado a esto, destacan que estudios recientes en este campo han presentado procesos que cambiaron el entendimiento de la multa del cambio climático en el ozono. Por tanto, este estudio busca contribuir a la comprensión de este proceso.

Calidad del aire y mortalidad

Existe amplia literatura y evidencia de que distintos contaminantes incrementan la posibilidad de sufrir enfermedades cardiovasculares y en vías respiratorias. En el caso del ozono, se conoce que los principales efectos a la salud se concentran en vías respiratorias.

Chay y Greenstone (2003) estudiaron el efecto de la contaminación del aire en la mortalidad infantil durante la recesión de 1981-1982 en Estados Unidos. Este periodo fue de interés para los autores debido a que durante la crisis disminuyó el total de partículas suspendidas (TPS) en el aire. Por último, los autores estimaron que la caída en el TPS disminuyó la mortalidad infantil por cada 100,000 nacimientos a nivel condado.

La investigación de Zivin y Neidell (2011) es relevante porque observa una caída en la productividad de trabajadores agrícolas al estar expuestos a contaminación de ozono en el aire. Por ende, concluyen que la regulación en la contaminación del medio ambiente es importante

debido al impacto que tiene en el capital humano—en este caso, en la salud. Además, se ha mostrado evidencia de los efectos del ozono en la mortalidad. En particular, Bell, Dominici y Samet (2005) encontraron que hay grandes efectos del ozono en la mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias, por edad (adultos mayores) y por exposición de ozono durante el mismo día. También, Gryparis et al. (2004) estimaron que los efectos del ozono en la mortalidad se acentúan durante las temporadas cálidas del año y que aumentan estos se reflejan en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Asimismo, Filleul et al. (2006) utilizaron la ola de calor en Europa para observar el efecto de la temperatura y el ozono en la mortalidad. Dado lo anterior, encontraron un exceso en el riesgo de morir por aumentos de O_3 y temperatura.

Ahora bien, respecto a la mortalidad en la ZMVM, Arceo, Hanna y Oliva (2016) investigan la relación entre la contaminación del aire y la mortalidad de infantes en la capital del país. Además, destacan una relación entre un fenómeno natural—conocido como inversiones térmicas—y la acumulación de contaminantes. En específico, describen que las inversiones térmicas son eventos en donde la temperatura observada no disminuye cuando la altura aumenta. Esto genera una capa de temperatura que no permite la disipación de contaminantes y, por consecuencia, afecta la salud de las personas. Dado lo anterior, integran un acercamiento de variables instrumentales en donde la primera etapa de la estimación considera el efecto de las inversiones térmicas en los contaminantes; y la segunda etapa estima el efecto de los contaminantes en las tasas de mortalidad de infantes.

Temperatura, morbilidad y mortalidad

Se han realizado múltiples investigaciones sobre el impacto de la temperatura en la salud de las personas. Esto resalta una desventaja de nuestra metodología debido a que se considera a la temperatura como una fuente de variación exógena que no afecta directamente a la mortalidad.

Por un lado, un parte de la literatura se ha concentrado en el impacto de la temperatura en el comportamiento de las personas y en la morbilidad. Zivin y Neidell (2014) destacan los impactos de la temperatura—diarios—en la asignación de tiempos. En concreto, encuentran que aumentos en la temperatura—en el extremo superior de la distribución—reducen/aumentan el tiempo dedicado al ocio en el exterior/interior. También, en White (2017) se examina la relación entre la temperatura y el uso de hospitales. En particular, se asocia un aumento en las admisiones

a la sala de emergencias cuando se experimentan temperaturas mayores a 80°F—alrededor de 27°C—en un día específico. Por otro lado, existe evidencia de los efectos de la temperatura en la mortalidad. Por ejemplo, Deschênes y Greenstone (2011) mencionan que un aumento de temperatura diaria en el extremo superior de la distribución ocasiona un incremento significativo de las tasas de mortalidad anuales.

3. Datos

Temperatura y ozono

Los datos de concentración de ozono provienen de datos oficiales de contaminantes de la SEDEMA⁷. En ellos, se reportan—por hora—la concentración de ozono (ppb) en distintos monitores que se reparten en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Asimismo, se indica la ubicación geográfica de cada monitor; lo cual permite asignar los niveles de ozono y temperaturas a distintos municipios. Además, respecto al periodo y monitores estudiados, se consideran las observaciones de 1994 a 2010 en 17 monitores en la ZMVM. La elección del periodo de estudio obedece a que gran parte de los monitores no cuentan con la misma antigüedad y, mientras algunos entran en operación a lo largo del tiempo, otros también dejan de operar. Se escogió es periodo 1994 – 2010 pues es el que permite un mejor balance entre el número de años para la construcción de tendencias temporales de 15 años y el número de monitores que permita realizar inferencia con errores agrupados. Por último, la base de datos contiene información faltante en los años considerados. Dado lo anterior, se recurrió a la imputación de datos de monitores cercanos a cada monitor. En específico, se reemplazó el dato faltante con los datos de las estaciones más cercanas que tuvieran datos válidos en temperatura y en ozono.

