

Trabajo final

Impacto en el medio ambiente de las zonas de bajas emisiones en las ciudades europeas

Pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto causal de la introducción de Zonas de Bajas Emisiones (LEZ por sus siglas en inglés) sobre la concentración anual promedio de NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las ciudades grandes de la UE-27 entre 2005 y 2022?

La reducción de emisiones (dentro de ellas el NO₂) es de vital importancia con el fin de evitar la externalidad negativa que estas producen. Comenzando con la salud pública se reconocen efectos negativos de corto; por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento en la concentración diaria de NO₂ aumenta las visitas a urgencias en un 1,4%, además se tiene la sospecha de que está asociado con más ingresos debido a enfermedades cardíacas y de largo plazo, con esta misma exposición aumenta la mortalidad por todas las causas asociadas en un 2%. Todo esto genera una perdida económica significativa, según la OMS para el 2012 fue del 10% del PIB de la región europea. La introducción de las Zonas de Bajas Emisiones (se definen como zonas donde se restringe el uso de vehículos con un alto grado de contaminación basado en su etiqueta ambiental), surgieron como una solución a la reducción de emisiones producidas por vehículos (responsables del 15% de las emisiones totales en Europa).

Partiendo de este panorama, se considera importante estudiar el efecto causal que tiene la introducción de estas políticas, para poder ver si realmente han sido efectivas en su propósito planteado. Al respecto se ha hablado, que por lo menos en el caso alemán “Using outpatient and inpatient health care data, I demonstrate that low emission zones reduce the number of patients with cardiovascular disease by 2–3 percent. This effect is particularly pronounced for the elderly above 65.” (Margaryan, 2021), otros estudio relizado en Alemania ha mostrado un efecto similar “Concerning objective health outcomes, we estimate a significant decrease in the likelihood of hypertension. The probability of developing hypertension drops by 4.5 percent after implementation.”(Sarmiento, Wägner and Zaklan, 2023, p. 20). Por otro lado, Prieto-Rodríguez encontraron que en Londres la implementación de los LEZ han generado una disminución del 10,5% de las emisiones, mientras que Lebrusán muestra que en Madrid se tienen impactos y Santos muestra que en Lisboa se encuentran mejoras significativas en los contaminantes del aire. Mostrando un posible efecto positivo en la salud pública de los lugares donde se implementan. Bajo estos resultados, se podría evaluar si fuera razonable extrapolar esta medida a otros contextos (adaptadas al contexto donde se quiera extrapolar) con el fin de reducir las emisiones a nivel mundial.

Siguiendo esta línea de ideas, la hipótesis a probar la introducción de Zonas de Bajas Emisiones reduce de manera causal la concentración anual promedio de NO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en las grandes ciudades europeas, en términos econométricos se cree que:

$$ATT = E[Y_{it}(1) - Y_{it}(0) \mid D_{it} = 1] < 0,$$

Donde $Y_{it}(D_{it})$ denota la concentración anual de NO₂ en la ciudad I en el año t , bajo el estado de tratamiento de D_{it} que toma valor de 1 si la ciudad i tiene alguna LEZ en el año t y 0 de lo contrario.

En este trabajo la unidad de análisis es la ciudadxño. El universo muestral de referencia son las ciudades europeas con más de 100 mil habitantes. En la práctica se construye un panel con todas las ciudades para las que se dispone de información completa entre 2005 y 2022, lo que da lugar a un panel (casi) balanceado de 17 años y un total de 42 ciudades. Aunque la muestra no incluye todas las ciudades europeas, cubre las principales áreas urbanas de Europa Occidental, Central y del Este, por lo que los resultados pueden interpretarse como representativos de ciudades europeas grandes. La Tabla 1 resume gráficamente la línea temporal de implementación de las LEZ y las distintas cohortes de entrada por ciudad, lo que permite visualizar en qué momentos se activa el tratamiento en cada caso y sobre qué periodo se identifican los efectos.

