



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

# **IMPACTO DEL COVID-19 EN LA CONTAMINACIÓN DE BARCELONA**

Autor: Rafael Remigio Abad Esteban

Director: Manuel Alejandro Betancourt Odio

MADRID | Junio de 2022



## **RESUMEN**

Cada año Barcelona presenta unos niveles de contaminación superiores a los recomendados por la OMS y la Unión Europea. Esta realidad se debe al alto nivel de tráfico rodado, a la presencia del puerto de Barcelona y a la actividad industrial de la ciudad. Debido a estos factores, durante los últimos años se han tomado medidas para mejorar la calidad del aire de la ciudad condal, pero ninguna ha tenido tanto efecto como el confinamiento impuesto como medida de prevención contra la expansión del Covid-19. Durante los dos meses que duró esta medida, los niveles de óxidos de nitrógeno y  $PM_{10}$  se redujeron a niveles históricos, conllevando un aumento proporcional en los niveles de  $O_3$ . El objetivo de este trabajo ha sido analizar el impacto de las restricciones de movilidad durante el confinamiento en los niveles de  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $O_3$ , y compararlo con el impacto de otras variables seleccionadas que también influyen en la presencia de estos contaminantes, tales como variables climatológicas, los vientos del Sáhara, la combustión de biomasa, los días no laborables o la activación de la Zona de Bajas Emisiones. Para ello, se ha elaborado un modelo de regresión lineal múltiple que permite analizar el impacto de cada una de las variables en los niveles de cada contaminante en las distintas estaciones de calidad del aire de Barcelona. Se elaboró mapas de zonificación para estudiar aquellas zonas más sensibles ante los cambios de las distintas variables. Los resultados muestran el marcado impacto heterogéneo del confinamiento en el interior y en el exterior de la ciudad, destacando las disminuciones de óxidos de nitrógeno en los distritos más céntricos de la ciudad (disminución de un 71,88% en  $NO$  y 50,64% en  $NO_2$  frente a un 41,01% y a un 39,07% respectivamente en los distritos de la periferia), así como el limitado control que se tiene sobre la contaminación del  $PM_{10}$ , el cual es especialmente sensible a la presencia de vientos del Sáhara y a la combustión de biomasa (presentan unos coeficientes en el modelo de 0,344 y 0,243 para el  $PM_{10}$ ) en mayor medida que al tráfico rodado (la ZBE presenta un coeficiente de -0,036 para este contaminante).

## **PALABRAS CLAVES**

Contaminación, confinamiento, desescalada, variables climatológicas, polvo del Sáhara, combustión de biomasa,  $PM_{10}$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$

## **ABSTRACT**

Every year Barcelona has pollution levels higher than those recommended by the WHO and the European Union. This is due to the high level of road traffic, the presence of the port of Barcelona and the city's industrial activity. Due to these factors, measures have been taken in recent years to improve air quality in Barcelona, but none have had as much effect as the confinement imposed as a preventive measure against the spread of Covid-19. During the two months that this measure lasted, the levels of nitrogen oxides and PM<sub>10</sub> were reduced to historic levels, leading to a proportional increase in O<sub>3</sub> levels. The aim of this work has been to analyse the impact of mobility restrictions during the confinement on the levels of NO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub>, and to compare it with the impact of other selected variables that also influence the presence of these pollutants, such as climatological variables, Saharan winds, biomass combustion, non-working days or the activation of the Low Emission Zone. In order to do this, a multiple linear regression model has been developed to see the impact of each of the variables on the levels of each pollutant at the different air quality stations in Barcelona. Together with a numerical analysis to detect the most relevant variables, zoning maps have been drawn up to study those areas that are most sensitive to changes in the different variables. The results show the marked heterogeneous impact of confinement inside and outside the city, highlighting the decreases in nitrogen oxides in the interior, as well as the limited control over PM<sub>10</sub> pollution, which is especially sensitive to the presence of Saharan winds and biomass combustion, to a greater extent than road traffic.

## **KEYWORDS**

Pollution, lockdown, de-escalation, climatic variables, Saharan dust, biomass combustion, PM<sub>10</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I: ACTUALIDAD DEL TEMA</b> .....	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS</b> .....	<b>16</b>
<b>1. POBLACIÓN DE ESTUDIO</b> .....	<b>16</b>
<b>2. FUENTES DE LOS DATOS</b> .....	<b>17</b>
Datos de calidad del aire.....	17
Datos climatológicos .....	17
Datos de fenómenos naturales .....	18
<b>3. MÉTODO DE ANÁLISIS</b> .....	<b>18</b>
3.1 Formateo de los datos con Matlab.....	18
Modelo de regresión con RStudio .....	19
Visualización de datos con Tableau .....	20
<b>CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
<b>1. CONJUNTO DE DATOS</b> .....	<b>22</b>
Variable dependiente: contaminación diaria .....	22
Variables independientes .....	24
<b>2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS</b> .....	<b>28</b>
Tratamiento de los datos climatológicos con Matlab .....	28
Unificación y limpieza de datos .....	29
Limpieza de datos.....	31
Aplicación del modelo de regresión .....	32
Elaboración de mapas de zonificación .....	33
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
<b>1. ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS</b> .....	<b>38</b>
<b>2. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>78</b>
<b>1. ARTÍCULOS ACADÉMICOS</b> .....	<b>78</b>
<b>2. INFORMES</b> .....	<b>80</b>
<b>3. RECURSOS DE INTERNET</b> .....	<b>84</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Descripción de las variables independientes -----	25
<b>Tabla 2:</b> Estudio de distancias geográficas entre estaciones climatológicas y estaciones de calidad del aire-----	30
<b>Tabla 3:</b> Valores vacíos por contaminante y estación -----	31
<b>Tabla 4:</b> Análisis de R-Squared por estaciones -----	38
<b>Tabla 5:</b> Análisis numérico de los resultados -----	39
<b>Tabla 6:</b> Matriculación de vehículos en Barcelona -----	42
<b>Tabla 7:</b> Coeficientes de las Fases 0 y 1 ponderados -----	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Impacto del Confinamiento en el NO <sub>2</sub> .....	45
<b>Figura 2:</b> Impacto del Confinamiento en el O <sub>3</sub> .....	45
<b>Figura 3:</b> Impacto del Confinamiento en el NO.....	46
<b>Figura 4:</b> Impacto del Confinamiento en PM <sub>10</sub> .....	47
<b>Figura 5:</b> Impacto de la Fase 0 en el NO.....	48
<b>Figura 6:</b> Impacto de la Fase 0 en el NO <sub>2</sub> .....	49
<b>Figura 7:</b> Impacto de la Fase 0 en el O <sub>3</sub> .....	50
<b>Figura 8:</b> Impacto de la Fase 0 en PM <sub>10</sub> .....	50
<b>Figura 9:</b> Impacto de la Fase 1 en el NO.....	52
<b>Figura 10:</b> Impacto de la Fase 1 en el NO <sub>2</sub> .....	52
<b>Figura 11:</b> Impacto de la Fase 1 en el O <sub>3</sub> .....	54
<b>Figura 12:</b> Impacto de la Fase 1 en PM <sub>10</sub> .....	55
<b>Figura 13:</b> Impacto de la Fase 2 en el NO .....	56
<b>Figura 14:</b> Impacto de la Fase 2 en el NO <sub>2</sub> .....	57
<b>Figura 15:</b> Impacto de la Fase 2 en el O <sub>3</sub> .....	57
<b>Figura 16:</b> Impacto de la Fase 2 en el PM <sub>10</sub> .....	58
<b>Figura 17:</b> Impacto de la Fase 3 en el NO.....	59
<b>Figura 18:</b> Impacto de la Fase 3 en el NO <sub>2</sub> .....	59
<b>Figura 19:</b> Impacto de la Fase 3 en el O <sub>3</sub> .....	60
<b>Figura 20:</b> Impacto de la Fase 3 en el PM <sub>10</sub> .....	61
<b>Figura 21:</b> Impacto de la temperatura en el NO .....	62

<b>Figura 22:</b> Impacto de la temperatura en el O <sub>3</sub> .....	62
<b>Figura 23:</b> Impacto del nivel de precipitaciones en el NO .....	64
<b>Figura 24:</b> Impacto del nivel de precipitaciones en el NO .....	64
<b>Figura 25:</b> Impacto de la ZBE en el NO .....	65
<b>Figura 26:</b> Impacto de la ZBE en el NO <sub>2</sub> .....	66
<b>Figura 27:</b> Impacto de la ZBE en el O <sub>3</sub> .....	67
<b>Figura 28:</b> Impacto de la ZBE en PM <sub>10</sub> .....	67
<b>Figura 29:</b> Impacto del domingo en el NO .....	68
<b>Figura 30:</b> Impacto del domingo en el O <sub>3</sub> .....	69
<b>Figura 31:</b> Impacto de los días festivos en el NO <sub>2</sub> .....	70
<b>Figura 32:</b> Impacto de los días festivos en PM <sub>10</sub> .....	71
<b>Figura 33:</b> Impacto del polvo del Sáhara en PM <sub>10</sub> .....	72
<b>Figura 34:</b> Impacto de la combustión de Biomasa en PM <sub>10</sub> .....	73
<b>Figura 35:</b> Impacto de la combustión de Biomasa en el NO .....	74
<b>Figura 36:</b> Impacto de la combustión de Biomasa en el NO <sub>2</sub> .....	74



## **INTRODUCCIÓN**

La contaminación atmosférica ha pasado de ser una preocupación más al mayor a un auténtico riesgo para la salud. Tal es su importancia que, en 2021, 7 millones de personas murieron prematuramente por la contaminación atmosférica en ciudades y zonas rurales (OMS, 2021).

La contaminación afecta a todos los países del mundo, aunque en distinta medida. Así, la OMS estimó en 2016 que el 91% de las muertes prematuras por contaminación pertenecían a países de ingresos bajos y medianos. Sin embargo, en Europa la contaminación también tiene unas cifras de muertes significativas, pues 307.000 personas murieron de forma prematura en 2019 debido a la exposición a la contaminación por partículas finas en la Unión Europea (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2021).

Esta alta mortandad se debe a que la contaminación tiene efectos gravemente perjudiciales en los sistemas cardiovascular y respiratorio (BACARDIT et al., 2018). Por esta razón, es una necesidad real la toma de medidas para bajar los niveles de contaminación. Tanto es así que, de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, tres guardan relación con la contaminación, pues están dirigidos a la salud y bienestar (ODS 3), hacia una energía asequible y no contaminante (ODS 7), y hacia unas ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) (ONU, 2015).

En este contexto en el que la reducción de la contaminación es una necesidad, los niveles de muchos contaminantes descendieron drásticamente en 2020 debido a los confinamientos declarados para frenar la expansión del coronavirus o Covid-19. El virus que nació en Wuhan, China, en diciembre de 2019 y que ha causado, a fecha de este trabajo, 14,9 millones de fallecimientos (BBC, 2022), se expandió por todo el mundo en menos de tres meses, siendo declarada pandemia por la OMS el 14 de marzo de 2020 y obligando a los gobiernos de los países a tomar medidas drásticas para frenar su expansión.

Entre estas medidas, los distintos países del mundo comenzaron a restringir la movilidad de sus ciudadanos, hasta el punto de imponer un confinamiento domiciliario por el cual no se podía salir de los hogares salvo determinadas excepciones permitidas, tales como hacer la compra. En España, este confinamiento duró del 14 de marzo al 21

de junio de 2020 mediante la declaración, por primera vez en la historia, del estado de alarma.

El Covid-19 ha traído consigo grandes pérdidas humanas y económicas (Banco de España, 2021), pero durante los meses de confinamiento la reducción de la actividad humana conllevó una reducción en los niveles de determinados contaminantes como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) o las partículas atmosféricas de menos de  $10 \mu\text{m}$  e diámetro ( $\text{PM}_{10}$ ), junto con un aumento de los niveles de ozono ( $\text{O}_3$ ) (CÁRCEL-CARRASCO et al., 2021).

La reducción de la contaminación ante la inactividad humana resulta ser una oportunidad para estudiar el impacto concreto de las limitaciones a la movilidad en la contaminación de una ciudad de gran tamaño y población como Barcelona. Así lo han considerado autores de revistas científicas, como TOBÍAS et al., quienes el 5 de abril de 2020 ya mostraron el impacto de las restricciones de movilidad en la contaminación del centro de la ciudad.

Sin embargo, hay numerosas variables que pueden influir en la contaminación de una ciudad, por lo que resulta conveniente analizar el impacto del confinamiento en determinados contaminantes y contrastar los resultados con el impacto que tienen otros fenómenos, tanto naturales como humanos.

De esta manera, la contaminación de una ciudad y sus datos climatológicos guardan una estrecha relación, pues variables climatológicas como la temperatura, los vientos, el nivel de precipitaciones o la humedad pueden afectar a la composición y al transporte de las partículas contaminantes (LI et al., 2011).

Dado que el tráfico rodado es uno de los principales emisores de óxidos de nitrógeno (MITECO, s.f.), la disminución del tráfico es una de las razones por las que los niveles de contaminación descendieron durante las semanas de confinamiento. Resulta relevante a este respecto comparar el impacto que tiene limitar la circulación de determinados vehículos mediante el establecimiento de una zona de bajas emisiones, así como analizar la reducción de la contaminación durante los días no laborables, donde el menor tráfico implica una menor emisión de óxidos de nitrógeno (PARRA, 2017).

Finalmente, hay determinados fenómenos naturales que el ser humano no puede controlar y que pueden tener un gran impacto en la contaminación, tales como los vientos del Sáhara que traen consigo partículas de polvo que forman parte del PM<sub>10</sub> o la combustión de biomasa por incendios forestales (este fenómeno también se produce en fábricas de generación eléctrica o en calefacciones domésticas) que también inciden en la contaminación de una ciudad.

Por todo ello, resulta de gran utilidad analizar el impacto de las distintas variables en la calidad del aire, estudiando su influencia en diversos contaminantes poder detectar. El conocimiento de este impacto puede resultar de gran ayuda para diseñar medidas concretas para frenar la contaminación. En esta línea, detectar las zonas de la ciudad de Barcelona que sean más sensibles a cada variable puede ayudar a comprender aún mejor el impacto de las variables en los contaminantes, posibilitando unas políticas que puedan ser más efectivas, por lo que un análisis espacial muestra un gran interés.

Considerando los elementos expuestos, se ha planteado el siguiente problema de investigación en el medio objeto de estudio:

La ciudad de Barcelona es una ciudad seriamente afectada por la contaminación, debido a los intensos niveles de tráfico, a su atractivo turístico y a su alta actividad diaria.

La hipótesis que se plantea al problema de investigación es:

Las medidas para frenar la expansión del Covid-19 incluyeron unas restricciones de movilidad y una reducción de la interacción social que tuvieron un impacto directo en la calidad del aire de la ciudad de Barcelona en los meses de marzo a junio de 2020.

A partir del planteamiento de dicho problema, el objetivo general de la investigación es:

Realizar un análisis sobre el impacto del confinamiento en la calidad del aire de la ciudad de Barcelona durante las semanas que duró el estado de alarma.

Para el logro de dicho objetivo general, se hace necesario el planteamiento asimismo de los siguientes objetivos específicos:

- (i) Investigar la evolución de la contaminación durante las fases de la desescalada, en las cuales las restricciones comenzaron a mitigarse y el estilo de vida fue acercándose paulatinamente al anterior a la pandemia.
- (ii) Comparar el impacto del confinamiento y las fases de la desescalada con otras variables con impacto en la contaminación, tales como la combustión de biomasa, los vientos del Sáhara, datos climatológicos, días festivos y la Zona de Bajas Emisiones.
- (iii) Estudiar las zonas de la ciudad de Barcelona más sensibles a los cambios en las distintas variables, a fin de determinar dónde son más efectivas las medidas que se puedan tomar para frenar la contaminación.