Por otro lado, los datos meteorológicos utilizados provienen de una base de datos realizada por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF por sus siglas en inglés). En ella se reportan las temperaturas y lluvias diarias a nivel municipal—en todo México—desde 1979 hasta 2016⁸. Dado lo anterior, es posible realizar

⁷ “Datos: Horarios: Contaminantes”, SEDEMA: Dirección de Monitoreo Atmosférico, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnmI=%27&opcion=Zg==>.

⁸ “ERA-Interim”, ECMWF, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>. Agradezco al Dr. Alejandro López-Feldman por facilitar el acceso a una versión de trabajo de estos datos.

medidas meteorológicas de corto y largo plazo—a partir de 1994—para cada una de las estaciones de monitoreo de la SEDEMA.

Los datos de ozono y meteorología disponibles para la ZMVM permiten la construcción de las siguientes variables. Por un lado, se utiliza la observación máxima de ozono por día y por monitor. Por otro lado, en el caso de la temperatura y precipitación, se construyen medias móviles mensuales de 15 años para cada municipio a partir de 1979; por lo que el año en donde comienza el análisis de la multa climática—de la temperatura y precipitación—sobre el ozono es en 1994 y concluye en el 2010. Aunado a esto, se construyen las desviaciones diarias de temperatura y precipitación a su respectiva media móvil por monitor y por mes.

Mortalidad y Población

Los datos de mortalidad provienen de los registros de la Secretaría de Salud. En específico, se trabaja con los registros de defunciones en donde se describe la causa de la defunción, la entidad y municipio de residencia, la edad, entre otros. Por último, los años considerados para los registros de defunciones son en el periodo de 1998 a 2010. Se emplearon los datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO)⁹ para obtener la población por municipio por año y por grupo de edad.

Esta información es útil debido a que permite el emparejamiento de los niveles de ozono troposférico y temperatura—reportados por un monitor—a la defunción de una persona en un municipio de la ZMVM. En específico, se asignaron datos del monitor más cercano a los municipios que su cabecera se encuentre a un máximo de 15 km de distancia de una estación de la SEDEMA. Esto implicó que el número de municipios de la ZMVM con datos disponibles de temperatura, ozono, mortalidad y población se redujera a 33.

Por último, los datos de mortalidad y población permiten la construcción de tasas de mortalidad municipales—por cada 100,000 habitantes—por día, grupo de edad (0-14, 15-59 y 60 y más) y causa de defunción. En consecuencia, es posible estimar el efecto del ozono en causas de defunción en las que se espera observar efectos significativos—i.e. tasas de mortalidad de enfermedades respiratorias y cardiovasculares—y efectos no significativos en las causas de

⁹ Datos del CONAPO compilados y organizados por Diego Valle (2020), <https://github.com/diegovalle/conapo-2010/tree/master/data/colmex>.

defunción que no deberían ser influenciadas por la contaminación de ozono—i.e. tasas de mortalidad por causas externas. Además, es posible desagregar los efectos por grupo de edad y observar cuál es el más vulnerable a aumentos del ozono a nivel del suelo.

4. Metodología

El propósito de este trabajo es estimar el efecto del ozono en la mortalidad de los municipios y delegaciones de la ZMVM. Empero, se debe destacar que realizar una regresión simple del ozono en la mortalidad no sería adecuado debido a la endogeneidad. En específico, la contaminación por ozono podría estar correlacionada con el error al estimar su efecto en la mortalidad. Esto se puede deber a que los municipios con menor concentración de ozono troposférico pueden ser más ricos y, por tanto, tienen menores niveles de mortalidad por contaminación (Arceo et al, 2016). Asimismo, Currie et al. (2014) describen que, debido a los efectos a la salud por exposición tóxica—en este caso, por exposición a ozono troposférico—, las personas realizan actividades para evitar situaciones en donde su salud sería perjudicada. Esto es conocido como el comportamiento de evasión—i.e. *avoidance behavior*—, y puede ocasionar una subestimación del costo social de la contaminación del aire si no es considerado.