La fuente de los datos de calidad del aire es el conjunto “Air Quality Statistics” de la Agencia Europea de Medio Ambiente, del cual se toma una medida continua de NO₂ en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por ciudad, construida como promedio anual de las estaciones de monitoreo bajo una metodología de medición homogénea. La información sobre el año de implementación de las LEZ y si cada ciudad tiene una LEZ activa proviene de la base “Urban Access Regulations in Europe”; con ella se construye una variable dicotómica ciudadxño (1 si la ciudad tiene LEZ en el año t y 0 en caso contrario), a partir de la cual se define la cohorte de tratamiento de cada ciudad, coherente con lo mostrado en la Tabla 1. Las variables climáticas (precipitación y temperatura promedio anual por ciudad y año) se obtienen de “Historical Weather API” como promedios anuales de datos diarios. Finalmente, la población total de la ciudad y el PIB per cápita regional se toman de Eurostat; ambas son variables continuas y se utilizan en logaritmos para reducir la heterogeneidad de niveles. En conjunto, la base resultante es un panel anual de ciudades europeas grandes entre 2005 y 2022, con variables continuas (NO₂, clima, población, PIB) y una variable dicotómica de tratamiento (LEZ), adecuado para el análisis econométrico.

Tabla 1

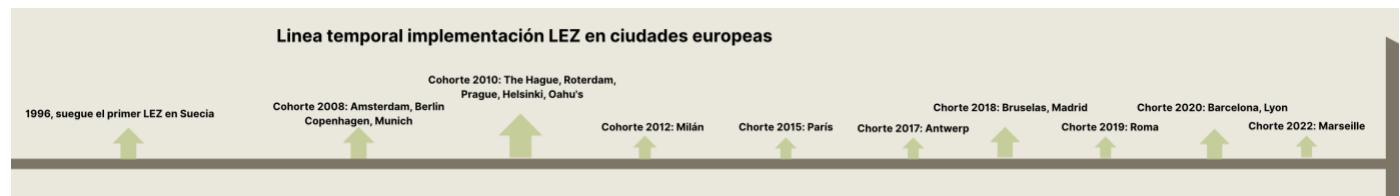


Tabla 2

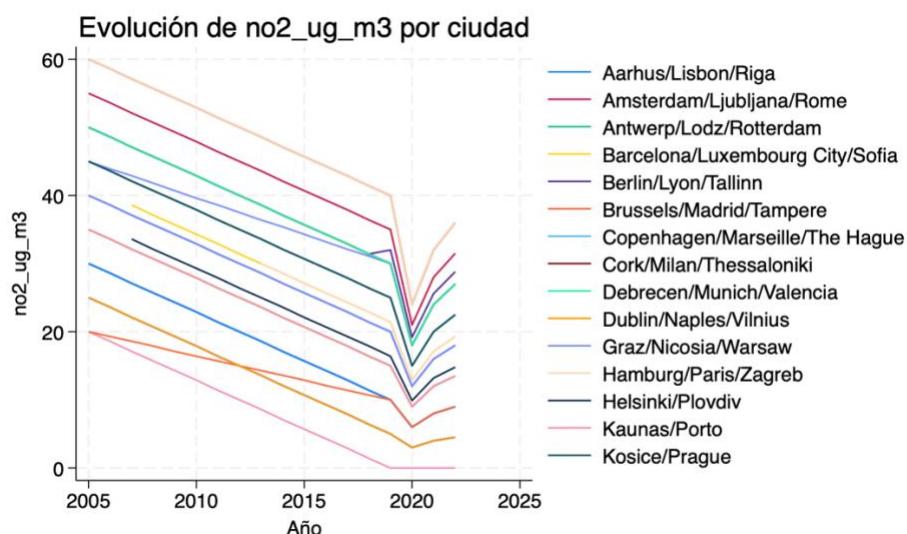
NO2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Cantidad observaciones	744
Media	28,755
Desviación	13.065

la tabla 2 muestra se tienen 744 observaciones de NO₂, con una media de 28,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una desviación estándar de 13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que refleja niveles de contaminación relevantes y una variabilidad considerable entre ciudades y años.