Este trabajo se realiza con el fin de analizar el impacto que tiene restringir la movilidad de una ciudad en la calidad del aire de una ciudad como Barcelona en comparación con otras medidas que pretenden el mismo objetivo y no tienen el mismo impacto en la vida diaria de los habitantes de una ciudad, y así poder proponer políticas más eficaces relacionadas con las emisiones producidas por el tráfico rodado.

Dado lo expuesto anteriormente, el trabajo se articula en cuatro capítulos, junto con la presente introducción que presenta la justificación del tema, la hipótesis del trabajo, junto con los objetivos y la finalidad del mismo.

El primer capítulo explica la actualidad del tema y la importancia de su estudio. Expone los preocupantes efectos de la contaminación a nivel mundial - y en especial en España – junto con las recomendaciones de la OMS para disminuir los niveles de contaminación atmosférica. Adicionalmente, se presentan algunas medidas tomadas por parte de los organismos reguladores para luchar contra los elevados niveles de las ciudades, tanto a nivel internacional, con normativa y compromisos europeos, como a nivel nacional, en concreto en la ciudad de Barcelona.

El segundo capítulo expone la metodología empleada para el análisis. Comienza explicando la población objeto de estudio, así como las características de la ciudad de Barcelona que resultan de interés para el trabajo. Seguidamente, se desarrollan las fuentes de datos utilizadas para extraer las distintas variables analizadas. Por otra parte, se expone el método de análisis que se ha empleado, junto con los sistemas informáticos que se han utilizado para ello: tratamiento de los datos con Matlab, elaboración de un

modelo de regresión lineal múltiple con Rstudio y la visualización de los datos con Tableau.

El tercer capítulo desarrolla la aplicación de la metodología, mostrando inicialmente las variables seleccionadas y haciendo una explicación de cada una, tanto de sus características como de la razón de su elección para la elaboración del modelo. A continuación, se explica el trabajo previo a la ejecución del modelo, incluyendo la limpieza y unificación de las bases de datos para aplicar el modelo de regresión mediante RStudio. Finalmente, se expone la elaboración de los mapas de zonificación, aportando una breve descripción de las distintas estaciones de calidad del aire para poder comprender e interpretar mejor los resultados obtenidos.

El cuarto capítulo muestra los resultados de la ejecución del modelo. Se realiza un doble análisis de los resultados, numérico y espacial. En primer lugar, se analiza cada contaminante, estudiando aquellas variables que han tenido un mayor coeficiente, es decir, un mayor impacto – positivo o negativo – en la presencia de cada contaminante. En segundo lugar, se realiza el análisis espacial de los resultados, estudiando cada variable para ver en qué zonas de Barcelona ha tenido una mayor influencia respecto de los distintos contaminantes, analizando en especial las diferencias entre el interior y el exterior de la ciudad y comparando los diferentes impactos que han tenido las variables por zonas.

En último lugar, las conclusiones recogen la interpretación de los resultados, las variables con más influencia y las zonas más sensibles a los cambios, reconociendo las limitaciones que ha tenido el trabajo y proponiendo nuevas líneas de investigación futuras que estudien en profundidad la relación de la calidad del aire con determinadas variables.

## **CAPÍTULO I: ACTUALIDAD DEL TEMA**

La contaminación atmosférica es uno de los mayores peligros del S. XXI, caracterizada por afectar a personas de distinta condición cultural, social o económica. Las nuevas directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire (OMS, 2021) explican que su presencia es notoria en las grandes ciudades por el tráfico rodado, pero que son las poblaciones con menores recursos económicos las más afectadas. Asimismo, no es solamente la contaminación exterior la que debe preocupar, pues el humo de los hogares causado por la quema de biocombustibles y carbón emiten partículas contaminantes que afectan a 2.600 millones de personas.

La razón por la que la contaminación atmosférica es tan preocupante es por sus graves efectos en la salud. Se ha demostrado que la continua exposición a contaminantes guarda una gran relación con el aumento de enfermedades cardiovasculares y la elevación de la presión arterial (BACARDIT et al., 2018,), aumenta la vulnerabilidad del sistema respiratorio (MÉNDEZ-ROJAS et al., 2019) y afecta de manera especial al asma de los menores de edad (YOHANNESSEN & UBILA, 2021).

Debido a estos perjudiciales efectos, la OMS ofrece unos valores recomendables sobre la calidad del aire, fijando unos límites orientativos sobre la concentración máxima de cada contaminante. No obstante, en 2019, el 99% de la población mundial vivía en lugares donde no se respetaban estos límites (OMS, 2021). Los efectos de no cumplir las directrices de la OMS son realmente preocupantes, pues en el 58% de las 178.000 muertes prematuras causadas en la Unión Europea por la contaminación en 2019 se podrían haber evitado de haberse respetado los límites establecidos por la OMS (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2021).

Para luchar contra esta realidad, los organismos reguladores se han propuesto firmemente reducir los niveles de contaminación de sus respectivos estados. A nivel europeo, opera como marco la Directiva 2016/2284, relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, la cual impone unos compromisos de mejora de calidad del aire a los Estados miembros. Sin embargo, dando un paso más hacia la reducción de la contaminación, la presidenta de la Comisión Europea, Úrsula Von der Leyen, afirmó en su discurso del Estado de la Unión ante el Parlamento Europeo de 2020 la propuesta de reducir un 55% las emisiones contaminantes

en la Unión Europea para 2030. Afirma que es un compromiso ambicioso, pero necesario a la par de posible si se aúnan esfuerzos entre las industrias y los organismos reguladores.

En España, este compromiso se ha articulado a través del Real Decreto 818/2018, sobre medidas para la reducción de las emisiones nacionales determinados contaminantes atmosféricos, destacando el compromiso de disminución de emisión de óxidos de nitrógeno y de partículas finas. Esta norma establece el I Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCCA), el cual incluye 57 medidas de distintos sectores orientadas a la consecución de las recomendaciones europeas para 2020.

En Barcelona, la exposición a NO<sub>2</sub> y a las partículas PM<sub>2,5</sub> provoca alrededor de 1000 (7% de las muertes anuales), 110 casos de cáncer (11%) y 525 casos de asma infantil (33%) (Agencia de Salud Pública de Barcelona, 2019). Debido a estas preocupantes cifras, el Ayuntamiento de Barcelona, junto con el Gobierno de la Generalitat, han tomado medidas durante los últimos años, como declarar la Zona de Protección Especial del Ambiente Atmosférico o el Plan de Mejora de Calidad el Aire en la región metropolitana de Barcelona (Direcció General de Qualitat Ambiental, 2015), orientadas principalmente a la reducción del tráfico rodado en las zonas céntricas de la ciudad, pues es el principal causante de que Barcelona transgreda todos los años los límites impuestos por la UE (RODRÍGUEZ Y ORDAZ, 2020). Entre dichas medidas el destaca la demarcación de la Zona de Bajas Emisiones (ZBE) el 1 de enero de 2020, la cual se explicará en profundidad más adelante.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

### 1. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Para realizar el trabajo se ha seleccionado la ciudad de Barcelona. La ciudad condal cuenta con una población de 1.636.732 personas y con una superficie de 101,35 km<sup>2</sup> (Idescat, 2021). Con una densidad de 16.149,3 habitantes por km<sup>2</sup>, es la segunda ciudad más importante de España, solamente por detrás de Madrid, la capital.

Respecto a su climatología y características geográficas, Barcelona es una ciudad costera que limita al este con el Mar Mediterráneo, por lo que presenta una baja altitud y una climatología estable. Según la clasificación de Köppen-Geiger – clasificación utilizada a nivel mundial que diferencia cinco tipos de climas con sus respectivos subtipos (Köppen & Geiger, 1936) – Barcelona presenta un clima de tipo templado y de subtipo mediterráneo típico. Esto significa que la capital catalana se caracteriza por presentar unos rangos de temperatura moderados y unas rachas de viento estables.

De esta manera, los inviernos no son especialmente fríos (la temperatura media ronda los 10°C) y los veranos son cálidos sin considerarse sofocantes (temperatura media de 25°C, con una máxima de 33°C por lo general) (Alarcón Ruiz de la Fuente, 2021). La proximidad al mar posibilita esta moderación en los rangos de temperatura, si bien aumenta la sensación térmica debido a la presencia de humedad. Estas temperaturas han aumentado durante la última década, estableciéndose en 2020 una temperatura media de 18,3°C en comparación con los 17,8°C de 2012 (Idescat, 2021). En lo referente a las precipitaciones, estas son estables a lo largo del año debido a la proximidad del mar, situándose en 600 mm de media anual.

Uno de los rasgos más significativos de la ciudad de Barcelona es ser la capital de la comunidad autónoma de Cataluña, la cual tuvo un PIB en 2020 de 212.931 millones de euros, situándose como la segunda comunidad autónoma de España por volumen de PIB (Expansión, 2022). Barcelona es una ciudad que destaca por su actividad industrial, su fuerte tradición cultural y por ser un destino turístico de gran atractivo, debido a su historia, tradición cultural, actividad y clima. Reflejo de ello es el tráfico de pasajeros por su aeropuerto, Barcelona-El Prat, el cual llegó a un volumen de 18,9 millones de pasajeros en 2021, cifras inferiores a las anteriores a la pandemia del Covid-19, donde se alcanzaban valores superiores a los 50 millones de pasajeros (Orús, 2022).



En este sentido, Barcelona contaba en 2020 con 3.906.801 vehículos entre turismos, autobuses, motocicletas, camiones, tractores industriales, ciclomotores, remolques y semirremolques (Idescat, 2021). El gran tráfico rodado de esta ciudad hace recomendable estudiar el impacto de las medidas de restricción de movilidad, así como su comparación con otras variables que implican la reducción del tráfico tales como los días no laborables o la implementación de la ZBE.

Sobre los datos expuestos, Barcelona presenta unas cualidades adecuadas para estudiar el impacto de las medidas impuestas para frenar la expansión del Covid-19 en la contaminación de la ciudad y compararlo con el impacto de otras variables.

## 2. FUENTES DE LOS DATOS

Para elaborar la base de datos sobre la que aplicar el modelo de regresión, se han extraído datos climatológicos e información sobre sucesos naturales como los episodios de vientos del Sáhara o la combustión de biomasa. Para ello se han empleado fuentes oficiales que aporten datos fiables sobre los distintos fenómenos estudiados.

### **Datos de calidad del aire**

Para los datos de la calidad del aire, se ha obtenido la información de las estaciones de calidad del aire de la ciudad de Barcelona recogidas en la página oficial de la Generalitat de Catalunya. Las estaciones de calidad del aire estudian la presencia de diferentes contaminantes a lo largo del día. Para realizar este estudio, se han extraído las cifras diarias de presencia de ozono (O<sub>3</sub>), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en las estaciones de Ciudadela, Ensanche, Sants, Gràcia – Sant Gervasi, Parque del Valle de Hebrón, Observatorio Fabra y Poblenou.

### **Datos climatológicos**

Para los datos climatológicos, se ha utilizado la información de la Agencia Española de Meteorología (AEMET). Las cifras se han extraído de la base de datos AEMET OpenData, una API REST de la que se puede descargar la información climatológica diaria de estaciones repartidas en todo el territorio español. Los datos diarios que ofrece AEMET son: temperatura (máxima, mínima y media junto con las horas de máxima y mínima), nivel de precipitaciones por hora, viento (rachas máximas y mínimas, horas y direcciones de dichas rachas), presión (valores máximos y mínimos y

sus horas) y valor de la insolación por horas. De las estaciones de España, se han utilizado las estaciones de la ciudad de Barcelona: Barcelona – el Raval, Observatorio Fabra, Arenys de Mar, Aeropuerto, Manresa y Santa Susanna.

### **Datos de fenómenos naturales**

Para los datos sobre la presencia del Polvo del Desierto del Sáhara y de la combustión de biomasa, se han utilizado estudios oficiales del Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Específicamente, se han utilizado los informes anuales de calidad del aire para los años 2018, 2019 y 2020. Estos estudios analizan la calidad del aire de la Península Ibérica, dividiéndolo en zonas (Canarias, suroeste, sureste, levante, centro, noroeste, norte, noreste y Baleares) y estudiando distintos fenómenos naturales, tales como la presencia de vientos subsaharianos o la combustión de biomasa en incendios forestales, entre otros.

El estudio ofrece información mensual sobre los días en los que se han detectado dichos fenómenos, así como su impacto, prestando especial importancia a la repercusión que estos fenómenos puedan tener en la presencia de  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ .

## **3. MÉTODO DE ANÁLISIS**

### **3.1 Formateo de los datos con Matlab**

Matlab (acrónimo de Matrix Laboratory) es un entorno de programación desarrollado por Mathworks (PUCP, s.f.). Entre sus diferentes utilidades se incluyen el desarrollo de algoritmos, la realización de cálculos numéricos, el análisis y visualización de datos y la creación de apps. Matlab es una herramienta utilizada en el campo científico debido a sus múltiples utilidades, tales como el diseño de control, el procesamiento de señales, la creación de modelos de Machine Learning y Deep Learning o el procesamiento de imágenes.

Dentro de las características de Matlab, destaca su capacidad y sencillez para el manejo de matrices, hasta tal punto que la herramienta fue originalmente diseñada para tratar este tipo de datos (García et al, 2018). Debido a la presencia de funciones ya desarrolladas que pueden ser utilizadas por el usuario, junto con la posibilidad de creación de funciones y algoritmos, Matlab permite un tratamiento de los datos de manera versátil y funcional, adaptado a las necesidades del usuario.

Para el procesamiento de datos, Matlab posee funciones de importación y exportación de datos que permite interaccionar con otras herramientas como Microsoft Excel o con otros lenguajes de programación como C o Java. Esta facilidad de interacción es una de las facultades de Matlab que la hacen una herramienta recomendable para el tratamiento y formateo de archivos con grandes volúmenes de datos.

### **Modelo de regresión con RStudio**

La regresión lineal múltiple es un método de análisis estadístico que permite estudiar la relación entre una variable dependiente ( $y$ ) y un conjunto de variables independientes ( $x_1, x_2, x_3$ , etc.). Es una extensión del clásico modelo de regresión simple, donde se pueden añadir tantas variables como se estime necesario. Puesto que en la realidad lo normal es que un fenómeno dependa de numerosas variables, el modelo de regresión múltiple se aproxima más a un análisis real (Rodríguez-Jaume, 2001).

El modelo de regresión múltiple estudia el efecto marginal de las variables independientes en la variable dependiente. Para ello, se realiza un análisis de los coeficientes de las variables independientes a raíz de una combinación lineal que tiene la siguiente estructura:

$$Y = B_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + \dots + B_J * X_J + U$$

siendo  $b_i$  el efecto marginal de cada variable independiente y  $u$  el residuo o error.

Las variables independientes que se estudian pueden ser de dos tipos, continuas o discretas. Dentro de las discretas, destacan las denominadas dicotómicas o *dummies*. Son aquellas variables que toman valor 1 si un fenómeno sucede, y 0 en el caso contrario. Por tanto, frente a variables continuas que analizan hechos que tienen un determinado rango (temperatura, edad, peso), las variables dicotómicas resultan de gran utilidad para estudiar los hechos que se quieren analizar de manera categórica, es decir, si suceden o no (enfermedad, muerte).

Para realizar el modelo de regresión se ha utilizado RStudio, la cual es una interfaz de R, un entorno de programación enfocado al análisis estadístico y de software libre (GNU General Public License) (Sánchez Santos, 2015). El entorno R es uno de los más utilizados en el mundo de la estadística debido a sus diversas utilidades, tales como el desarrollo de algoritmos, la visualización de datos y la posibilidad de acceder a archivos

externos, incluso los basados en la web, para capturar documentos, datos y gráficos. R cuenta con numerosos paquetes de algoritmos desarrollados por usuarios y accesibles para el resto de usuarios.

A la hora de construir el modelo en RStudio, los valores que se muestran son los siguientes: (i) estimación puntual del efecto marginal; (ii) error estándar, que refleja la diferencia entre la estimación y el valor real; (iii) el valor del estadístico t, el cual es el resultado de dividir el valor de la estimación puntual entre el error estándar, utilizado para realizar el contraste de significación individual de los parámetros estimados (Zach, 2021); y (iv) el p-valor, que refleja la significación estadística de cada coeficiente estimado según el nivel de significación que se establezca para el modelo.