Por esta razón, se ajusta un modelo de variables instrumentales que corrige la endogeneidad del ozono troposférico al controlar por efectos del cambio climático. Esto se debe a que el cambio climático—por medio del calentamiento global—es un fenómeno meteorológico de largo plazo que afecta la concentración de ozono (penalidad climática) y puede que no esté correlacionado directamente con la mortalidad; esto porque la literatura ha destacado los efectos de la temperatura en el corto plazo en la salud. Dado esto, el modelo propuesto explota la variación meteorológica para controlar por el impacto de las desviaciones diarias en temperatura en el ozono troposférico—y en la salud—, y la variación climatológica para identificar el efecto de los cambios climáticos de largo plazo en el ozono troposférico (Bento et al., 2020). Esto implica que el análisis consiste en dos etapas. En la primera se utiliza una variable de largo plazo de temperatura como instrumento para ajustar los niveles de ozono troposférico por los efectos de la multa climática. En la segunda se utilizan los valores ajustados del contaminante y se obtiene su efecto sobre la mortalidad.

La prima del cambio climático en el ozono troposférico

El análisis de la penalidad climática tiene el objetivo de obtener los efectos de las variables meteorológicas—temperatura y precipitación—en el ozono troposférico. Además, los coeficientes de interés de esta etapa son la media móvil de temperatura de 15 años y la desviación diaria a esta media móvil. En específico, se espera que el efecto de la variable de corto plazo sea positivo en el ozono troposférico de la ZMVM; esto es, una desviación positiva—en un día específico—de la media móvil de 15 años debería favorecer la formación y concentración de ozono troposférico.

Ahora bien, la primera etapa parte de la estrategia empírica de Bento et al. (2020) para modelar la concentración de ozono troposférico en función de variables climáticas. El modelo propuesto es el siguiente:

$$\begin{aligned} Ozono_{idmy} = & \alpha + \beta_T^W Temp_{idmy}^W + \beta_T^C Temp_{im,y-1}^C + \beta_P^W Prcp_{idmy}^W + \beta_P^C Prcp_{im,y-1}^C + \lambda_m Z_i \\ & + \eta_i + \phi_m + \varepsilon_{idmy} \end{aligned}$$

En primer lugar, $Temp^W$ y $Temp^C$ son las medidas de corto y largo plazo de temperaturas—respectivamente. Por un lado, $Temp^C$ es una media móvil mensual de 15 años en la estación i para el mes m y con un retraso de un año. El uso de la variable con dicho retraso en la tendencia de temperaturas se justifica porque los individuos recordarán las temperaturas del mes actual en otros años y comparan dicha experiencia a la temperatura que experimentan en el año actual; por lo que el año base no se toma en cuenta en la medida de largo plazo de temperaturas. Por otro lado, $Temp^W$ es la desviación diaria en temperatura a la media móvil de 15 años para la estación i , en el día d , mes m y año y . En segundo lugar, $Prcp^W$ y $Prcp^C$ representan las mismas medidas de corto y largo plazo para la precipitación. En cuarto lugar y último lugar, Z son covariables que no cambian en el tiempo—i.e. ubicación de las estaciones de la SEDEMA—y que interactúan con efectos fijos por mes; η_i son efectos fijos por estación y ϕ_m son efectos fijos por mes. Estos controles permiten controlar por características no observables por estación, año y mes.

Mortalidad por exposición a ozono

En la metodología utilizada por Arceo et al. (2016) se destaca la relación entre los contaminantes del aire y fenómenos meteorológicos de corto plazo. Dado esto, utilizan un modelo econométrico de variables instrumentales que integra dicha relación al estimar los

efectos de los contaminantes en la mortalidad. Por tanto, es posible utilizar el mismo acercamiento y considerar los efectos meteorológicos de corto y largo plazo en el ozono troposférico para después estimar su impacto en la mortalidad de la ZMVM:

$$Tasa_{cdmy} = \alpha + \delta Ozono_{idmy} + \beta_T^W Temp_{idmy}^W + \beta_T^W Prcp_{idmy}^W + \lambda_m Z_i + \eta_i + \phi_m + \varepsilon_{idmy}$$

En donde la variable dependiente es la tasa de mortalidad de un municipio c en el día d , mes m y año y ; la variable de *Ozono* es el nivel de ozono troposférico ajustado por la penalidad climática en el monitor más cercano al municipio para la misma fecha; y los controles fijos son los que se establecen en la primera etapa. Además, se controla por las variables meteorológicas de corto plazo de temperatura y precipitación que se utilizan en la primera etapa. Esto porque son efectos meteorológicos contemporáneos a la tasa de mortalidad de una fecha. Por último, el coeficiente de interés en esta segunda etapa del análisis es δ y se espera un efecto positivo en las tasas de mortalidad; esto es, un aumento en el ozono debería aumentar las tasas de mortalidad.