Tabla 3

NO2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
Categoría	media	Sd
Nunca Lez	23.486	11.276
Algún Lez	35.585	12.035

La tabla 3 muestra que las ciudades que nunca han implementado LEZ registran una media de NO₂ de 23,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sd 11,3), mientras que las ciudades con alguna LEZ alcanzan 35,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Sd 12,0), lo que indica niveles de contaminación claramente más altos en estas últimas.

Grafica 1

La grafica 1 muestra una caída marcada y generalizada de las concentraciones de NO₂ entre 2005 y 2020 en todas las ciudades, con un descenso especialmente brusco en 2020 que sugiere un choque común (por ejemplo, la pandemia). A partir de 2020 se observa una ligera recuperación, aunque los niveles permanecen por debajo de los valores iniciales, y persisten diferencias de

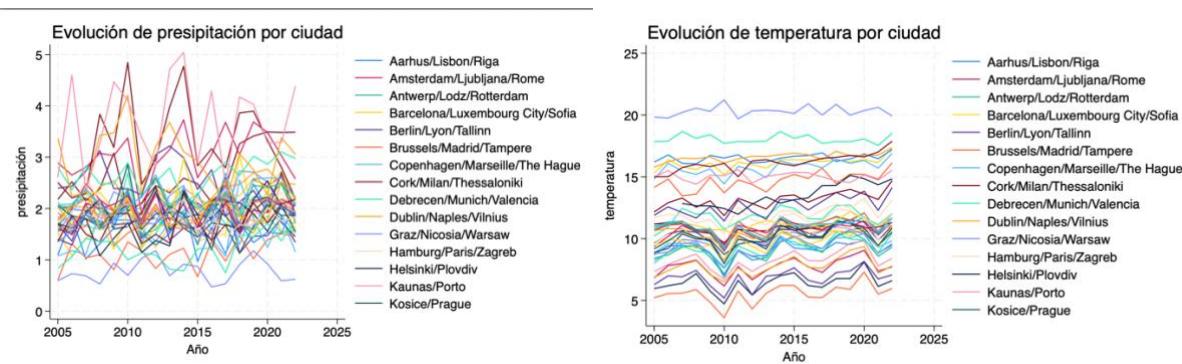
nivel entre grupos de ciudades, pero se destaca que se conserva la misma tendencia entre todas las ciudades.

Tabla 4

Precipitación		
Categoría	media	Sd
Nunca Lez	2.013	0.699
Algún Lez	2.017	0.642

La tabla 4 muestra que la precipitación media es prácticamente igual entre ciudades que nunca han tenido LEZ (2,013) y las que sí (2,017), con desviaciones estándar similares (0,699 y 0,642), lo que indica condiciones de lluvia muy comparables entre ambos grupos.

Grafica 2



La grafica 2 muestra que La precipitación muestra una gran variabilidad interanual y entre ciudades, sin una tendencia clara en el periodo. En contraste, la temperatura presenta trayectorias mucho más suaves y relativamente estables, con diferencias persistentes de nivel entre ciudades (unas sistemáticamente más cálidas que otras), pero sin cambios bruscos comunes en un año específico.

Tabla 5

Población		
Categoría	media	Sd
Nunca Lez	1.547.631	1.420.680
Algún Lez	1.410.464	1.318.123

La tabla 5 muestra que la población media es similar entre ciudades que nunca han tenido LEZ (1,55 millones) y las que sí (1,41 millones), con desviaciones estándar muy altas en ambos grupos, lo que indica una gran heterogeneidad en el tamaño urbano, pero sin diferencias claras de magnitud entre ciudades con y sin LEZ

Tabla 6

PIB x capita regional		
Categoría	media	Sd
Nunca Lez	31.532	21.508
Algún Lez	32.987	20.143

La tabla 6 muestra que el PIB regional per cápita es muy parecido entre ambos grupos: algo mayor en regiones con alguna LEZ (33 mil frente a 31,5 mil), con desviaciones estándar altas y similares, lo que sugiere gran heterogeneidad, pero sin diferencias claras de nivel económico.