*Ilustración: Ejemplo de modelo de regresión realizado en RStudio*

```
Call:
lm(formula = formula_modelo, data = fichero_leer)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.4976 -0.2355  0.0106  0.2407  1.1784

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.063028   0.030257  101.233 < 2e-16 ***
PRECIP      -0.008595   0.001510   -5.691 1.55e-08 ***
TEMP         0.012610   0.001763    7.153 1.39e-12 ***
SAHARA       0.293408   0.025956   11.304 < 2e-16 ***
BIOMASA      0.288863   0.037997    7.602 5.48e-14 ***
```

*Fuente: Elaboración propia*

## Visualización de datos con Tableau

Tableau es una plataforma de inteligencia de negocios que permite crear visualizaciones de datos con las cuales el usuario puede interactuar mediante la creación de filtros, la conexión de variables a través de los campos calculados o la comparación de datos (Monzón, 2018). Tableau permite conectarse a múltiples fuentes de datos, a partir de las cuales se pueden crear paneles de visualizaciones que facilitan el análisis visual de resultados estadísticos.

Una de las fortalezas de Tableau es el amplio rango de visualizaciones posibles que ofrece, desde gráficos tradicionales de barras o gráficos de dispersión hasta mapas de calor, diagramas de campos y valores o gráficos de burbujas. Entre las posibilidades que ofrece, se puede destacar la realización de análisis espaciales mediante mapas geográficos. Si la fuente de datos incluye la información geográfica (latitud y longitud) de las observaciones que se desean analizar, Tableau las ubica en un mapa geográfico

simplemente etiquetando la latitud y longitud como función geográfica. Una vez ubicados, Tableau permite modificar la visualización y adaptarla a las necesidades mediante las utilidades ya mencionadas (filtros, campos calculados, etc.), así como alterar sus atributos como color, forma o tamaño.

## CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

### 1. CONJUNTO DE DATOS

#### **Variable dependiente: contaminación diaria**

El modelo de regresión utilizado analizar el impacto de distintas variables independientes en la variable dependiente “CONT\_DIARIA”. Esta variable recoge la contaminación media diaria de cada contaminante en cada estación de calidad del aire. La unidad de medición es microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), unidad utilizada para expresar los valores de contaminación a nivel científico y legislativo (OMS, 2021). Respecto a los contaminantes analizados, se han escogido los siguientes:

#### *A) Óxidos de Nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>)*

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son aquellas combinaciones entre los gases oxígeno y nitrógeno. Estos gases están presentes en el día a día de las personas, ya que son inhalados inconscientemente de manera frecuente, como en las cocinas de gas o en el uso de chimeneas. Sin embargo, estos gases son producidos a elevados volúmenes por la combustión en el tráfico de vehículos motorizados, así como en otros medios de transporte o en instalaciones de generación de electricidad (MITECO).

Inhalar estos gases puede tener severos efectos perjudiciales en la salud humana, desde irritaciones en los pulmones hasta quemaduras y espasmos, siendo desconocidos todos sus efectos como, por ejemplo, su impacto en la fertilidad (ATSDR, 2002). En cuanto a sus efectos medioambientales, perjudica seriamente la formación de vegetales y agudiza la acidificación de ecosistemas. Adicionalmente, estos gases son especialmente amenazadores por ser uno de los principales responsables de la formación de lluvia ácida, así como por su contribución a la formación de otros contaminantes secundarios, como el ozono.

Su presencia, casi imperceptible en ocasiones, en la vida cotidiana y sus diversas fuentes hacen recomendable su estudio, así como el análisis del efecto que han tenido las distintas medidas tomadas para frenar la presencia de estos gases.

#### *B) Ozono (O<sub>3</sub>)*

El ozono es un contaminante secundario, es decir, proveniente de precursores como los óxidos de nitrógeno y determinados compuestos orgánicos volátiles (MITECO, s.f.). Estos contaminantes primarios tienen su origen en actividades humanas como el tráfico, las industrias o las calefacciones domésticas.

Su procedencia, así como sus efectos perjudiciales (irritación e inflamación del sistema respiratorio, empeoramiento del asma, entre otros) hacen que el estudio del ozono sea siempre relevante a la hora de analizar el impacto de conductas humanas en la contaminación. Adicionalmente, otra característica relevante del ozono es su gran velocidad de formación en aquellos lugares con alta radiación solar. Este hecho hace su estudio en España, uno de los países de Europa con mayor radiación solar, aún más interesante.

Finalmente, cabe destacar su mayor presencia en zonas rurales respecto a las zonas urbanas debido a que la oxidación de monóxido de nitrógeno a dióxido de nitrógeno consume ozono para convertirlo en oxígeno, por lo que en las zonas urbanas con mayores niveles de monóxido de nitrógeno el ozono se reduce con mayor facilidad. Esto provoca que también tenga más presencia durante los fines de semana que en los días laborables, debido a la caída de los óxidos de nitrógeno por la disminución de los niveles de tráfico. Estas dos últimas características serán especialmente analizadas en el apartado de resultados cuando se analicen visualmente las influencias de las variables en las distintas estaciones de Barcelona.

### C) $PM_{10}$

Las  $PM_{10}$  o partículas volátiles (Sánchez Caraballo, 2012) aglutinan una amplia variedad de partículas que presentan diversidad de origen y efectos, con la característica común de medir menos de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro. Así, las partículas  $PM_{10}$  pueden ser orgánicas o inorgánicas, sólidas o líquidas, por lo que sus características físicas y químicas varían entre ellas. Respecto al origen, estas partículas pueden producirse de forma natural (polvo, partículas del suelo que se levantan) o como resultado de la actividad humana (quema de neumáticos, combustión de motores antiguos, procesos industriales, calefacción de las casas). Adicionalmente, las partículas  $PM_{10}$  pueden producirse de forma secundaria, como resultado de reacciones químicas de gases precursores como son el dióxido de azufre, el amoníaco o los óxidos de nitrógeno.

Dichas características y su relación con el tráfico y la movilidad humana hacen conveniente su estudio en este trabajo. Adicionalmente, este contaminante tiene una presencia especial en España por un hecho que le diferencia del resto de Europa: el gran impacto de los vientos del Sahara que traen consigo ingentes cantidades de estas partículas.

Por último, estas partículas parecen ser estudiadas por sus perjudiciales efectos en la salud humana. Debido a su pequeño diámetro, estas partículas pueden ser inhaladas y penetrar el sistema respiratorio, afectando especialmente a las personas con enfermedades respiratorias. Respecto a sus consecuencias climáticas, la concentración de estas partículas trae consigo un aumento de los niveles de temperatura (Espinoza & Tito, 2019).

#### *D) PM<sub>2,5</sub>*

Al igual que en el caso de las partículas PM<sub>10</sub>, bajo el contaminante PM<sub>2,5</sub> se recoge una alta variedad de partículas en suspensión cuya característica en común es que su diámetro es siempre menor de 2,5 µm. En lo que respecta a su formación, se puede replicar lo mencionado en las partículas PM<sub>10</sub>, si bien estas partículas son especialmente peligrosas, pues su menor tamaño facilita su mayor penetración en el sistema respiratorio (Sánchez Caraballo, 2012). De esta manera, las partículas PM<sub>2,5</sub> pueden llegar hasta los alveolos, causando importantes deficiencias respiratorias.

De estos efectos se desprende el interés de su estudio. Sin embargo, como hemos comentado en apartados anteriores, este trabajo ha querido realizarse sobre fuentes de datos oficiales y, por diversas razones desconocidas, de todas las estaciones de calidad del aire solamente una recogía datos del contaminante PM<sub>2,5</sub>, y únicamente para los meses abril a noviembre de 2021. Por tanto, para que el estudio sea consistente, se ha prescindido de este contaminante, focalizando en los contaminantes anteriores.

#### **VARIABLES INDEPENDIENTES**

Dentro de las variables independientes, encontramos variables continuas (temperatura y nivel de precipitaciones) y dicotómicas para representar la existencia o no de un fenómeno concreto que se ha considerado potencialmente relevante en la contaminación de una ciudad para los contaminantes seleccionados. La siguiente tabla muestra las variables independientes, su tipología y su medición, junto con una breve



descripción de las mismas. En ella se muestran las variables climatológicas (temperatura y nivel de precipitaciones), las medidas del Covid-19 (confinamiento y fases de la desescalada), los días no laborables (sábado, domingo y festivos), la presencia de vientos del Sáhara, la combustión de biomasa y la Zona de Bajas Emisiones.

*Tabla 1: Descripción de las variables independientes*

<b>NOMBRE</b>	<b>TIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>TEMP</b>	Numérica continua	Temperatura media diaria	Grados Celsius
<b>PRECIP</b>	Numérica continua	Precipitación diaria media de 07:00 horas a 07:00 horas	Milímetros (mm)
<b>CONFINAMIENTO</b>	Dicotómica	Medida de confinamiento por COVID-19, desde el 15 de marzo de 2020 hasta el 21 de junio de 2020	1/0
<b>FASE 0</b>	Dicotómica	Fase 0 de la desescalada durante el confinamiento por COVID-19, desde el 4 de mayo de 2020 hasta el 24 de mayo de 2020	1/0
<b>FASE 1</b>	Dicotómica	Fase I de la desescalada durante el confinamiento por COVID-19, desde el 25 de mayo de 2020 hasta el 7 de junio de 2020	1/0
<b>FASE 2</b>	Dicotómica	Fase II de la desescalada durante el confinamiento por COVID-19, desde el 8 de junio hasta el 17 de junio de 2020	1/0
<b>FASE 3</b>	Dicotómica	Fase III de la desescalada durante el confinamiento por COVID-19, desde el 18 de junio de 2020 hasta el 21 de junio de 2020	1/0
<b>SAB</b>	Dicotómica	Sábado	1/0
<b>DOM</b>	Dicotómica	Domingo	1/0
<b>FESTVO</b>	Dicotómica	Festivo	1/0

<b>SAHARA</b>	Dicotómica	Episodios naturales de transporte de material particulado en suspensión desde el norte de África	1/0
<b>BIOMASA</b>	Dicotómica	Combustión de biomasa en incendios forestales	1/0
<b>ZBE</b>	Dicotómica	Zona de Bajas Emisiones de Barcelona (Área Metropolitana de Barcelona, s.f.), activa desde el 1 de enero de 2020	1/0

*Fuente: Elaboración propia*

#### *A) Medidas Covid-19*

Para analizar el impacto del Covid-19 en la contaminación de Barcelona se han establecido como variables dicotómicas las siguientes: el período de estado de alarma durante el cual hubo distintas fases de confinamiento y desescalada que comprendió del 15 de marzo al 21 de junio de 2020 y las distintas fases de desescalada más concretas.

La regulación de las fases de la desescalada fue diferente según la comunidad autónoma, y aún dentro de la comunidad autónoma algunas ciudades (como fue el caso de Barcelona) fueron a un ritmo distinto, por lo que se han utilizado las variables “FASE 0”, “FASE 1”, “FASE 2” y “FASE 3” para ver el impacto que tuvieron en los distintos contaminantes las diferentes fases de la desescalada. Como cada fase implicaba un mayor nivel de movilidad, tras el análisis de los contaminantes se ha podido observar cuáles son las medidas que más frenaron o aceleraron la contaminación, lo cual ha permitido llegar a las conclusiones que se exponen al final del trabajo.

#### *B) Condiciones climáticas*

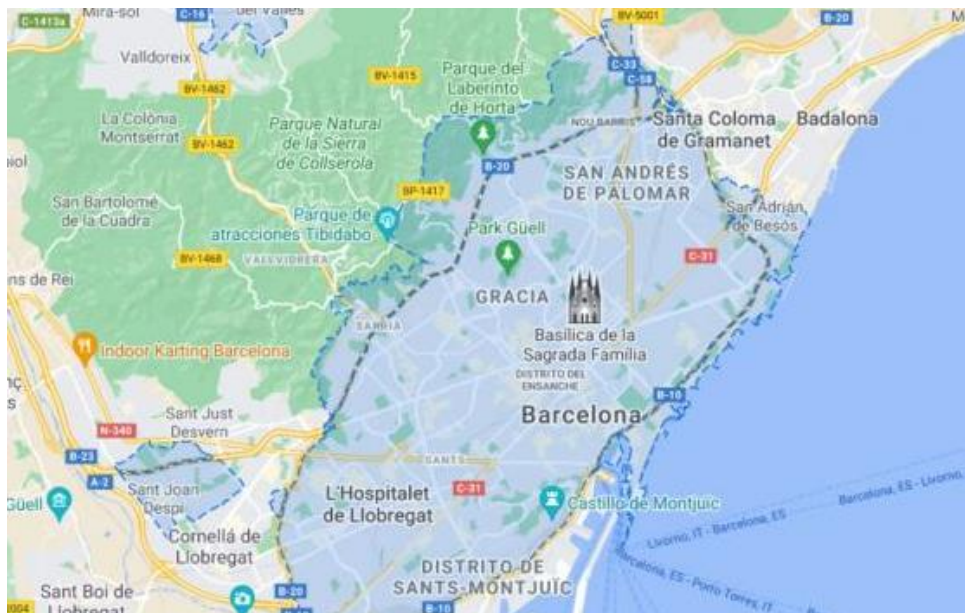
La contaminación y el clima tienen una gran correlación, puesto que la contaminación es una de las principales causas del cambio climático. Así lo ha recordado recientemente el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la ONU (IPCC, 2022) en su informe anual *Cambio Climático 2021: Bases físicas*, explicando que las actividades humanas que aumentan la contaminación afectan directamente al clima. Sabiendo que la correlación viene explicada por la influencia de la contaminación en el clima, se ha decidido analizar si el clima influye asimismo en la

contaminación. De esta manera, se han incorporado el análisis la temperatura (“TEM”) y el nivel de precipitaciones diarios (“PRECIP”) como variables para poder analizar si los incrementos o disminuciones de estas variables influyen en la contaminación de Barcelona.

### C) Zona de Bajas Emisiones

La “ZBE” representa la existencia de Zona de Bajas Emisiones de Barcelona, un área de 95 km<sup>2</sup> dentro de la ciudad en la cual se han establecido progresivas restricciones de circulación. Entre ellas, destaca la restricción de circulación permanentes a partir del 1 de enero de 2020 para turismos, motos y ciclomotores sin etiqueta ambiental durante los días laborables. Dado que esta medida afecta a vehículos específicos en distintos períodos de tiempo y puede sufrir modificaciones reglamentarias, se ha seleccionado como variable dicotómica, dándole un valor de 1 a partir del 1 de enero de 2020. De esta manera, se puede comparar una paralización total durante el confinamiento frente a una reducción en la movilidad de determinados vehículos.

*Ilustración: Área de Bajas Emisiones de Barcelona*



*Fuente: Área Metropolitana de Barcelona*

### D) No laborables

Las variables sábado (“SAB”), domingo (“DOM”) y día festivo (“FESTIVO”) se han seleccionado para explorar el impacto de cada día en los niveles de los contaminantes.

La movilidad al viajar, el cese de desplazamientos por cuestiones laborales, la interrupción de fábricas o la menor utilización de electricidad son distintos aspectos que afectan a la contaminación..

#### *E) Vientos del Sáhara y combustión de biomasa*

“SAHARA” y “BIOMASA” representan la advección de polvo del Sáhara en la ciudad de Barcelona y la combustión de biomasa como causa de incendios forestales que emiten partículas a la atmósfera.

Respecto a los vientos del Sáhara, estos traen consigo partículas del norte de África que aumentan de manera considerable los niveles de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>. A través de la detección de episodios naturales de aportes transfronterizos de partículas, se detectan los meses en los que estos vientos tienen mayor fuerza (suelen corresponder con los meses más cálidos como junio, julio y agosto), así como el impacto de la presencia de estos vientos en los niveles de los contaminantes.