También, las tasas de mortalidad por grupo de edad y por causa de defunción permiten evaluar qué población es más vulnerable a los efectos del ozono. En particular, se estima el efecto del ozono troposférico en las tasas de mortalidad de tres rangos de edad y de tres causas de defunción. Esto para evaluar si los resultados son consistentes con la evidencia previa y para probar su robustez. Por un lado, se espera que la mortalidad de los adultos mayores de 60 años sea afectada positivamente por aumentos de ozono troposférico. Por otro lado, las tasas de mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares deberían incrementar si se elevan los niveles de contaminación por ozono. Asimismo, las tasas de mortalidad por causas externas permiten determinar la robustez de los resultados; esto debido a que el ozono troposférico no debería afectar la mortalidad por accidentes, lesiones autoinfligidas, entre otros.

5. Resultados

Al estimar la primera etapa del modelo, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 1. En particular, se realizaron tres especificaciones del modelo; la primera representa el modelo de Bento et al. (2020) con sus respectivos controles; la segunda añade controles por efectos fijos de año; la tercera considera la misma especificación que la segunda, pero se enfoca en los meses en donde se observan mayor concentración de ozono en la ZMVM (i.e. febrero a

julio). Por último, es importante destacar que la tercera especificación es la que utiliza para estimar el efecto del ozono en un modelo de mínimos cuadrados en dos etapas.

Ahora bien, en primer lugar, se esperaba que el efecto de la precipitación sobre el ozono fuera negativo debido a que es un evento meteorológico que absorbe los contaminantes. Esto se encuentra en los resultados—negativos y significativos—y es consistente con evidencia en donde se encuentran efectos similares de la lluvia sobre contaminantes del aire (Shukla, Misra, Sundar & Naresh (2008)). En segundo lugar, se encontró que el efecto de la variable de temperatura de corto plazo—*shcok* diario—es positivo en el ozono; lo cual es consistente con la evidencia de la penalidad climática e indica que una desviación diaria—positiva—de la temperatura respecto a la media móvil resulta en un incremento de la concentración de ozono troposférico. Sin embargo, se encontró que la variable de largo plazo de temperatura—la media móvil de 15 años—tiene un efecto negativo en dos de las especificaciones. Lo anterior implica que un aumento de temperatura se refleja en una disminución en la concentración de ozono troposférico. Esto puede que se deba a un fenómeno o conocido como supresión de ozono. Una posible explicación para este resultado es el fenómeno de la *supresión del ozono*, el cual ocurre cuando la temperatura alcanza un punto—alrededor de 32 grados Celsius—en donde ya no favorece la creación de ozono troposférico¹⁰.

Tabla 1. Efecto de la multa climática en el ozono

Variables	(1)	(2)	(3)
Media móvil precipitación	-4,500.166*** (502.927)	-6,272.285*** (514.918)	-19,921.305*** (929.842)
Media móvil temperatura	-37.491*** (0.570)	-1.523** (0.763)	2.868* (1.512)
Shock de precipitación	-901.311*** (23.114)	-853.601*** (22.845)	-569.694*** (29.976)
Shock de temperatura	3.948***	3.957***	4.445***

¹⁰ The Harvard Gazette, “The complex relationship between heat and ozone”, (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020), <https://news.harvard.edu/gazette/story/2016/04/the-complex-relationship-between-heat-and-ozone/>.

	(0.060)	(0.060)	(0.080)
Constante	569.025*** (7.324)	125.816*** (9.594)	79.250*** (20.854)
Observaciones	131,568	131,568	64,869
R ²	0.166	0.200	0.219
Municipios	33	33	33

Errores estándar en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos del ECMWF y de la SEDEMA.

En la segunda etapa se estima un modelo por mínimos cuadrados en dos etapas que utiliza como primera etapa la tercera especificación de la Tabla 1. La variable dependiente es la tasa diaria de mortalidad municipal por grupo de edad y de defunción y nuestra variable de interés es el nivel de ozono ajustado en la primera etapa. Además, en esta segunda etapa también se controla por los efectos de los *shocks* de temperatura y precipitación. Los resultados de esta etapa se presentan en las Tabla 2 a 7 y en éstas se especifica la variable dependiente como las tasas de mortalidad generales, por grupo de edad, por causa de defunción.

Por un lado, en la Tabla 2 se reportan los efectos del ozono en las tasas de mortalidad diarias de los municipios analizados sin realizar la instrumentación para observar las correlaciones simples. En particular, se observa que el ozono tiene un efecto no significativo sobre la mortalidad general (columna 1) ni en la mortalidad en los distintos grupos de edades (columnas 2-4). Por otro lado, en la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos por medio del modelo de variables instrumentales propuesto. Este refleja un impacto positivo—y significativo—en la mortalidad y esto es consistente con la evidencia citada.