A partir de la evidencia descriptiva, las ciudades de la muestra presentan en promedio concentraciones anuales de NO₂ cercanas a 29 µg/m³, muy por encima de las guías de la OMS. Al comparar por grupos, las ciudades que han implementado alguna LEZ registran niveles medios claramente superiores (35,6 µg/m³) a los de las ciudades que nunca han adoptado este tipo de zonas (23,5 µg/m³). Es decir, las LEZ aparecen precisamente en contextos con mayores problemas de contaminación. Sin embargo, otras características estructurales son muy similares entre grupos: la precipitación y la temperatura muestran patrones comparables, la población media ronda 1,4 a 1,5 millones de habitantes en ambos casos y el PIB regional per cápita es muy parecido. Además, la trayectoria temporal de NO₂ revela una fuerte caída común alrededor de 2020, coherente con un choque agregado (por ejemplo, la pandemia) que afecta a todas las ciudades, independientemente de la presencia de LEZ.

Pasando a la metodología que se propone usar, Partiendo de los datos disponibles planeo usar un modelo de Diferencias en Diferencias escalonado usando una estimación con efectos cohorte tiempo y un estudio de evento para pretensiones al tratamiento entre cohortes, con efectos fijos por unidades (ciudades), años, errores clusterizados por unidades y controlando por la temperatura, precipitación, log-población y log-PIB per cápita. Mas específicamente, se planea estimar un Callaway Sant'Anna. Se planteó esta metodología debido a que se adapta con la estructura del panel; para comenzar, la adopción gradual real: tienes ciudades que activan LEZ en años distintos y otras que nunca lo hacen, el DiD escalonado usa como controles, en cada t, a las aún no tratadas y nunca tratadas, evitando sesgos del modelo de efectos fijos tradicionales (causados por los pesos). La ventanas pretratamiento y post tratamiento largas, debido a que se tiene un horizonte 2005–2022 que brinda años pretratamiento suficientes para testear tendencias previas y años post para trazar la dinámica del efecto (estudio de evento). Además, estos modelos son tolerantes a los panales desbalanceados y es ideal al tener una variable de resultado continua y comparable, es decir que es ideal para tener efectos fijos por años y ciudad. El hecho de tener efectos fijos reduce el efecto de los posibles spillovers.

Más específicamente mediante la metodología propuesta se está planteando que el resultado potencial tendría la siguiente especificación: (donde Y_{it} y D_{it} ya se habían definido y X_{it} corresponde al vector de controles)

$$Y_{it} = Y_{it}(\infty) + \tau_{it}(G_i)D_{it} = \alpha_i + \lambda_t + X'_{it}\beta + \tau_{it}(G_i)D_{it} + \varepsilon_{it},$$

Más específicamente se va a estimar la siguiente expresión para cada cohorte (donde $G(\text{comp})$ corresponde al grupo de ciudades nunca tratadas o aún no tratadas).

$$ATT(g, t) = E[Y_{it} - Y_{i,g-1} \mid G_i = g] - E[Y_{it} - Y_{i,g-1} \mid i \in G_{\text{comp}}(g, t)]$$

Después se piensa estimar el siguiente ATT (parámetro de interés) con el fin de encontrar un efecto total del tratamiento ($W_{g,t}$ representan los pesos que se otorga a cada ATT, este método evita comparaciones prohibidas)

$$ATT_j^\omega = \sum_g \omega_g ATT(g, g + j), \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

Y finalmente se estimará este ATT (segundos parámetros de interés) con el fin de poder construir una gráfica que muestre el efecto dinámico del tratamiento.

$$ATT^\omega = \sum_g \sum_{t \geq g} \omega_{g,t} ATT(g, t), \quad \omega_{g,t} \geq 0, \quad \sum_{g,t} \omega_{g,t} = 1.$$

Con el fin de que esta metodología se pueda usar, se necesita que:

Tendencias paralelas: es decir qué; Para cada cohorte de adopción y cada año calendario, si miráramos lo que habría pasado sin tratamiento a las ciudades de la cohorte, su cambio esperado del resultado sería el mismo que el cambio esperado de un grupo de comparación válido en el mismo periodo, matemáticamente se debe cumplir que: $t \neq t'$ y $g \neq g'$

$$E[Y_{it}(\infty) - Y_{it'}(\infty) \mid G_i = g] = E[Y_{it}(\infty) - Y_{it'}(\infty) \mid G_i = g']$$