En lo referente a la combustión de biomasa, esta es una de las fuentes de energía renovables líderes en España. A modo de ejemplo, en 2016 el 19,0% de la producción interior de energía primaria en España provino de la combustión de biomasa, biocarburantes y residuos. (INE, 2018). A pesar de su gran utilidad, los considerables beneficios energéticos de esta fuente no están exentos de peligros para la salud. A modo de ejemplo, en un estudio realizado entre la población rural española, el 20% de los pacientes que presentaron enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) tuvieron como único factor de riesgo la exposición a la combustión de biomasa (Golpe et al., 2016).

Por estas razones, se ha decidido incluir como variables dicotómicas la presencia de ambos fenómenos.

## 2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

### **Tratamiento de los datos climatológicos con Matlab**

Con el fin de tener un conjunto de datos ordenado para poder aplicar el modelo, es imprescindible unificar todos los datos en un mismo formato.

Para ello, el primer paso relevante fue exportar los datos climatológicos a un archivo Excel para poder ser tratados de manera similar a los distintos datos. Puesto que los archivos obtenidos de la AEMET estaban contenidos en distintos archivos de texto (extensión TXT), a través de Matlab se exportaron con el formato Excel para poder ser filtrados y añadidos a los datos de calidad del aire.

Como resultado, los datos climatológicos terminaron agrupados en un fichero por cada estación, con las distintas observaciones climatológicas (altitud, temperaturas media, mínima y máxima, nivel de precipitaciones, dirección del viento, velocidad media del viento, horas de temperatura mínima y máxima) ordenadas cronológicamente, desde el 9 de noviembre de 2021 hasta el 9 de marzo de 2018 (períodos que se seleccionaron de manera previa, como se explicará más adelante).

### **Unificación y limpieza de datos**

Un elemento esencial a considerar cuando se realiza un análisis descriptivo es el acotamiento temporal de las observaciones. Por ello, debido a la información que se disponía del clima y de la contaminación, se ha seleccionado un horizonte temporal de tres años y medio, del 9 de marzo de 2018 hasta el 9 de noviembre de 2021. De esta manera, se pueden estudiar los niveles de contaminación durante los dos años previos a la aparición del Covid-19, durante el tiempo de las medidas de confinamiento y desescalada, así como durante un año y medio más tarde.

Para la obtención de la variable dependiente se ha calculado una media diaria de la contaminación (las estaciones de calidad del aire recogen los niveles de contaminación cada hora). Puesto que cada estación de calidad del aire ofrece información de diferentes contaminantes, se han separado los datos en función de estación y contaminante. De esta manera, en cada conjunto de datos se tiene como variable dependiente la contaminación diaria de un contaminante concreto en una estación meteorológica.

*Ilustración: Organización de los conjuntos de datos*



*Fuente: Elaboración propia*

Una vez obtenida la variable dependiente, se le han añadido en los conjuntos de datos las distintas variables independientes. Todas las variables dicotómicas tienen un 1 en caso de que se dé el fenómeno (festivo, presencia de viento del Sáhara, fase de la desescalada, etc.) y 0 en caso contrario. Respecto de las variables climatológicas, se ha realizado un estudio de las distancias geográficas entre estaciones climatológicas y estaciones de calidad del aire en base a su latitud y longitud. De esta manera, se han asignado a las estaciones de calidad del aire los datos de las estaciones climatológicas más próximas. Como resultado, quedaron relacionadas las siguientes estaciones:

*Tabla 2: Estudio de distancias geográficas entre estaciones climatológicas y estaciones de calidad del aire*

ESTACIÓN CLIMÁTICA/ESTACIÓN CALIDAD DEL AIRE	Ciudadela	Ensanche	Gràcia-Sant Gervasi	Observatorio Fabra	Palacio Real	Parque del Valle de Hebrón	Poblenou	Sants
Barcelona - el Raval	<b>1,66</b>	<b>1,17</b>	<b>2,04</b>	5,30	4,40	4,97	<b>3,79</b>	<b>2,95</b>
Observatorio Fabra	6,38	4,45	3,30	<b>0,00</b>	<b>3,52</b>	<b>2,19</b>	6,92	4,48
Arenys de Mar	36,91	39,25	38,44	39,42	41,79	37,25	34,61	41,08
Aeropuerto	14,11	12,29	13,54	14,60	11,10	16,08	16,51	10,79
Manresa	47,01	45,45	44,21	41,00	43,48	41,51	46,41	45,09
Santa Susanna	51,60	53,99	53,22	54,24	56,58	52,06	49,33	55,83

*Fuente: Elaboración propia*

Como se puede observar, las estaciones climatológicas de Barcelona – el Raval y de Observatorio Fabra son aquellas que han aportado los datos climatológicos por ser las más cercanas a la mayoría de las estaciones de calidad del aire. No obstante, se ha comprobado que, para la estación meteorológica del Observatorio Fabra, los valores faltantes de las precipitaciones eran superiores a un 10%, por lo que para aquellas estaciones de calidad del aire cuyos datos climatológicos se correspondían con los del Observatorio Fabra (Observatorio Fabra, Parque del Valle de Hebrón y Palacio Real),

solamente se ha añadido la variable de temperatura, prescindiendo de la variable de nivel de precipitaciones.

### Limpeza de datos

Una cuestión importante ha sido el tratamiento de valores vacíos mediante interpolación lineal. Como ya se ha explicado, se ha tenido que prescindir de las precipitaciones para las estaciones cercanas al Observatorio Fabra. Respecto de los valores de contaminación, había asimismo valores vacíos. Estos valores vacíos pueden deberse a multitud de causas: fallos de las estaciones, errores en el traspaso de datos, reformas puntuales de estaciones que impiden medir la contaminación, etc. Esta es una de las principales limitaciones de este trabajo, la dependencia del efectivo funcionamiento de las estaciones de calidad del aire.

Para aquellas estaciones donde ha sido posible, los valores de contaminación faltantes se han tratado por interpolación lineal, utilizando la media de los extremos. De esta manera, se han tratado valores vacíos aislados, así como series de dos, tres o hasta cinco valores vacíos consecutivos. Mediante el estudio de valores vacíos se ha decidido prescindir de aquellos conjuntos de datos en los cuales había una cantidad de valores vacíos seguidos que no resultaba permisible.

*Tabla 3: Valores vacíos por contaminante y estación*

ESTACIÓN / CONTAMINANTE	NO	NO2	Ozono	PM10
Ciudadela	8	8	15	-
Ensanche	5	5	17	9
Gràcia - Sant Gervasi	0	0	4	97
Observatorio Fabra	12	12	27	238
Palacio Real	<b>100</b>	<b>103</b>	<b>78</b>	<b>122</b>
Parque del Valle de Hebrón	13	13	9	<b>46</b>
Poblenou	4	4	-	4
Sants	20	20	-	-

*Fuente: Elaboración propia*

En el estudio de los valores vacíos se han llegado a los siguientes valores que pueden causar problemas:

- (i)  $PM_{10}$  en Gràcia – Sant Gervasi: el volumen elevado de valores nulos se debe a que los datos comienzan el 4 de junio de 2018, por lo que hay 92 valores nulos que representa una muestra más pequeña, pero utilizable. Simplemente son valores vacíos reales 5 aislados, por lo que se puede estudiar de manera fiable este contaminante en esta estación
- (ii)  $PM_{10}$  en Observatorio Fabra: de manera similar al caso anterior, la cantidad de valores vacíos es elevada, si bien se debe a que los datos comienzan el 5 de octubre de 2018, por lo que 211 valores nulos expresan una muestra más pequeña pero utilizable. Respecto de los 27 valores vacíos restantes, en ninguno de los casos es más de 4 valores seguidos, por lo que se pueden aproximar por interpolación lineal.
- (iii) Estación Palacio Real: en todos los contaminantes de esta estación hay presencia de series superiores a 20 valores vacíos consecutivos, donde una interpolación lineal sería muy imprecisa.
- (iv)  $PM_{10}$  en Parque del Valle de Hebrón: a pesar de ser un número reducido de valores vacíos (3,4%), la longitud de la cadena de valores vacíos consecutivos impide una interpolación lineal realista.

De esta manera, respecto del planteamiento inicial se ha considerado conveniente descartar la estación de calidad del aire Palacio Real debido a la cantidad elevada de valores vacíos seguidos que impedía una aproximación por interpolación lineal realista. Asimismo, en el caso del  $PM_{10}$  en la estación Parque del Valle de Hebrón, a pesar de la reducida cantidad de valores vacíos, se ha considerado conveniente prescindir del estudio de este contaminante en esta estación por el peligro de perjudicar las conclusiones finales.

### **Aplicación del modelo de regresión**

Una vez tratados los datos y habiendo prescindido de las variables y de las observaciones que podían limitar al estudio, se ha realizado el modelo de regresión múltiple con el fin de desarrollar un análisis explicativo de los niveles de contaminación.



A la hora de implementar el modelo, como variable dependiente se ha utilizado el logaritmo neperiano de los niveles de contaminación y las variables ya explicadas como variables independientes. Al aplicar el modelo, además de los valores explicados en el capítulo anterior, se ha obtenido el R-Squared, que expresa el nivel de ajuste del modelo a los datos. Es decir, un R-Squared de 0,5 – por ejemplo – significa que las variables independientes seleccionadas explican en un 50% las variaciones de la variable dependiente.

### **Elaboración de mapas de zonificación**

Una vez obtenidos los datos, se ha analizado la influencia de cada variable en los distintos contaminantes mediante una elaboración de mapas de zonificación. Esta técnica realizada a través del sistema informático Tableau ha resultado de gran utilidad para analizar de manera visual el impacto directo en los contaminantes, así como para comparar dicho impacto en las distintas zonas de Barcelona y frente a otros contaminantes.

De esta manera, se ha podido observar cómo las fases de la desescalada han tenido efectos diferentes según la zona de Barcelona, cómo el confinamiento es muy positivo para algunos contaminantes, mientras que para otros no es tan favorecedor, o cómo la Zona de Bajas Emisiones ha modificado la contaminación según la zona de la ciudad condal.

En el Capítulo IV se encuentran los distintos mapas de zonificación. La versatilidad de Tableau permite añadir características a los mapas que ayudan a analizar visualmente los resultados. De esta manera, se pueden ubicar geográficamente las estaciones y a cada una otorgarle distintos matices que expresen los valores obtenidos. En la visualización se ha elegido el color como atributo que cambia según el coeficiente de cada estación, con tonos rojos de mayor intensidad cuanto mayor era el coeficiente (significa que una variable incide de manera positiva en la contaminación) y con tonos verdes para los valores negativos (pues reducen la contaminación).

Para el análisis de los mapas es conveniente enunciar brevemente algunas características de las zonas donde están situadas las estaciones de calidad del aire que se van a mapear. Al fin y al cabo, cada estación reúne las características de una zona específica de la ciudad de Barcelona. Comprender las características de la zona en la que

está situada cada estación facilita la comprensión y el análisis de los resultados, ya que cada zona puede presentar condiciones distintas respecto al tráfico, densidad de población, presencia de industrias, etc. Se enumeran aquí algunas características de las estaciones de calidad del aire:

*A) Ciudadela*

El Parque de la Ciudadela se encuentra en el distrito de la Ciutat Vella, el primer distrito de Barcelona que está delimitado por la antigua muralla histórica de la ciudad condal. Está formado por cuatro barrios (la Barceloneta, el Gòtic, Sant Pere y Santa Caterina i la Ribera, el Raval) y dentro de este distrito está la icónica calle La Rambla, principal calle de Barcelona. Aparte de por su patrimonio cultural, destaca el Paseo marítimo de la Barceloneta. A pesar de no tener uno de los mayores niveles de densidad de población de la ciudad, sí es uno de los distritos con mayores niveles de contaminación debido a la gran actividad turística y a la actividad marítima debido a la presencia del puerto de Barcelona (Ruz de la Fuente, 2021).

*B) Ensanche (L'Eixample)*

El distrito del Ensanche es uno de los iconos de Barcelona: su plan urbanístico con calles perfectamente perpendiculares unas frente a otras con servicios públicos homogéneamente distribuidos, la presencia de la Sagrada Familia y su historia relacionada con la Barcelona moderna hacen de este distrito uno de los más concurridos de Barcelona. De hecho, es el primer distrito en densidad de población de la ciudad (Ayuntamiento de Barcelona, 2021).

*Ilustración: Imagen del distrito del Ensanche*

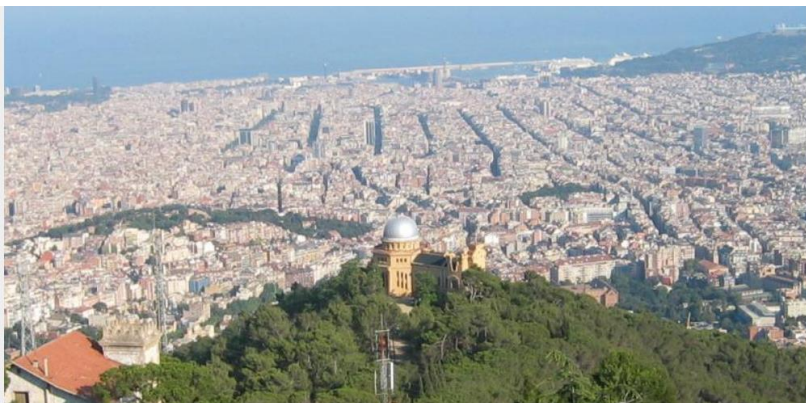


*Fuente: El País*

### *C) Observatorio Fabra*

La estación de calidad del aire del Observatorio Fabra se encuentra al lado de dicho observatorio, uno de los monumentos más emblemáticos de la ciudad. Se encuentra situado dentro del parque del Tibidabo, al norte del distrito Sarrià – Sant Gervasi. Es la estación de calidad del aire más alejada del núcleo urbano. Su ubicación al noroeste de la ciudad, alejado del centro, el menor tráfico respecto de otras zonas de la ciudad, la presencia del parque natural del Collserola y su mayor altitud hacen que los niveles de contaminación medidos en esta estación suelen ser menores.

*Ilustración: Imagen el Observatorio Fabra*



*Fuente: CSIC*

### *D) Gràcia – Sant Gervasi*

La estación de calidad del aire Gràcia – Sant Gervasi está situada en la Vía Augusta, calle que separa los distritos de Gràcia y de Sarrià – Sant Gervasi. El distrito de Sarrià – Sant Gervasi es el quinto distrito de Barcelona y el segundo más extenso de todos. Es considerado el “pulmón de Barcelona”, ya que es el distrito con más zonas verdes de toda la ciudad. No obstante, la razón de esta consideración es que uno de los siete barrios de este distrito es Vallvidrera, el Tibidabo i les Planes, el cual alberga el parque natural de Collserola como parte del entorno del parque del Tibidabo. Sin embargo, este barrio está situado al noroeste del distrito, mientras que la estación de calidad del aire se sitúa al sudeste del distrito, en la frontera con el distrito de Gràcia, por lo que la contaminación del distrito de Sarrià – Sant Gervasi se verá mejor reflejada en la estación Observatorio Fabra.

El distrito de Gràcia, por su parte, está en el centro de la ciudad, si bien recoge menos frenesí turístico que otros distritos como el Ensanche. Por sus características bohemias y por el casco antiguo del barrio de Gràcia (uno de los cuatro barrios que forman el distrito, pero es el más significativo), este distrito es más cultural y se asemeja más a un pequeño pueblo que al centro de un área metropolitana como Barcelona.

*Ilustración: Ubicación de la estación de calidad del aire Gràcia – Sant Gervasi*



*Fuente: Google Maps*

### E) Poblenou

El distrito de Poblenou fue durante muchos años famoso por ser el epicentro de la industrialización en España. Durante la revolución industrial, este distrito llegó a

concentrar el mayor número de industrias de todo el país, si bien ha sufrido un proceso de desindustrialización progresivo que ha mejorado notoriamente el nivel de vida. Fruto de este proceso se ha convertido en un barrio principalmente residencial, donde la contaminación proviene principalmente del tráfico (menor que en otros distritos de mayor densidad) y del uso de electricidad, estufas y chimeneas de las casas.