Tabla 2. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad (MCO)

	(1)	(2)	(3)	(4)
Variables	Tasa total	0-14	15-59	60 y más
Ozono	-0.00006 (0.00008)	0.00010 (0.00019)	-0.00021 (0.00015)	0.00044 (0.00165)
Constante	1.63165*** (0.01480)	0.64692*** (0.03429)	0.83124*** (0.02638)	14.00725*** (0.29020)
Observaciones	64,869	64,869	64,869	64,869

R ²	0.01558	0.00236	0.00190	0.00637
Municipios	33	33	33	33

Errores estándar en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, del CONAPO y de la SEDEMA.

Tabla 3. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad

Variables	(1) Tasa total
Ozono	0.00178* (0.00100)
Constante	1.44304*** (0.10378)
Observaciones	64,869
Municipios	33

Errores estándar en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, CONAPO, SEDEMA y ECMWF.

La Tabla 4 presenta los resultados de los efectos del ozono en las tasas de mortalidad por los grupos de edad; en donde se destaca que los efectos del ozono son positivos y significativos para la mortalidad de adultos mayores de 60 años. Además, se encuentra que la población menor a 60 años no experimenta efectos significativos en su salud por aumentos en el ozono. Finalmente, la Tabla 5 destaca el efecto del ozono en las tasas de mortalidad por causas de defunción de interés (i.e. enfermedades respiratorias y cardiovasculares). También, se estima el efecto del ozono en la mortalidad por causas externas (p.ej. accidentes de transporte, caídas, lesiones autoinfligidas, entre otros); esto porque las tasas de mortalidad por dichas causas no deberían estar afectadas por los niveles de ozono troposférico y presentan una oportunidad de realizar una prueba de robustez sobre el análisis. En específico, en la Tabla 5 se observa que sí existe un efecto significativo y positivo del ozono en las enfermedades respiratorias y cardiovasculares—columna 1 y 2, respectivamente—y que no hay un efecto significativo del ozono por causas de defunción externas (columna 3).

Tabla 4. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupos de edad

Variables	(1) 0-14	(2) 15-59	(3) 60 y más
Ozono	0.00046 (0.00232)	0.00053 (0.00178)	0.04072** (0.01970)
Constante	0.61055** (0.23960)	0.75533*** (0.18435)	9.86992*** (2.03714)
Observaciones	64,869	64,869	64,869
Municipios	33	33	33

Errores estándar entre paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, CONAPO, SEDEMA y ECMWF.

Tabla 5. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por causa de defunción

Variables	(1) Causas respiratorias	(2) Causas cardiovasculares	(3) Causas externas
Ozono	0.00146** (0.00062)	0.00175* (0.00092)	0.00070 (0.00075)
Constante	0.02046 (0.06437)	0.21001** (0.09560)	0.10597 (0.07756)
Observaciones	64,869	64,869	64,869
Municipios	33	33	33

Errores estándar entre paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, CONAPO, SEDEMA y ECMWF.

Ahora bien, es posible profundizar estos resultados al estimar el efecto del ozono en mortalidad por causa de defunción y grupo de edad (0-14, 15-59, 60 y más). Por tanto, en la Tabla 6 y 7 se presentan los coeficientes del efecto del ozono sobre la tasa de mortalidad por enfermedades respiratorias para los tres grupos de edades (columnas 1-3 de Tabla 6) y esto se replica para la tasa de mortalidad por enfermedades cardiovasculares (columnas 4-6 de Tabla 6) y causas externas (Tabla 7). En suma, se encuentra que los efectos del ozono en la mortalidad—por causas respiratorias y cardiovasculares—son significativos y positivos para los adultos mayores de 60 años y no significativos para el resto de la población en los demás grupos de edad

y para la mortalidad por causas externas; esto es consistente con los resultados de estudios previos y destaca la robustez del modelo.

Tabla 6. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupo de edad y causa de defunción

Variables	Causas respiratorias			Causas cardiovasculares		
	(1) 0-14	(2) 15-59	(3) 60 y más	(4) 0-14	(5) 15-59	(6) 60 y más
Ozono	0.00080 (0.00112)	-0.00005 (0.00037)	0.02418*** (0.00750)	0.00009 (0.00017)	-0.00012 (0.00059)	0.03398** (0.01384)
Constante	0.04187 (0.11574)	0.04285 (0.03867)	-0.86526 (0.77545)	-0.00300 (0.01764)	0.12612** (0.06146)	1.23585 (1.43099)
Observaciones	64,869	64,869	64,869	64,869	64,869	64,869
Municipios	33	33	33	33	33	33

Errores estándar en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, CONAPO, SEDEMA y ECMWF.

Tabla 7. Efecto del ozono en las tasas de mortalidad por grupo de edad y causa de defunción

Variables	Causas externas		
	(1) 0-14	(2) 15-59	(3) 60 y más
Ozono	-0.00039 (0.00056)	0.00146 (0.00098)	-0.00162 (0.00565)
Constante	0.10026* (0.05786)	0.05579 (0.10093)	0.66662 (0.58415)
Observaciones	64,869	64,869	64,869
Municipios	33	33	33

Errores estándar in paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Salud, CONAPO, SEDEMA y ECMWF.