No anticipación, es decir que en el periodo previo a la implementación de la medida no existen cambios significativos en el comportamiento de la unidad de estudio, matemáticamente se debe cumplir que:

$$Y_{it}(g) = Y_{it}(\infty)$$

Y se tiene que cumplir SUTVA, es decir la no interferencia;

$$Y_{it}(D_i, D_{-i}) = Y_{it}(D_i)$$

Sin embargo, La estimación enfrenta problemas econométricos claros: la adopción de LEZ es potencialmente endógena (ciudades más contaminadas o con tendencias distintas son las que implementan la política), existen políticas ambientales concurrentes y un DiD TWFE estándar con adopción escalonada puede generar comparaciones tratadas contra tratadas con pesos problemáticos. La metodología de Callaway Sant'Anna aborda estos problemas al construir ATT por cohorte y año usando como controles solo ciudades nunca tratadas o aún no tratadas y

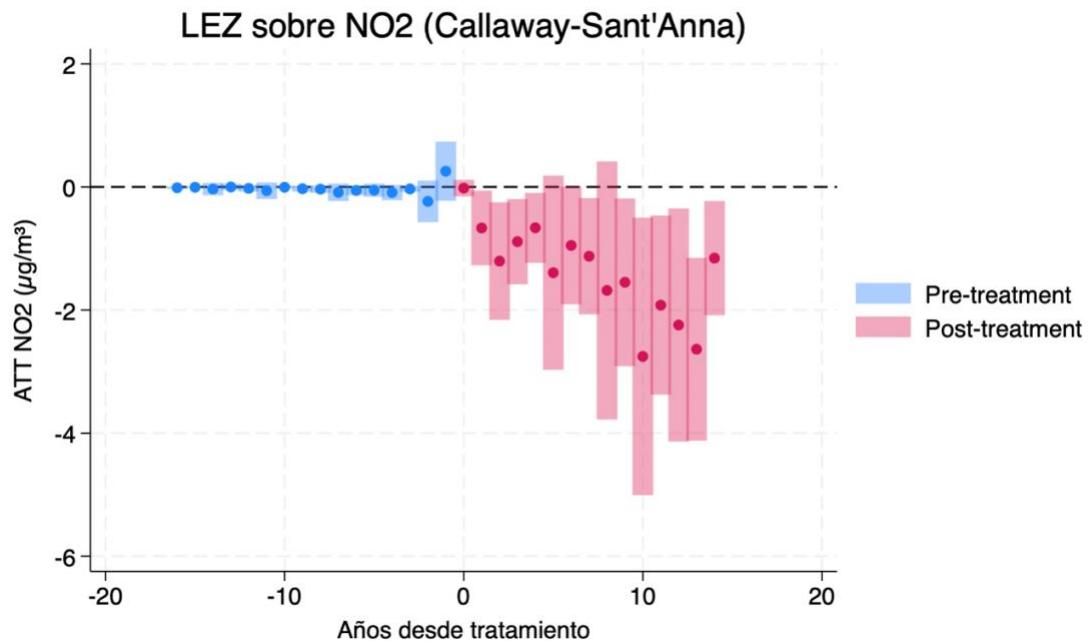
ponderando por la probabilidad de tratamiento, lo que mitiga la endogeneidad observada y evita los sesgos de los modelos TWFE. Sin embargo, persisten posibles amenazas a la identificación, como violaciones de tendencias paralelas, presencia de spillovers entre ciudades o la coincidencia de cambios no observados en políticas o en la medición de NO₂ alrededor de la introducción de las LEZ.

Tabla 7

	Coeficiente	Error Estandar	Z	P-valor	valo de confianza
ATT	-1.218	0.265	-4,59	0.000	-1,738 -0,698

La tabla 7 muestra que el ATT promedio estimado es de $-1.218 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un error estándar de 0.265, estadístico Z de -4.59 y p-valor 0.000, lo que indica un efecto negativo y estadísticamente significativo de las LEZ sobre la concentración anual de NO₂. El intervalo de confianza al 95 % (aprox. -1.74 a $-0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) está por debajo de cero, de modo que incluso en el escenario más conservador la política reduce la contaminación. Dado que la media de NO₂ ronda los 28–29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esta caída equivale aproximadamente a una reducción cercana al 4 % en los niveles anuales de NO₂ en las ciudades con LEZ frente al contrafactual de no implementarlas, controlando por clima, población, PIB per cápita y efectos fijos de ciudad y año.