*F) Parque del Valle de Hebrón (La Vall d'Hebron)*

El Parque del Valle de Hebrón es un barrio del distrito Horta-Guinardó, el tercer distrito más grande de la ciudad. Este distrito se caracteriza por la heterogeneidad dentro de sus once barrios, ya que las condiciones físicas han mediatizado en gran medida la construcción urbanística y la vida de este distrito. De esta manera, este distrito contiene desde barrios principalmente urbanísticos como El Baix Guinardó hasta barrios fundamentalmente verdes, como precisamente el Parque del Valle de Hebrón, parque que da nombre al barrio y a la estación de calidad del aire. No obstante, sí es una condición general del distrito la falta de actividad empresarial, la cual está más concentrada en otras zonas de la ciudad.

*G) Sants*

El distrito de Sants – Montjuïc es el distrito situado al sur de Barcelona, el más extenso y el que tradicionalmente representaba las diferencias sociales en la ciudad, pues era un distrito principalmente industrializado donde eminentemente había fábricas y residencias para la clase obrera. Actualmente, como principal característica relevante se encuentra ser el distrito con menor densidad de población.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

## 1. ESTUDIO NUMÉRICO DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Puesto que el objetivo del trabajo es estudiar el impacto de las variables independientes en la contaminación, se ha realizado un análisis previo de los resultados de los modelos para, a la hora de interpretar el impacto de las variables, observar especialmente los modelos que han sido más ajustados.

Para ello, se ha analizado de manera preliminar los R-Squared de cada modelo realizado para comprobar cuáles han sido los más altos por cada contaminante, encontrando así los modelos en los que las variables independientes explican en mayor medida las variaciones de la variable dependiente. La siguiente tabla muestra los R-Squared de cada modelo:

*Tabla 4: Análisis de R-Squared por estaciones*

<b>Estación/Contaminante</b>	<b>NO</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>3</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>
Ciudadela	0,34	0,36	0,23	-
Ensanche	<b>0,49</b>	<b>0,53</b>	0,26	0,32
Observatorio Fabra	0,26	0,34	<b>0,37</b>	<b>0,4</b>
Gràcia - Sant Gervasi	0,46	0,46	0,28	0,22
Parque del Valle de Hebrón	0,23	0,3	0,23	-
Poblenou	0,43	0,41	-	0,27
Sants	0,31	0,36	-	-

*Fuente: Elaboración propia*

Respecto al análisis numérico de los resultados, la Tabla 2 muestra el impacto de las variables en cada contaminante, analizando el valor medio de los coeficientes<sup>1</sup> y el porcentaje de positivos y negativos significativos (cuyo p-valor es menor a 0,1). A la hora de realizar esta media, hay algunas variables que el modelo – por error – ha sobreestimado, dando un peso exacerbado. Estos errores no han sido tenidos en cuenta a la hora de calcular la media, ni en el momento de realizar el mapeo de los resultados. Puesto que el análisis espacial se ha realizado sobre cada variable, se ha considerado

<sup>1</sup> Durante el trabajo se emplea a menudo indistintamente el concepto coeficiente o peso, haciendo referencia al efecto marginal expresado en la ecuación del modelo de regresión lineal múltiple

conveniente hacer un análisis numérico previo de cada contaminante para detectar las variables con mayor impacto.

Tabla 5: Análisis numérico de los resultados

Variable independiente	Descripción	NO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>Temperatura media</b> (°C)	Valor medio	-0,043	-0,013	0,033	0,017
	Negativo y significativo (%)	85,71%	57,14%	0%	50%
	Positivo y significativo (%)	0%	14,29%	100%	0%
<b>Precipitación media</b> (mm)	Valor medio	-0,005	-0,006	0,002	-0,007
	Negativo y significativo (%)	60,00%	60,00%	0%	33,33%
	Positivo y significativo (%)	0%	0%	33,33%	0%
<b>Confinamiento</b> (1: sí, 0: no)	Valor medio	-0,609	-0,533	0,45	-0,233
	Negativo y significativo (%)	60,00%	85,71%	0%	75,00%
	Positivo y significativo (%)	0%	0%	40,00%	0%
<b>Fase 0</b> (1: sí, 0: no)	Valor medio	0,578	0,103	-0,269	-0,055
	Negativo y significativo (%)	0%	14,29%	80,00%	25,00%
	Positivo y significativo (%)	71,43%	42,86%	0%	0%
<b>Fase 1</b> (1: sí, 0: no)	Valor medio	0,445	0,157	-0,198	0,009
	Negativo y significativo (%)	0%	0%	40,00%	0%
	Positivo y significativo (%)	42,86%	42,86%	0%	0%
<b>Fase 2</b> (1: sí, 0: no)	Valor medio	0,574	0,238	-0,29	-0,025
	Negativo y significativo (%)	0%	0%	80%	0%
	Positivo y significativo (%)	28,57%	28,57%	0%	0%

<b>Fase 3</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	0,544	0,427	-0,426	-0,016
	Negativo y significativo (%)	0%	0%	100%	0%
	Positivo y significativo (%)	40,00%	71,43%	0%	0%
<b>Sábado</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	-0,531	-0,239	0,104	-0,108
	Negativo y significativo (%)	71,43%	71,43%	0%	25,00%
	Positivo y significativo (%)	0%	0%	60,00%	0%
<b>Domingo</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	-0,753	-0,403	0,163	-0,181
	Negativo y significativo (%)	80,00%	100%	0%	75,00%
	Positivo y significativo (%)	0%	0%	20,00%	0%
<b>Variable independiente</b>	<b>Descripción</b>	<b>NO</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>3</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>
<b>Festivo</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	-0,621	-0,344	0,061	-0,143
	Negativo y significativo (%)	57,14%	28,57%	0%	75,00%
	Positivo y significativo (%)	0%	0%	20,00%	0%
<b>Polvo del Sahara</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	0,051	0,072	0,023	0,344
	Negativo y significativo (%)	0%	0%	0%	0%
	Positivo y significativo (%)	14,29%	57,14%	20,00%	100%
<b>Combustión de biomasa</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	0,249	0,214	0,054	0,243
	Negativo y significativo (%)	0%	0%	0%	0
	Positivo y significativo (%)	71,43%	28,57%	0%	25,00%
<b>ZBE</b> <b>(1: sí, 0: no)</b>	Valor medio	-0,579	-0,322	0,041	-0,036
	Negativo y significativo (%)	100%	100%	40,00%	25,00%



Positivo y significativo (%)	0%	0%	60,00%	0%
<b>N° de modelos</b>	7	7	5	4

*Fuente: Elaboración propia*

### Monóxido de nitrógeno (NO)

Los resultados muestran que el NO es el contaminante más sensible de los estudiados respecto de las variables elegidas, pues es el gas donde más peso tienen la mayoría de las variables (temperatura, confinamiento, Fases 0,1 y 2 de la desescalada, los tres días no laborables, la combustión de biomasa y la ZBE). Asimismo, es el contaminante que presenta los resultados más claros, ya que todas las variables descubren valores significativos positivos o negativos, pero en ningún caso en ambos sentidos (a diferencia de otros como el NO<sub>2</sub>, para el cual algunas variables presentan valores significativos de ambos signos).

Respecto a las variables que tienen una mayor influencia, cabe destacar el confinamiento (0,609), la Fase 0 de la desescalada (0,578), el domingo (-0,753) y la ZBE (-0,579). Las cuatro variables inciden en gran medida en la reducción del tráfico, razón por la cual son relevantes en la generación de NO. En el caso particular del domingo – así como los otros dos días no laborables, que también tienen un gran impacto negativo – esta variable afecta adicionalmente a la actividad industrial, pues durante los días no laborables la producción baja su intensidad, salvo por determinadas plantas industriales de producción interrumpida como las plantas de refinamiento de petróleo o las cadenas de montaje de electrodomésticos y automóviles (UDIMA, 2022). Por esta razón, el domingo es la variable que tiene un mayor peso en la generación de NO. De manera similar, el confinamiento y las fases de la desescalada combinan una reducción del tráfico con un descenso de la actividad industrial. Es interesante comparar el descenso en los niveles de este gas durante los dos meses que duró el confinamiento (-0,609) frente a la presencia de la ZBE durante los dos años (-0,579).

Desde el 1 de enero de 2020 hasta el 9 de noviembre de 2021 han tenido prohibido el paso a la ZBE solamente turismos de gasolina matriculados antes del 2000 y de diésel antes de 2005, junto con motocicletas y ciclomotores matriculados antes del 2003. Las furgonetas con estas mismas características tuvieron prohibido el paso desde el 1 de abril

de 2021 (Área Metropolitana de Barcelona, s.f.). En Barcelona se han matriculado durante los últimos cinco años 991.755 vehículos (Idescat, 2022) y todos ellos pueden – actualmente – circular por la ZBE, por lo que la ZBE afecta actualmente a una proporción reducida de vehículos. Sin embargo, prohibir la entrada a esta porción tan limitada de los vehículos ha tenido un efecto prácticamente similar al de restringir el movimiento de toda la población durante el confinamiento, por lo que el impacto de los vehículos en la emisión de NO se reduce en gran medida para los vehículos modernos.

*Tabla 6: Matriculación de vehículos en Barcelona*

Vehículo/Año	2017	2018	2019	2020	2021	Total
Turismos	163.728	170.166	168.557	108.794	100.900	712.145
Autobuses	377	451	593	177	261	1.859
Motocicletas	31.550	34.739	37.160	31.778	33.480	168.707
Camiones y furgonetas	25.154	28.556	23.855	15.529	15.950	109.044
<b>Total</b>	<b>220.809</b>	<b>233.912</b>	<b>230.165</b>	<b>156.278</b>	<b>150.591</b>	<b>991.755</b>

*Fuente: Idescat, 2022.*

### Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Si bien en el NO<sub>2</sub> el impacto de las distintas variables es similar (mismo signo positivo o negativo) al caso del NO, los resultados muestran diferente intensidad según la variable. El confinamiento y la Fase 3 de la desescalada son buenas muestras de ello, ya que en ambas ocasiones los coeficientes de las variables en el NO<sub>2</sub> son considerablemente superiores a los del NO (-0,533 y -,427 frente a -0,167 y 0,094).

Esta gran diferencia se explica por las grandes variaciones del O<sub>3</sub> en la presencia de NO<sub>2</sub> (0,451 y -0,426). Por lo tanto, los resultados muestran cómo depende el NO<sub>2</sub> de los dos contaminantes anteriores, pues siendo un contaminante secundario depende de la oxidación de los dos primarios. Por esta razón, cuando el NO aumenta significativamente y el O<sub>3</sub> se reduce también considerablemente (como es el caso de la Fase 0 de la desescalada, con 0,624 y -0,269 respectivamente), el impacto en el NO<sub>2</sub> no es notorio (0,098), mientras que cuando uno de ellos cambia en gran medida y el otro se mantiene razonablemente estable (como es el caso de la ZBE, con -0,579 para el NO y 0,041 para el O<sub>3</sub>), la variable tiene una gran influencia en el NO<sub>2</sub> (-0,322 en la ZBE).

### Ozono ( $O_3$ )

El estudio de la presencia de  $O_3$  tiene un mayor interés estudiarlo en el análisis espacial, ya que la diferencia entre las zonas periféricas y centrales será visible. No obstante, del análisis numérico llama la atención la presencia positiva en la combustión de biomasa y en el polvo del Sáhara el  $O_3$ , donde presenta un impacto positivo en ambos casos. Estas dos variables son las únicas en las cuales el aumento de NO no implica una disminución de  $O_3$ , aunque el bajo nivel de los coeficientes refleja la baja – casi nula – influencia de los dos episodios en la presencia de  $O_3$  (de hecho, la combustión de biomasa no presenta ningún valor significativo).

Respecto a las variables con mayor impacto, destacan el confinamiento (0,451) y la Fase 3 (-0,426), relacionado con los niveles de contaminación. En el caso de la Fase 3, a pesar de no aumentar en gran medida los niveles de NO, el aumento del  $NO_2$  refleja que durante esos días se dio la oxidación del  $O_3$  con los altos niveles de NO generados durante las semanas anteriores, por lo que permanece la doble influencia de NO y  $O_3$ .

### PM<sub>10</sub>

Las partículas PM<sub>10</sub> son el contaminante que ofrece menor precisión. Debido al bajo nivel de valores significativos, son pocas las variables que ofrecen resultados concluyentes, siendo únicamente relevantes el confinamiento (-0,233 con 75% de valores negativos significativos), los días no laborables como el domingo (-0,181 con 75% de valores negativos significativos), el polvo del Sáhara (0,344 con 100% de valores positivos significativos) y la combustión de biomasa (0,243 con 25% de valores positivos significativos).

En base a los resultados anteriores se puede comprobar cómo las variables que tienen un impacto negativo son aquellas que tienen relación con una menor actividad humana. Sin embargo, no se puede afirmar que tenga una relación directa con el tráfico tan fuerte como los óxidos de nitrógeno, ya que la ZBE tiene un impacto muy reducido (-0,036) y todas las fases de la desescalada (salvo la Fase 0 con un ligero impacto positivo), en las que el tráfico aumentó –como muestran los niveles de óxidos de nitrógeno –, carecen de valores significativos respecto de las partículas PM<sub>10</sub>.

Por su parte, las variables que aumentan la presencia de este contaminante son los fenómenos relativos al polvo el Sáhara y a la combustión de biomasa, siendo especialmente relevante la primera por el 100% de valores significativos que presenta. Estos resultados muestran que las partículas del desierto y las sustancias generadas en la combustión de biomasa tienen una influencia mucho mayor que las medidas humanas relativas al tráfico que puedan teóricamente incrementar o reducir su presencia, siendo un contaminante que depende principalmente de la naturaleza y no en tanta medida de la actividad de los ciudadanos.

Cabe mencionar que también tiene un impacto positivo – según los resultados – la temperatura (0,017). No obstante, al atender a los valores significativos se puede observar que solamente hay valores negativos. Por lo tanto, realmente no se puede concluir el impacto real de la temperatura en las partículas PM<sub>10</sub>, ya que los valores que más peso han tenido en la media – los positivos – no son significativos.

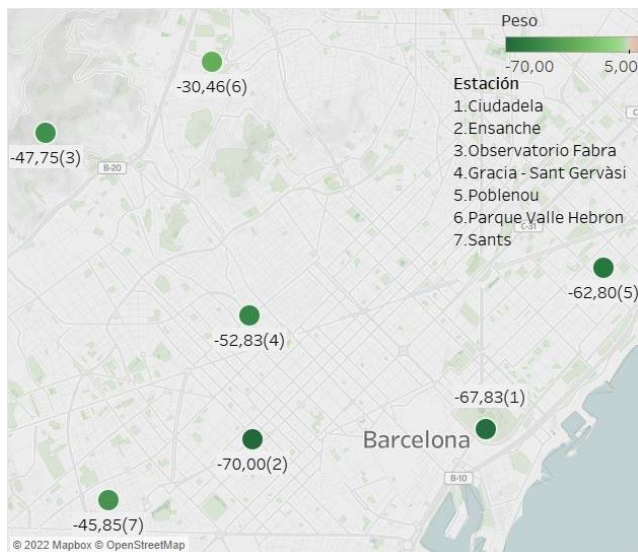
## 2. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS RESULTADOS

Para poder interpretar los resultados, las figuras muestran los coeficientes de las variables multiplicados por 100, pudiendo mostrar así un mayor rango de colores y una mayor diferenciación entre las distintas estaciones.