6. Discusión

La mejora de la calidad del aire ha sido un aspecto importante en el desarrollo de políticas pública de la Ciudad de México y del resto de la Zona Metropolitana. Esto por sus altas

concentraciones de contaminantes del aire y sus efectos negativos a la salud. Por tanto, “los gobiernos municipales, estatales y federales han utilizado leyes y regulaciones para controlar y reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, mejorar la calidad del aire y proteger la salud de la población”¹¹. Esto ha resultado en “las reducciones de las concentraciones estacionales horarias máximas diarias de ozono en toda la ciudad que pasaron de más de 160 ppb en 1990 a 85 ppb en 2015”¹².

La implementación de políticas públicas ha mejorado la salud de las personas y con ello reducido el número de muertes por exposición a ozono troposférico. Esto permite evaluar los resultados obtenidos sobre el ozono troposférico en la mortalidad y comparar los costos de la implementación de dichas políticas con los beneficios producidos.

Con base en los resultados econométricos obtenidos en las secciones previas podemos monetizar los beneficios en términos de muertes evitadas debido a una reducción marginal en la concentración de ozono troposférico. En particular, se retoman los efectos del ozono troposférico en las tasas mortalidad para determinar el número de muertes evitadas al año en los 33 municipios analizados. Este proceso se realizará—específicamente—en la población mayor a 60 años al ser la más afectada por las fluctuaciones en la concentración de ozono. Por último, se monetiza el beneficio de estas muertes evitadas usando el valor estadístico de la vida (VSL, en inglés).

El procedimiento para obtener el número de muertes evitadas y establecer su valor monetario se divide en dos partes. La primera consiste en calcular el número de muertes diarias evitadas por una disminución de ozono troposférico—en los 33 municipios. Esto se realiza con la siguiente fórmula:

$$m_t = \frac{\delta p_t}{100,000} * 182$$

En donde se multiplica la población total de adultos mayores de 60 años (p) de los 33 municipios de un año t por el efecto del ozono troposférico (δ) sobre su grupo de edad (Tabla 3 columna

¹¹ SEDEMA, Análisis histórico de los beneficios en la salud asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015. (Ciudad de México: SEDEMA, 2015), 8.

¹² SEDEMA, Análisis histórico de los beneficios en la salud asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015. (Ciudad de México: SEDEMA, 2015), 22.

3); esto resulta en el número de adultos mayores que fallece/sobrevive en un día por un aumento/reducción de 1 ppb en la concentración de ozono troposférico. Sin embargo, debido a que el coeficiente contempla tasas de mortalidad por cada 100,000 habitantes, se debe dividir dicho número de personas entre la misma proporción. Por último, se multiplica este número de personas por los días al año considerados en el escrito: 182 días entre los meses de febrero a julio. Por tanto, con este cálculo se determinan las muertes evitadas (m) en un año t por la reducción de la concentración de ozono troposférico.

La segunda parte consta en la cuantificación monetaria de las muertes evitadas por la reducción en la concentración de ozono por medio del VSL. El VSL representa la disposición individual a pagar—en dólares—por un cambio marginal en su riesgo de fallecer en un año específico. La utilidad del VSL surge cuando se utiliza en proyectos públicos que tienen por objeto la reducción de muertes o daños a la salud (Rojas, 2020); como la reducción de concentración de ozono troposférico en la ZMVM. En específico, se recurre a esta metodología para contar con un estimado de la disposición de pagar de las personas por una reducción en su riesgo de muerte para después aplicarla al análisis del ozono troposférico en la mortalidad.

Cuando no existen estudios recientes que calculen el VSL para México con datos primarios, se puede emplear una *transferencia de beneficios* para extrapolar el VSL de un país o región hacia otro, ajustando por las diferencias de ingreso per cápita. En Rojas (2020) se evalúan las medidas de mitigación en respuesta a la pandemia por COVID-19 en México y se estima con dicha metodología un VSL de 1.7 millones de dólares por muerte evitada para analizar los beneficios que tuvieron las acciones de distanciamiento social para controlar el esparcimiento de la enfermedad. Este valor por vida estadística es utilizado en nuestra investigación junto con el número de muertes evitadas en un año por una reducción de en la concentración de ozono troposférico. Esto con el fin de obtener los beneficios monetarios de mejorar la calidad del aire de los 33 municipios durante el último año de nuestro análisis—i.e. 2010.