Grafica 3



La grafica 3 muestra el perfil dinámico del efecto de las LEZ sobre el NO₂ en tiempo relativo al año de activación, donde cada punto representa un ATT en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y las barras sus intervalos de confianza agregados por cohorte. Antes del tratamiento, los coeficientes se mueven de forma errática pero alrededor de cero y, en general, sus intervalos incluyen el cero, sin una tendencia

clara ni cambios bruscos en los años inmediatamente previos. Después de la introducción de las LEZ, los ATT se vuelven sistemáticamente negativos desde el año 0 y 1, alrededor de -0.5 a -1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y se intensifican con el tiempo: entre 5 y 10 años tras la implementación, varios efectos se sitúan entre -2 y -4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con varios intervalos que ya no tocan el cero. Esto es consistente con una reducción inmediata y luego creciente de los niveles de NO_2 en las ciudades tratadas, probablemente asociada a ajustes acumulativos como renovación del parque automotor y cambios en los patrones de movilidad, aunque los lags más largos se estiman con menos cohortes y requieren una lectura más cautelosa.

Con el fin de comprobar los supuestos se corrió la siguiente ecuación con las observaciones previas al tratamiento, con el fin de identificar si parcialmente se cumple el supuesto, y se espera que beta2 sea igual a 0, indicando que en ausencia del tratamiento la evolución es capturada por los efectos fijos, cumpliendo con el supuesto:

$$y_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \beta_1 t_{it} + \beta_2 (t_{it} \cdot \text{ever_treat}_i) + u_{it}$$

Se corrió la ecuación, se realizó una prueba de hipótesis cuya hipótesis nula es que el estimador es igual a 0 y se obtuvo un p-valor de 0.1117, mostrando que no es estadísticamente significativo, es decir que el supuesto se cumple parcialmente, teóricamente es plausible que se cumpla debido a que: existen armonizaciones regulatorias (normas Euro, combustibles), shocks y fuerzas comunes (ciclos, precios de diésel, electrificación) y políticas nacionales de alcance general que empujan trayectorias similares en ausencia de tratamiento.

Por el lado de la no anticipación, se toma en cuenta el resultado de la prueba de hipótesis discutida anteriormente y el hecho de que en la gráfica 3, ningún estimador pre-tratamiento es estadísticamente significativo y todos contienen el 0. Teóricamente es plausible que se cumpla debido a que típicamente, las sanciones y controles comienzan exactamente en la fecha oficial, de modo que antes no hay incentivos fuertes para cambiar rutas o renovar flota.

Por el lado se SUTVA la LEZ de una ciudad no altera directamente el NO_2 de otra unidad del estudio, el cual es factible debido a que el impacto de las LEZ suele ser local y las ciudades están lo suficientemente separadas. Aunque puede que la creación de una LEZ (digamos dentro del mismo país) genere que los individuos anticipen esto y comiencen a renovar la flota automotora para evitar las restricciones futuras, es decir una especie de spillovers por equilibrio general.

Los resultados de este trabajo sugieren que las Zonas de Bajas Emisiones sí logran reducir, de forma causal, los niveles anuales de NO_2 en las grandes ciudades europeas, aunque el tamaño del efecto es moderado en relación con el nivel inicial de contaminación, especial teniendo en cuenta que estas ciudades tienen niveles significativamente más altos. Respondiendo la pregunta de investigación, esto implica que las LEZ son una herramienta efectiva para disminuir las emisiones, pero insuficiente por sí sola para garantizar el cumplimiento de las guías más exigentes de la OMS, es decir contribuyen a desplazar la trayectoria de NO_2 hacia abajo, pero el punto de partida de muchas ciudades sigue siendo muy elevado. La evidencia dinámica, con efectos que crecen varios años después de la implementación, sugiere además que buena parte del impacto no proviene de ajustes inmediatos, sino de procesos graduales como la renovación

del parque automotor, la adopción de tecnologías más limpias y cambios en patrones de movilidad.