### CONFINAMIENTO

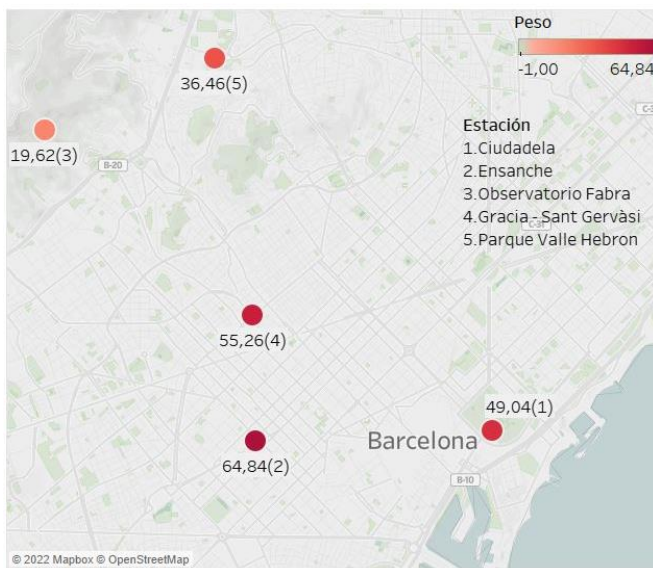
Puesto que uno de los objetivos de este trabajo es explicar el impacto del estado de alarma declarado en España para frenar la propagación del Covid-19 en la contaminación de Barcelona, es imprescindible que la primera y principal medida, el estado de alarma o periodo de confinamiento, sea analizado en los cuatro contaminantes. Las variables restantes serán estudiadas en aquellos contaminantes en los que más han impactado.

Figura 1: Impacto del Confinamiento en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

Figura 2: Impacto del Confinamiento en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

La primera gran comparación es el resultado radicalmente opuesto entre el NO<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub>. Como ya se ha explicado, el O<sub>3</sub> es un gas que se consume rápidamente dentro de las grandes ciudades debido a su oxidación con gases como el NO. Esta dependencia hace que una disminución de la emisión de óxidos de nitrógeno conlleve un aumento en la presencia de O<sub>3</sub>. Se puede observar como el confinamiento mejoró notablemente la

contaminación del NO<sub>2</sub> en la ciudad, donde el valor medio de los coeficientes es del 0,53<sup>2</sup>. Cabe destacar que la estación más representativa respecto al NO<sub>2</sub> (Ensanche, con un R-Squared de 0,533), es aquella en la que se muestra un mayor impacto (-70,00), por lo que es probable que el impacto sea aún mayor que el mostrado según los resultados.

Es asimismo visible el contraste entre el centro y las afueras de la ciudad, pues la disminución del NO<sub>2</sub> y el aumento del O<sub>3</sub> goza de mayor intensidad en las estaciones de calidad del aire de dentro de la ciudad que en las estaciones de los distritos más alejados (Observatorio Fabra, el Parque del Valle de Hebrón). Este dato se explica por la disminución del tráfico durante el confinamiento que causó la disminución de los niveles de NO<sub>2</sub>, teniendo por tanto un mayor impacto en las zonas donde – de manera habitual – el tráfico es más intenso, es decir, los distritos de Ciudadela, Ensanche y Poblenou.

Figura 3: Impacto del Confinamiento en el NO



Fuente: Elaboración propia

<sup>2</sup> Es cierto que este peso habría que ponderarlo, multiplicando el peso de cada variable por el R-Squared obtenido en cada estación por contaminante, lo cual disminuiría el peso notablemente, pero el gráfico ayuda a expresar el indiscutible efecto que tuvo el confinamiento en la disminución del dióxido de nitrógeno.

Figura 4: Impacto del Confinamiento en PM<sub>10</sub>



Fuente: Elaboración propia

Respecto al impacto del confinamiento en el NO y en las partículas PM<sub>10</sub>, se pueden hacer varias observaciones. En primer lugar, es semejante el impacto en NO y en NO<sub>2</sub>, pero es cierto que en este caso el barrio de Sants ha disminuido en mayor medida. No obstante, como indica la Tabla 1, el modelo no ha sido tan preciso en Sants como en otras estaciones, por lo que no merece la pena analizar en profundidad en esa estación para el NO.

Por otra parte, es visible la disminución de presencia de PM<sub>10</sub> a raíz del confinamiento, así como el menor impacto en este contaminante que en los óxidos de nitrógeno que ya se ha explicado en el apartado anterior. Respecto a la distribución geográfica, las limitaciones de las fuentes de datos respecto del PM<sub>10</sub> dificultan su análisis espacial, pero se puede comprobar que la estación en la que tiene un menor impacto es aquella en la que hay menor tráfico de manera habitual, Observatorio Fabra, por lo que confirma comprueba la relación entre el PM<sub>10</sub> y las partículas emitidas por los vehículos.

### FASE 0

La Fase 0 fue el comienzo del proceso de desescalada. Esta fase fue particularmente larga en Barcelona, ya que – junto con Madrid y algunas zonas de Castilla y León – esta fase duró tres en vez de dos semanas. Mientras la mayoría de las ciudades y provincias españolas pasaban a la Fase 1, el 18 de mayo Barcelona permaneció en la

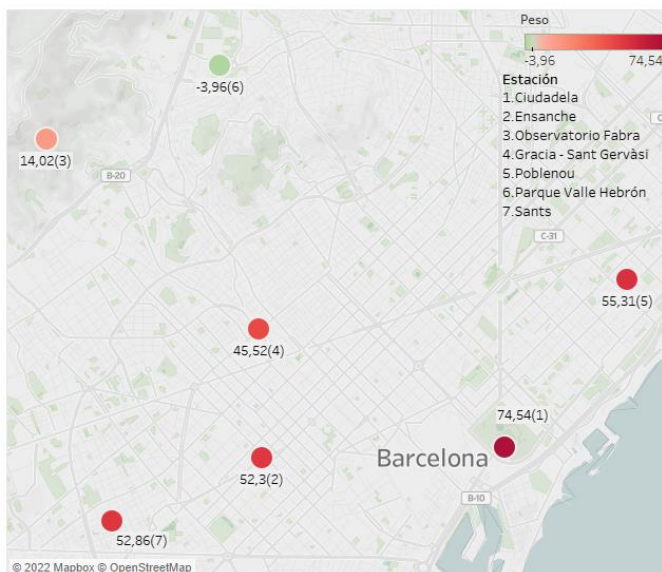
Fase 0, si bien se tomaron determinadas medidas “intermedias” que hicieron que esta semana se calificara como “Fase 0,5” (El Confidencial, 2020).

Entre las medidas que se recogían en la Fase 0 se encuentran las siguientes: el 4 de mayo se reabrieron determinados locales como floristerías, peluquerías, dentistas y ferreterías, aunque solamente se podía acudir con cita previa (la cita previa se eliminó con la Fase 0,5); las cafeterías y los restaurantes se abrieron, pero solamente se podía pedir para llevar, no pudiendo consumir en el establecimiento; comenzaron los paseos y el ejercicio de deportes sin contactos por franjas horarias según la edad (medida que comenzó el 2 de mayo, pero por cuestiones prácticas se recoge como medida de esta Fase 0).

Durante estas fechas permaneció el toque de queda de 23.00h a 06.00h, las reuniones de familiares permanecían prohibidas, la movilidad entre municipios seguía estando prohibida salvo por cuestiones laborales y gimnasios y bares seguían cerrados.

Por tanto, las personas se movían fundamentalmente a pie para aprovechar las horas de las que disponían, si bien el desplazamiento a los locales o los servicios de comida para llevar provocaron que el tráfico aumentara, lo cual tuvo su efecto como demuestran las siguientes figuras:

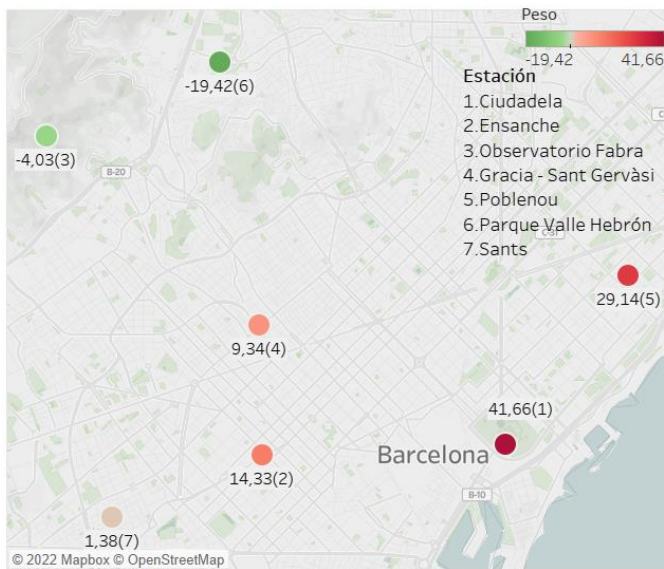
Figura 5: Impacto de la Fase 0 en el NO



Fuente: Elaboración propia



Figura 6: Impacto de la Fase 0 en el NO<sub>2</sub>

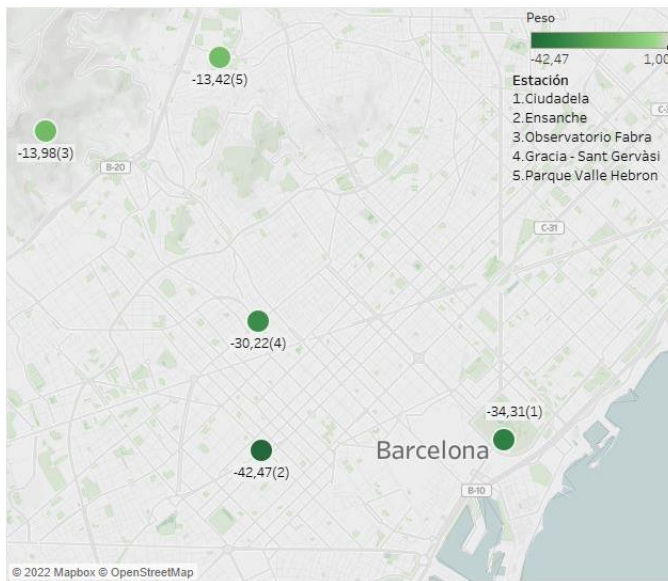


Fuente: Elaboración propia

Esta fase de comienzo de la desescalada supuso un incremento evidente en la presencia de NO y NO<sub>2</sub>. A pesar de tener distinta fuerza (la presencia de NO sube notablemente más que la de NO<sub>2</sub>), se puede comprobar también una distribución territorial semejante a la comentada con el confinamiento. Las zonas céntricas sufren un incremento mucho mayor, puesto que es donde el tráfico aumenta con mayor intensidad. No obstante, en las afueras de la ciudad esta primera fase todavía favorece – por lo general – a la contaminación de los óxidos de nitrógeno, ya que disminuyen o aumentan muy poco los niveles de contaminación en el Observatorio Fabra y en el Parque del Valle de Hebrón.

Los resultados muestran el gran incremento de contaminación que hay con el simple permiso de pasear, desplazarse para pedir comida para llevar (ni siquiera se puede ir a un restaurante y quedarse ahí) o con la apertura de servicios como las peluquerías y las ferreterías, por lo que se muestra que el gran tráfico rodado de Barcelona no es fruto únicamente del trabajo (la mayoría de la población continuaba teletrabajando), sino también del ocio y de la actividad social.

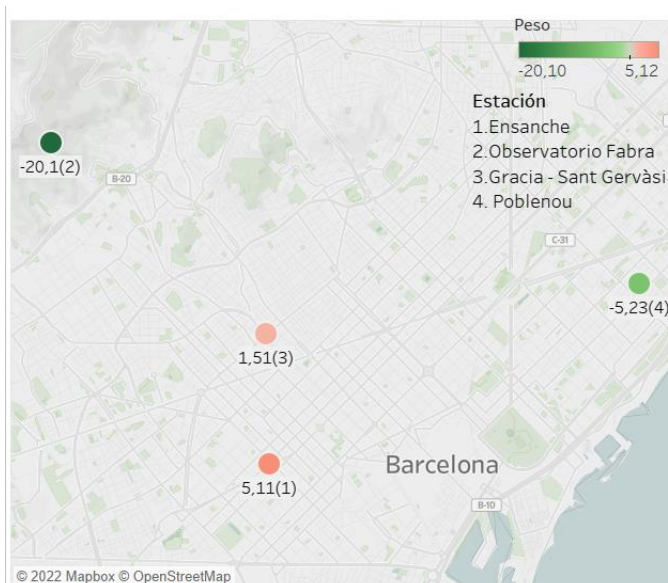
Figura 7: Impacto de la Fase 0 en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

El aumento del NO que genera con su oxidación NO<sub>2</sub> conlleva la necesaria reducción de los niveles de contaminación de O<sub>3</sub>. De esta manera, se aprecia una gran disminución de la presencia de este contaminante en los distritos más céntricos, con particular importancia en el distrito del Ensanche. El tamaño del distrito y la densidad de población hacen que la actividad humana sea especialmente activa. Por tanto, los cambios en las restricciones de movilidad tienen un impacto especialmente notorio, siendo el distrito más sensible a los cambios del confinamiento.

Figura 8: Impacto de la Fase 0 en PM<sub>10</sub>



Fuente: Elaboración propia

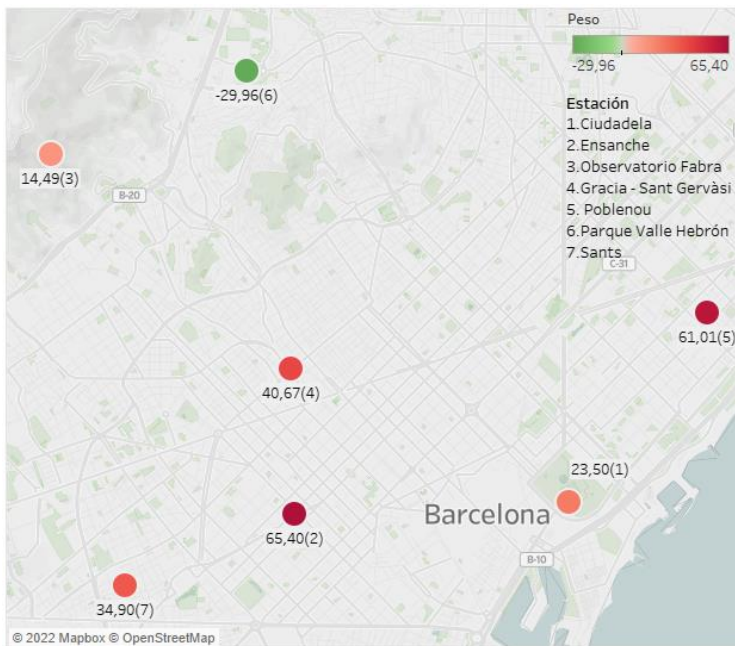
Distinto es el caso de las partículas  $PM_{10}$ , ya que no se puede sacar una conclusión muy clara a primera vista. Parece que hay cierta heterogeneidad en el impacto de la Fase 0 en este contaminante, si bien mirando con atención a los resultados, la estación en la cual tiene un mayor peso negativo la Fase 0 en los niveles de  $PM_{10}$  (Observatorio Fabra, -20,1) coincide en ser la estación que tiene un mayor R-Squared para ese mismo contaminante (ver Tabla 1). Por esta razón, y ante la falta de homogeneidad en los otros resultados, parece ser que esta fase inicial de la desescalada no causa un aumento relevante de los niveles de  $PM_{10}$ , continuando la tendencia de las semanas anteriores de disminuir la presencia de este contaminante.

### FASE 1

El 25 de mayo Barcelona pasó a la Fase 1 de la desescalada, dando un paso más hacia la “nueva normalidad”. Este cambio de fase implicó los mayores cambios en el día a día, ya que se comenzaron a permitir reuniones de hasta 10 personas en exteriores y domicilios, los bares y restaurantes (y chiringuitos de la playa en Barcelona) abrieron en terrazas con aforos del 50% y se permitió la movilidad dentro de las provincias a diferentes municipios (El País, 2020).