Ahora bien, al calcular el número de muertes evitadas—en adultos mayores de 60 años—por una reducción en concentración de ozono de 1 ppb en el 2010, se obtiene que sobrevivirían 112 personas en los 33 municipios. Esto multiplicado por el valor por vida estadística de 1.7 millones de dólares corresponde a un beneficio de alrededor de 190 millones de dólares. Esto

resalta la importancia de considerar los posibles impactos que una política pública—en este caso de calidad—puede tener sobre la salud de las personas y los beneficios monetarios que éstos representan.

7. Conclusión

El cambio climático ha afectado los procesos de producción y acumulación del ozono troposférico. En específico, el aumento de temperaturas ha sido uno de los medios por el cual el cambio climático ha impactos sobre este contaminante del aire. Este medio es conocido como la penalidad climática sobre el ozono y en este escrito se cuantifica su efecto sobre las tasas mortalidad diaria de municipios de la Zona Metropolitana del Valle de México.

En este trabajo se estima la multa climática sobre el ozono y posteriormente se obtienen los efectos del ozono—ajustado por la multa climática—en las tasas de mortalidad. Por medio de la estrategia empírica de Bento et al. (2020), se estima una penalidad del ozono en la Ciudad de México. En específico, se encuentra que un aumento de 1°C en la media móvil de temperatura de 15 años ocasiona un aumento en la concentración de ozono troposférico de 2.868 ppb. Asimismo, se encontró que la medida de corto plazo de temperatura—i.e. desviación diaria de la media móvil— también afecta positivamente la concentración de ozono troposférico; esto es, un aumento de 1°C produce un incremento de 4.445 ppb en ozono troposférico.

Posteriormente, se ajustó el modelo de Arceo et al. (2016) para considerar la multa climática sobre el ozono troposférico y su efecto en la mortalidad de los municipios de la ZMVM. Con este acercamiento, se obtienen efectos significativos en ambas etapas del análisis y se encuentra que las variables meteorológicas sí tienen un impacto sobre el ozono troposférico y que este contaminante del aire sí afecta negativamente la salud de las personas. Particularmente, se encuentra que los adultos mayores de 60 años son la población más vulnerable a aumentos de ozono troposférico; y que la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares son las más afectadas por este contaminante. Estos resultados destacan la importancia de considerar los efectos del cambio climático al estimar el impacto de la contaminación del aire en la salud.

Por último, en este escrito se calcularon los beneficios de la reducción en la concentración del ozono troposférico en la Ciudad de México y el resto de la Zona Metropolitana

desde los años noventa hasta el 2015. Esto se realizó por medio del cálculo de muertes evitadas por una disminución en la concentración de ozono troposférico durante el 2010 para luego estimar los beneficios monetarios de la mejora en la calidad del aire. En suma, se determinó que una reducción en la concentración de ozono troposférico de 1 ppb durante el 2010 resultó en 112 muertes evitadas en adultos mayores de 60 años y un beneficio estimado de alrededor de 190 millones de dólares. Estos beneficios deben ser considerados en la evaluación de los costos y beneficios de las distintas políticas que tienen como objetivo la reducción de emisiones en la ZMVM.