En términos de contribución, este trabajo puede hacer parte de la literatura existente que ha documentado efectos positivos de las LEZ sobre salud y calidad del aire en estudios de caso (Alemania, Londres, Madrid, Lisboa), al mostrar que, en un conjunto amplio de ciudades europeas y bajo una metodología de diferencias en diferencias escalonadas, el patrón general también es consistente con una reducción robusta de NO₂. Usar CallawaySant'Anna permite, además, lidiar explícitamente con la adopción gradual y evitar comparaciones problemáticas entre tratados, aportando evidencia metodológicamente más sólida para un contexto multinacional. Al mismo tiempo, se deben tener en cuenta las limitaciones: la posible ocurrencia de otras políticas ambientales, shocks agregados como la pandemia de 2020, y la imposibilidad de observar con detalle todos los cambios en comportamiento y flota vehicular hacen que se deba interpretar los efectos como un impacto neto de las LEZ como una medida dentro de un grupo que hacen las ciudades para disminuir la contaminación aérea.

Desde una perspectiva de política pública, se puede decir que los LEZ, pueden ser una solución factible para combatir la contaminación aérea, aunque se tiene que tener en cuenta que los efectos de la medida no son a corto plazo y que puede que estas medidas no tengan un efecto heterogéneo a nivel mundial, Europa está compuesta por países desarrollados en su mayoría, lo cual hace que su población se pueda adaptar de forma más fácil a las medidas, quizás en otros lugares (incluido latam) esta medida puede ser regresiva (afectando a las personas que no pueden actualizar su parque motor). Este trabajo deja la posibilidad de ver sus efectos esperados fuera de las ciudades grandes europeas, en vista de que en este contexto parecen funcionar.

Referencias Bibliograficas

Air pollution costs European economies US\$ 1.6 trillion a year in diseases and deaths, new WHO study says. (s/f). Who.int. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://www.who.int/europe/news/item/28-04-2015-air-pollution-costs-european-economies-us-1-6-trillion-a-year-in-diseases-and-deaths-new-who-study-says?>

Air quality statistics. (s/f). Europa.Eu. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/air-quality-statistics-dashboards>

Halldorsdottir, S., Finnbjornsdottir, R. G., Elvarsson, B. T., Gudmundsson, G., & Rafnsson, V. (2022). Ambient nitrogen dioxide is associated with emergency hospital visits for atrial fibrillation: a population-based case-crossover study in Reykjavik, Iceland. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 21(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00817-9>

Health impacts of air pollution in Europe, 2022. (s/f). Europa.Eu. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution-in-europe-2022?>

Historical weather API. (s/f). Open-meteo.com. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://open-meteo.com/en/docs/historical-weather-api?>

Lebrusán, I., & Toutouh, J. (2021). Car restriction policies for better urban health: a low emission zone in Madrid, Spain. *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 14(3), 333–342. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00938-z>

No:, Y. 2019. (s/f). *Low emission zones and population health*. Uni-hamburg.de. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2020/112061/pdf/low_emission_zones_and_population_health_new.pdf?

Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2021). Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150(106434), 106434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>

Overview - NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics - Eurostat. (s/f). Europa.Eu. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts?>

Prieto-Rodriguez, J., Perez-Villadoniga, M. J., Salas, R., & Russo, A. (2022). Impact of London toxicity charge and ultra low emission zone on NO₂. *Transport Policy*, 129, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.10.010>

Santos, F. M., Gómez-Losada, Á., & Pires, J. C. M. (2019). Impact of the implementation of Lisbon low emission zone on air quality. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.061>

Sarmiento, L., Wägner, N., & Zaklan, A. (2023). The air quality and well-being effects of low emission zones. *Journal of Public Economics*, 227(105014), 105014. <https://doi.org/10.1016/j.jpubecon.2023.105014>

(S/f). Urbanaccessregulations.eu. Recuperado el 5 de diciembre de 2025, de <https://urbanaccessregulations.eu/?>