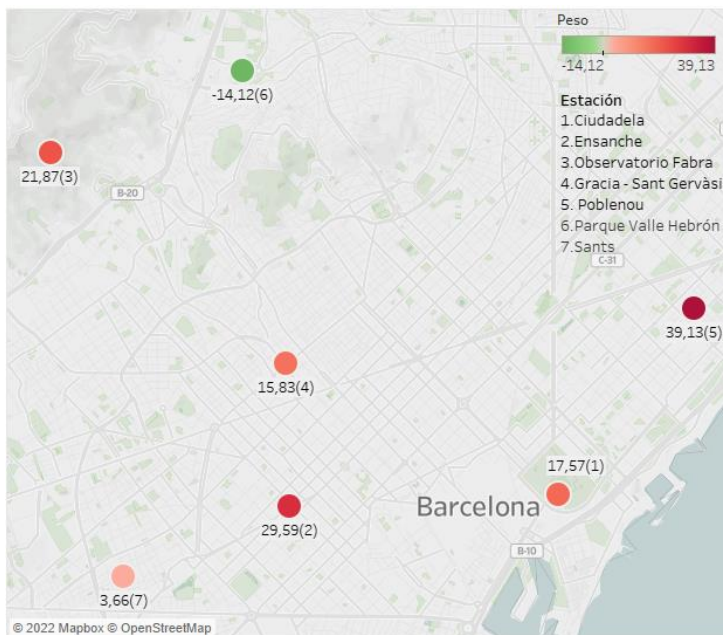
Para afrontar este aumento de movilidad, se incrementaron las ofertas de metro y autobuses en Barcelona, se incrementó la presencia policial y los servicios de limpieza y recogida de residuos volvieron a estar operativos al completo (Ayuntamiento de Barcelona, 2020). A pesar de permanecer medidas como el cierre de la mayoría de los espectáculos públicos o la no apertura de establecimientos de más de 400  $km^2$  de extensión, la vida en Barcelona se reactivó en gran medida en esta Fase 1. Un hecho que simboliza este aumento de la movilidad es que el número de personas que usaron el transporte público en la Fase 0 se vio incrementado en un 54% en esta Fase 1, con 225.000 usuarios diarios más. Estos cambios tuvieron un efecto notable en la contaminación, como muestran las siguientes figuras:

Figura 9: Impacto de la Fase 1 en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Impacto de la Fase 1 en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

Las figuras muestran cómo durante esta Fase 1 se continuó la tendencia ya comenzada en la Fase 0, con unos significantes aumentos de los niveles de contaminación de los óxidos de nitrógeno en el centro de la ciudad. Es curioso cómo las zonas más afectadas son distintas que en la Fase 0, ya que aquí se puede comprobar una mayor intensidad en el distrito del Ensanche y menor intensidad en que en la Fase 0 de la

desescalada. Probablemente puede ir de la mano del hecho del aumento de bares y de movilidad del transporte público que permitió al distrito de mayor densidad de población volver a verse.

El impacto continuó siendo mayor en la contaminación del centro de la ciudad, tanto así que en el Parque del Valle de Hebrón estas medidas de desconfinamiento no implicaron un aumento en los niveles de contaminación, sino que esta zona continuó sin incrementar sus niveles de óxidos de nitrógeno estas semanas. Sin embargo, lo realmente interesante es comparar estos datos con los de la Fase 0. Basta pararse a reflexionar para ver que a primera vista no se puede afirmar cuál de las dos fases puede tener un mayor impacto. Es cierto que por un lado comienza la gente a salir a la calle, pero el movimiento por ocio y los servicios públicos se ven realmente intensificados en la Fase 1. Para realizar esta comparación la siguiente tabla muestra los pesos ponderados por el R-Squared por cada estación para ambos óxidos de nitrógeno.

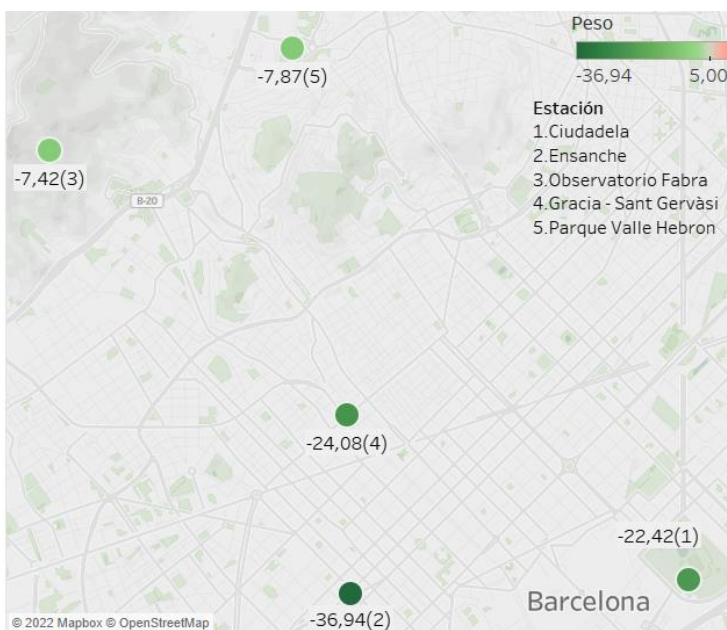
Tabla 7: Coeficientes de las Fases 0 y 1 ponderados

Contaminante	Estación	Fase 0		Fase 1	
		Fase 0	Ponderada	Fase 1	Ponderada
NO	Ensanche	52,30	25,63	66,40	32,54
	Gràcia - Sant Gervasi	45,52	20,94	40,67	18,71
	Poblenou	55,31	23,78	61,01	26,23
	Ciudadela	74,54	25,34	23,50	7,99
	Sants	52,86	16,39	34,90	10,82
	Observatorio Fabra	14,02	3,65	14,49	3,77
	Parque Valle Hebrón	-3,96	-0,91	-29,96	-6,89
<b>Valor medio</b>		<b>16,40</b>		<b>13,31</b>	
NO <sub>2</sub>	Ensanche	14,33	7,59	29,69	15,74
	Gracia SG	9,34	4,30	15,86	7,30
	Poblenou	29,14	11,95	39,13	16,04
	Ciudadela	41,66	15,00	17,57	6,33
	Sants	1,38	0,50	1,87	0,67
	Observatorio Fabra	-4,03	-1,37	27,87	9,48
	Parque Valle Hebrón	-19,42	-5,83	-14,12	-4,24
<b>Valor medio</b>		<b>4,59</b>		<b>7,33</b>	

*Fuente: Elaboración propia*

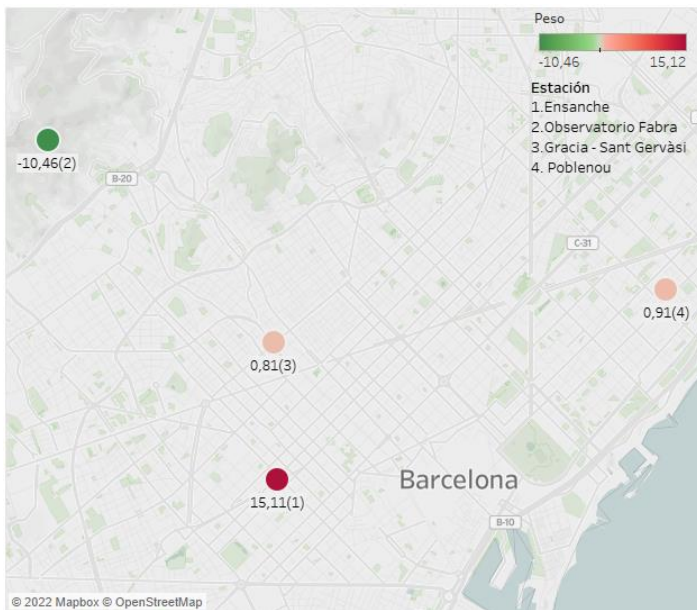
Con esta tabla se puede comprobar que la Fase 0 tuvo una mayor influencia en los niveles de contaminación de NO, mientras que la Fase 1 generó un mayor impacto en los niveles de NO<sub>2</sub>. Cierto es que la densidad en el tráfico (principal causante de los niveles de emisión de los óxidos de nitrógeno) se pueden suponer principalmente aumentados en la Fase 1, es realmente la Fase 0 la que generó un mayor nivel de contaminación de NO que al oxidarse generó NO<sub>2</sub>.

*Figura 11: Impacto de la Fase 1 en el O<sub>3</sub>*



*Fuente: Elaboración propia*

El menor impacto de esta fase en la emisión de NO trajo consigo un menor impacto en la reducción de emisión de O<sub>3</sub> por la disminución de oxidación. Así, se puede comprobar que esta Fase 1 favoreció el descenso del O<sub>3</sub>, pero en menores niveles que durante la Fase 0. No obstante, la contraposición del interior y del exterior de la ciudad continúa siendo evidente, con una intensidad mayor en el centro de la ciudad que en las zonas periféricas.

Figura 12: Impacto de la Fase 1 en PM<sub>10</sub>

*Fuente: Elaboración propia*

Asimismo, aun sin tener todavía una visión clara del impacto de la Fase 1 en las partículas PM<sub>10</sub> (recuérdese que no hay ningún valor significativo positivo o negativo), sí se puede comprobar que comienza un aumento de la emisión de las partículas en mayor medida que en la Fase 0, ya que en la estación donde continúan descendiendo los niveles (Observatorio Fabra), el impacto negativo en la contaminación es menor que en la fase anterior (-10,46 frente a -20,1 en la Fase 0), mientras que es significativamente superior en el distrito del Ensanche (16,11 frente a 5,11 en la Fase 0).

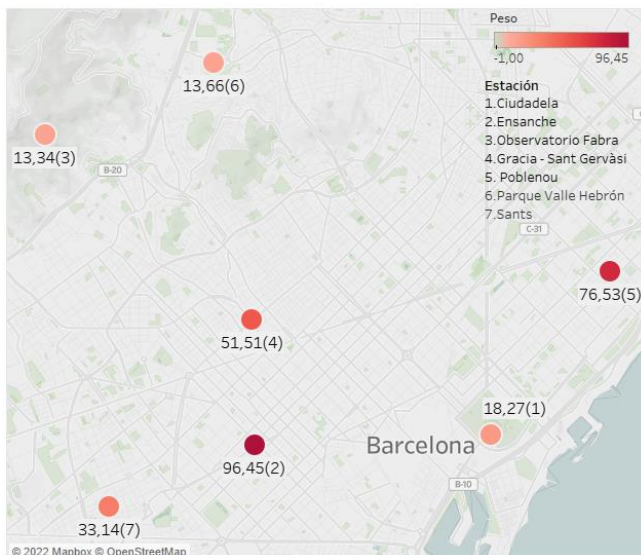
## FASE 2

El 8 de junio Barcelona entró en la Fase 2 de la desescalada. Este cambio de fase no fue la que causó los mayores cambios de estos meses, ya que las principales medidas fueron la eliminación de franjas horarias para pasear para niños y menores de 70 años, la apertura de bares y restaurantes en interior con limitaciones, el aumento de reuniones de personas de hasta 15 miembros, la apertura de playas y piscinas o la apertura de todos los centros comerciales (con aforos determinados según zonas privadas y comunes).

Por parte de la administración pública, en Barcelona con el cambio de fase el Metro volvió a ofrecer el 100% de sus servicios, mientras que los autobuses municipales tuvieron una oferta de hasta el 85% (Ayuntamiento de Barcelona, 2020).

Sin embargo, a pesar de la pequeña magnitud de los cambios – en comparación con lo que conllevaban los cambios de las fases anteriores – los niveles de emisión que muestran las siguientes figuras se ven disparados a niveles no alcanzados en las fases previas. Este hecho guarda más relevancia con la recuperación de la normalidad que con las medidas concretas. Así, los aumentos no están tan relacionados con el aumento de tráfico por ir a la playa, sino por el creciente deseo por parte de la población de volver a la vida normal, el cual provocaba que la vida diaria se asemejara a una vida pre-pandémica: más comercios que abren (con la actividad industrial de producción que conlleva), reuniones de amigos y familiares, fines de semana de hacer ejercicio e ir al campo, etc. Las características de la vida anterior a la pandemia comenzaron a dilucidarse, con lo cual los niveles de contaminación comenzaron a volver a sus niveles originales.

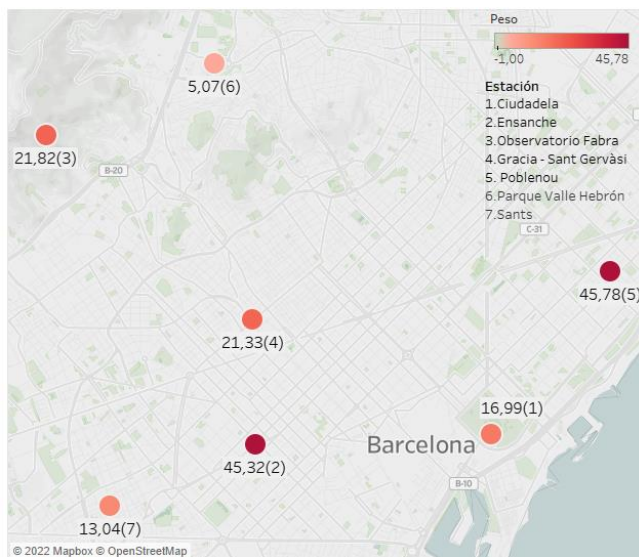
Figura 13: Impacto de la Fase 2 en el NO



Fuente: Elaboración propia



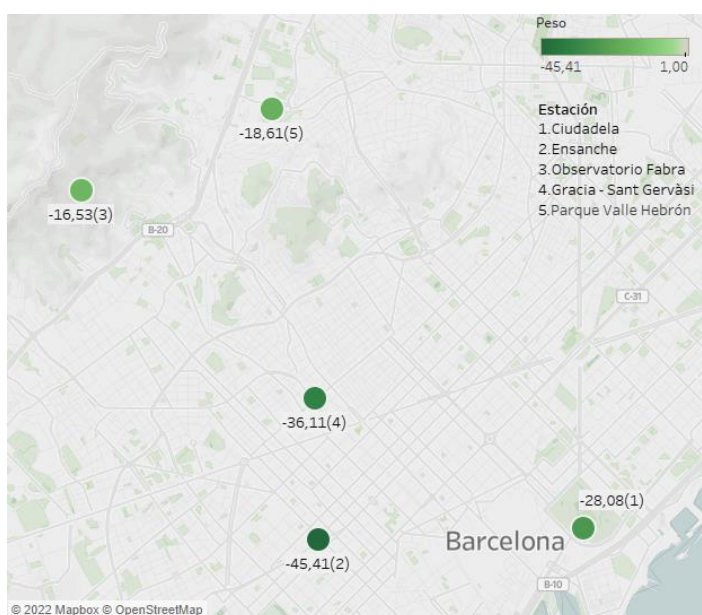
Figura 14: Impacto de la Fase 2 en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se puede observar un definitivo incremento en los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno. Igual que en las fases anteriores, los niveles de emisión de NO son notablemente mayores que los de NO<sub>2</sub>, pero en ambos casos el peso de la Fase 2 es mayor que en cualquiera de las fases anteriores. De esta manera, por primera vez en el Parque del Valle de Hebrón aparece un valor positivo, por lo cual esta fase provocó que los niveles de contaminación de óxidos de nitrógeno en esta zona de tan bajos niveles de contaminación subieran.