8. Bibliografía

- Arceo, Eva, Rema Hanna y Paulina Oliva. “Does the Effect of Pollution on Infant Mortality Differ Between Developing and Developed Countries? Evidence from Mexico City”. *The Economic Journal* 126, no.591 (2016): 257–280. [10.1111/ecoj.12273](https://doi.org/10.1111/ecoj.12273).
- Bell, Michelle L., Francesca Dominici y Jonathan M. Samet. “A Meta-Analysis of Time-Series Studies of Ozone and Mortality With Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study”. *Epidemiology* 16, no. 4 (2005): 436-445. [10.1097/01.ede.0000165817.40152.85](https://doi.org/10.1097/01.ede.0000165817.40152.85).
- Bento, Antonio, Noah Miller, Mehreen Mookerjee y Edson Severnini. “A Unifying Approach to Measuring Climate Change Impacts and Adaptation” (2020). [10.3386/w27247](https://doi.org/10.3386/w27247).
- Chay, Kenneth Y. y Micheal Greenstone. “The Impact of Air Pollution on Infant Mortality: Evidence from Geographic Variation in Pollution Shocks Induced by a Recession”. *The Quarterly Journal of Economics* 118, no. 3 (2003): 1121-1167. www.jstor.org/stable/25053932.
- Currie, Janet. “Pollution and Infant Health”. *Child Development Perspectives* 7, no. 4 (2013): 237–242. [10.1111/cdep.12047](https://doi.org/10.1111/cdep.12047).
- Currie, Janet, Joshua G. Zivin, Jamie Mullins y Matthew Neidell. “What Do We Know About Short and Long Term Effects of Early Life Exposure to Pollution?”. *Annual Review of Resource Economics* 6, (2014): 217-247. [10.1146/annurev-resource-100913-012610](https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012610).
- Deschênes, Olivier y Micheal Greenstone. “Climate Change, Mortality, and Adaption: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US”. *American Economic Journal* 3, no. 4 (2011): 152-185. [10.1257/app.3.4.152](https://doi.org/10.1257/app.3.4.152).
- Filleul, Laurent, Sylvie Cassadou, Sylvia Médina, Pascal Fabres, Agnès Lefranc, Daniel Eilstein, ... Martine Ledrans. “The Relation Between Temperature, Ozone, and Mortality in Nine French Cities During the Heat Wave of 2003”. *Environmental Health Perspectives* 114, no. 9 (2006): 1344–1347. [10.1289/ehp.8328](https://doi.org/10.1289/ehp.8328).
- Fu, Tzung-May y Heng Tian. “Climate Change Penalty to Ozone Air Quality: Review of Current Understandings and Knowledge Gaps”. *Current Pollution Reports* 5 (2019): 159-171. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00115-6>.
- Gryparis, Alexandros, Bertil Forsberg, Klea Katsouyanni, Antonis Analitis, Giota Touloumi, Joel Schwartz, ... Zeynep Dörtbudak. “Acute Effects of Ozone on Mortality from the “Air Pollution and Health”. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 170, no. 10 (2004): 1080-1087. [10.1164/rccm.200403-333oc](https://doi.org/10.1164/rccm.200403-333oc).
- NOAA. “Global Climate Report – Annual 2019”. (Fecha de consulta: 3 de agosto de 2020). <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>.
- OCDE. “Estudios Territoriales: Valle de México, México”. (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/56213/valle-de-mexico-OCDE.pdf>.
- Rasmussen, D.J., Jianlin Hu, Abdullah Mahmud y Michael J. Kleeman. “The Ozone–Climate Penalty: Past, Present and Future”. *Environmental Science & Technology* 47, no. 24 (2013): 14258-14266. <https://doi.org/10.1021/es403446m>.
- Reis, Lara, Laurent Drouet, Rita van Dingenen y Johannes Emmerling. “Future Global Air Quality Indices under Different Socioeconomic and Climate Assumptions”. *Sustainability* 10, no. 10 (2018): 3645. <https://doi.org/10.3390/su10103645>.
- Rojas, Irvin. “Evaluating the Effectiveness of Mitigation Policies for Flattening the COVID-19 Epidemic Curve: Evidence from Five Mexican Cities”. CIDE (2020).

- Rojas, Irvin. “The Economic Benefits and Costs of Mitigation Measures in Mexico”. CIDE (2020).
- SEDEMA. “NOM-020-SSA1-2014”. (Fecha de consulta: 28 de febrero de 2020). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-020-SSA1-2014.pdf>.
- SEDEMA. Análisis histórico de los beneficios en la salud asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015. (Ciudad de México: SEDEMA, 2015).
- SEDEMA. Informe anual calidad del aire 2017 (Ciudad de México: SEDEMA, 2018).
- Shukla, J. B., A.K. Misra, Shyam Sundar y Ram Naresh. “Effect of rain on removal of a gaseous pollutant and two different particulate matters from the atmosphere of a city”. *Mathematical and Computer Modelling* 48, no. 5-6 (2008): 832–844. [10.1016/j.mcm.2007.10.016](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.10.016).
- The Harvard Gazette. “The complex relationship between heat and ozone”. (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020). <https://news.harvard.edu/gazette/story/2016/04/the-complex-relationship-between-heat-and-ozone/>.
- United States Environmental Protection Agency. “Ground-level Ozone Basics”. (Fecha de consulta: 17 de julio de 2020). <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation>.
- World Health Organization. “Air pollution”. (Fecha de consulta: 28 de febrero de 2020). https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/air_pollution/es/.
- Zivin, Joshua G. y Matthew J. Neidell. “Temperature and the Allocation of Time: Implications for Climate Change”. *Journal of Labor Economics* 32, no. 1 (2014): 1-26. [10.1086/671766](https://doi.org/10.1086/671766).
- Zivin, Joshua G. y Matthew J. Neidell. “The Impact of Pollution on Worker Productivity” (2011). [10.3386/w17004](https://doi.org/10.3386/w17004).

Bases de datos

- ECMWF. “ERA-Interim”. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>.
- Secretaría de Salud. DGIS. “Conocimiento en Salud: Datos Abiertos: Defunciones”. http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/da_defunciones_gobmx.html.
- SEDEMA: Dirección de Monitoreo Atmosférico. “Datos: Horarios: Contaminantes”. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnmI=%27&opcion=Zg==>.
- Valle, Diego. “CONAPO Mexican Population Estimates 1990-2030”. <https://github.com/diegovalle/conapo-2010>.