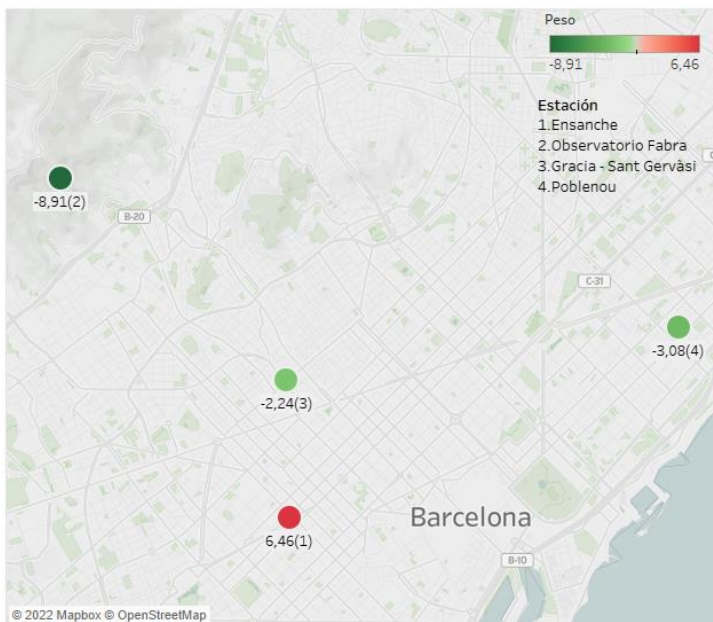
Figura 15: Impacto de la Fase 2 en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

De la mano de las afirmaciones anteriores, esta fase influye negativamente en la presencia de  $O_3$  en todo el territorio de Barcelona. No obstante, si bien las diferencias entre el interior y el exterior de la ciudad siguen siendo evidentes, el impacto de esta fase no es más fuerte que en otras fases (muy similar de hecho a la Fase 0). Por tanto, en esta fase de la desescalada el aumento de NO no trae consigo un correlativo descenso de  $O_3$  que mitigue un poco el efecto de este contaminante tan nocivo, sino que el aumento de NO fue mucho mayor que la disminución de  $O_3$ .

Figura 16: Impacto de la Fase 2 en el  $PM_{10}$



Fuente: Elaboración propia

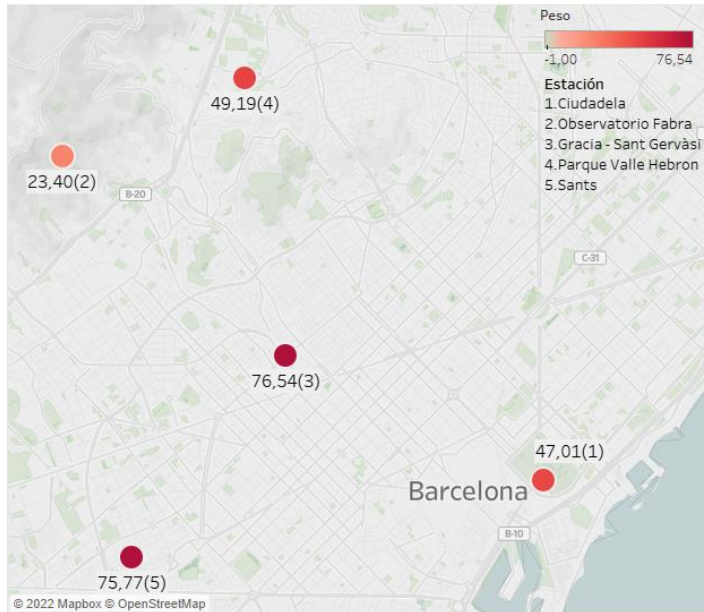
Finalmente, se puede comprobar cómo la disparidad y el poco peso de esta fase en las partículas  $PM_{10}$  continúan, por lo que las distintas medidas y el aumento de actividad durante estas semanas tuvieron una influencia despreciable en la emisión de estas partículas.

### FASE 3

El paso de la Fase 2 a la Fase 3 en Barcelona fue más un símbolo que un cambio efectivo, ya que el viernes 18 de junio se pasó a la Fase 3, sabiendo que el domingo 21 de junio a las 00.00 horas el estado de alarma se acababa, empezando la “nueva normalidad”.

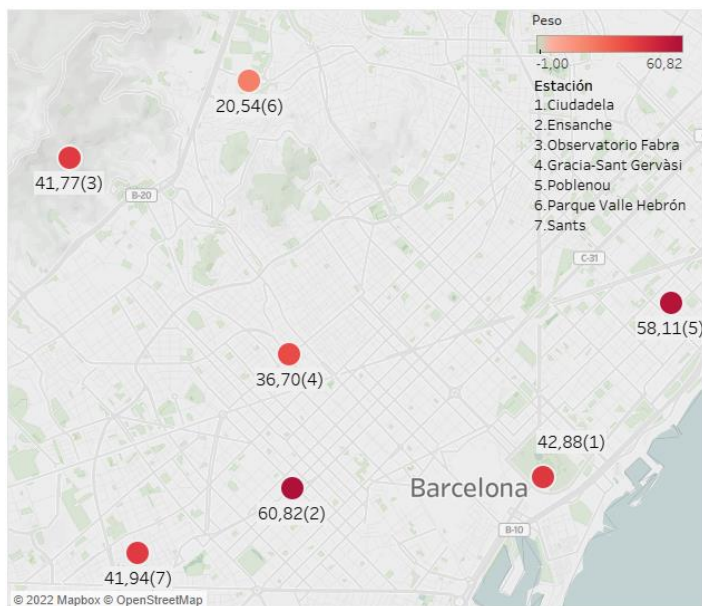
Entre las medidas de esta fase, destaca el permiso de reunirse hasta veinte personas (tanto en exteriores como en interiores), el movimiento libre dentro de la comunidad autónoma, la apertura de cines, musicales y casinos, y lo más relevante, la posibilidad de volver al trabajo de manera presencial. No obstante,, esta fase dura solamente un fin de semana, pero sirve para indicar cómo las tendencias de las fases anteriores se confirman:

Figura 17: Impacto de la Fase 3 en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Impacto de la Fase 3 en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, en la contaminación de los óxidos de nitrógeno se confirma una mayor homogenización en el peso de esta variable en lo que respecta al interior y al exterior de la ciudad. Evidentemente, la contaminación de estos es mayor en el interior de la ciudad que en la periferia, pero en este caso pasar a esta nueva fase no tiene un efecto tan distinto en las afueras frente al centro de la ciudad, en comparación con las fases anteriores.

Estos resultados significan que, con el paso del tiempo y con la “nueva normalidad” cada vez más cerca, la ciudad empezó a tomar sus niveles normales de contaminación, aumentando por el incremento de actividad humana, pero siendo menos llamativo el contraste entre interior y exterior.

Figura 19: Impacto de la Fase 3 en el O<sub>3</sub>



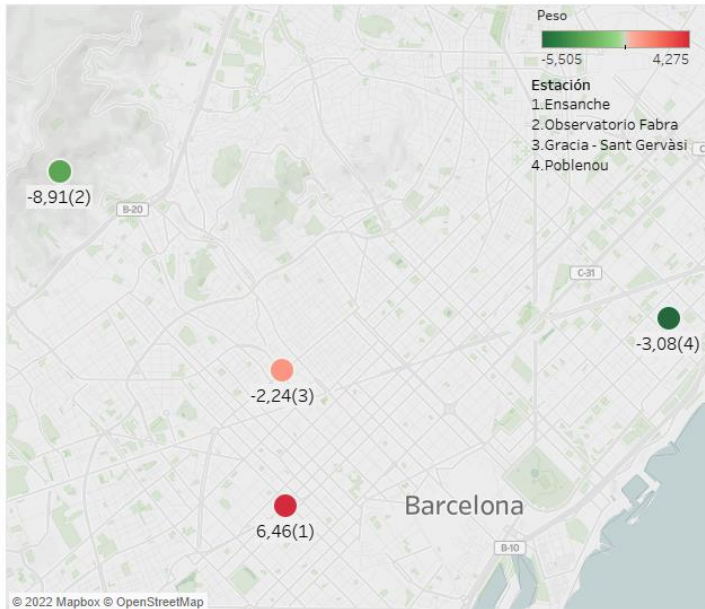
Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta al O<sub>3</sub>, los resultados presentan el mayor impacto negativo de las todas las fases analizadas, por lo que se puede observar cómo la cercanía a la normalidad implica la disminución de este gas en la ciudad condal (evidentemente relacionado con el incremento del NO, mucho más nocivo que el O<sub>3</sub>). Adicionalmente, en esta situación es realmente patente la diferencia que se lleva observando en el trabajo entre el interior y el exterior de la ciudad en este contaminante.

Por otra parte, es conveniente resaltar que la Fase 3 fueron tres días que ocuparon fin de semana (viernes 18 a domingo 20 de junio), por lo que estos resultados vienen

predeterminados en cierta medida por la reducción de niveles de óxidos de nitrógeno y el aumento de O<sub>3</sub> que suelen tener estos días, como se analizará más adelante.

Figura 20: Impacto de la Fase 3 en el PM<sub>10</sub>



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, esta última fase es muy similar a las anteriores en lo que respecta al PM<sub>10</sub>, pudiendo afirmar que la Fase 3 y la desescalada no han tenido un impacto claro en la generación de este tipo de partículas.

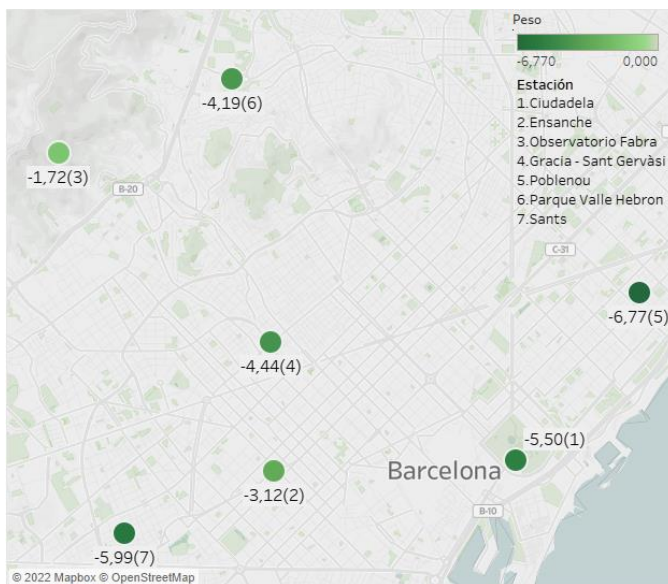
## TEMPERATURA

La temperatura es una variable numérica que en nuestro modelo funciona distinto de las variables observadas en los apartados anteriores. Al no ser dicotómica, el coeficiente ya no indica cuánto varía la variable dependiente en función de si la temperatura existe o no (como es el caso de las fases de la desescalada o el confinamiento), sino expresa el incremento marginal de la variable dependiente cuando la variable independiente incrementa en una unidad. Por tanto, el coeficiente va a ser menor que una dicotómica porque indica el impacto del incremento de cada grado y no simplemente de la presencia de temperatura

En este caso, la temperatura se ha obtenido de las estaciones climatológicas españolas, por lo que la variable numérica indica la media de la temperatura diaria en grados centígrados.

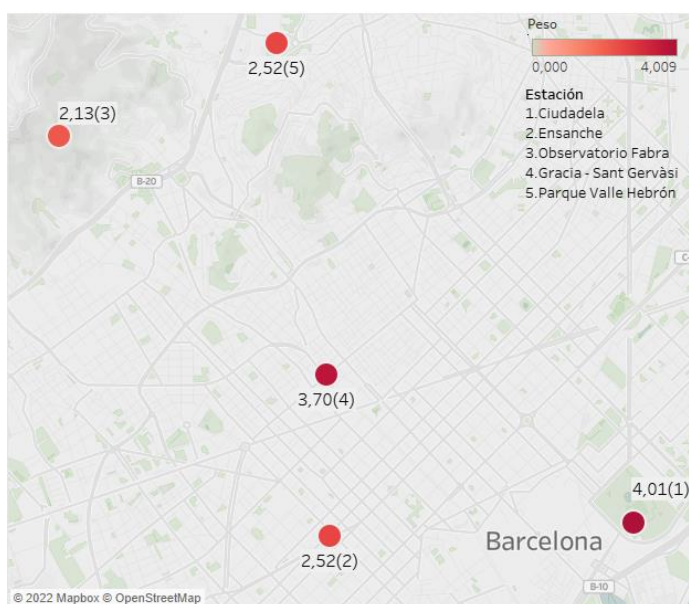
Los contaminantes en los que más peso ha tenido esta variable en los modelos son el NO y el O<sub>3</sub>. En el NO<sub>2</sub> y en las partículas PM<sub>10</sub> su peso era prácticamente despreciable, por lo que interesa focalizar el estudio de esta variable en los dos primeros contaminantes.

Figura 21: Impacto de la temperatura en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Impacto de la temperatura en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

Como indican las figuras, la temperatura tiene – en todas las estaciones de calidad del aire – un impacto negativo en el NO y un impacto positivo en el O<sub>3</sub> (concuerta con los datos de la Tabla 1, donde la temperatura solamente tiene valores significativos negativos para el O<sub>3</sub> y positivos para el NO). Estos dos efectos opuestos pueden tener diferentes explicaciones, debido a la alta correlación que hay entre el NO y el O<sub>3</sub>.

De esta manera, puede ser que la temperatura incida negativamente (por alguna razón química que no es objeto de estudio de este trabajo) en el NO y que, por lo tanto, al haber menos NO para oxidarse, haga que los niveles de O<sub>3</sub> aumenten. Por otra parte, ya se ha apuntado que el O<sub>3</sub> se produce con mayor facilidad en las zonas de alta irradiación solar. Puesto que el aumento de la temperatura suele venir acompañado de una mayor radiación solar, este aumento en los niveles de O<sub>3</sub> puede tener su origen en la radiación, siendo el aumento de la temperatura una causa más de esta radiación y no el origen del incremento de O<sub>3</sub>. Por último, puede basarse en algo tan simple como que las altas temperaturas hacen que andar por la calle sea más atractivo. Por tanto, las personas tenderán a coger menos el coche con altas temperaturas, reduciendo los niveles de NO, y aumentando por tanto los niveles de O<sub>3</sub>. Esta explicación cuadraría con las figuras anteriores, en las cuales se muestra un mayor impacto en las zonas céntricas de la ciudad, donde el tráfico es mayor que en el exterior, de manera ligeramente similar al impacto del confinamiento. De todas maneras, puede ser interesante un estudio en profundidad en el futuro de la relación entre la temperatura y la contaminación de estos dos gases.

#### NIVEL DE PRECIPITACIONES

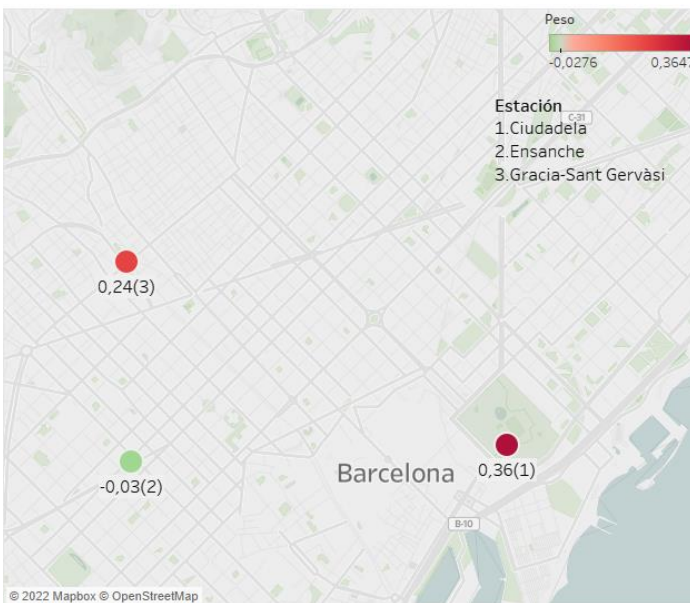
Para medir el nivel de precipitaciones se ha utilizado una variable numérica que expresa la medición de un pluviómetro en las estaciones de clima. Por tanto, la medida expresa los milímetros, o lo que es lo mismo, los litros por metro cuadrado que han caído en un día (Viñas, 2013). Respecto a esta variable cabe destacar dos hechos: el primero, que al igual que la temperatura, al ser numérica y no dicotómica el peso va a ser menor pues se mide el incremento marginal en la medición de un contaminante cuando incrementa un milímetro el nivel de precipitaciones; el segundo, como ya se ha comentado en el apartado de tratamiento de datos, se ha prescindido del dato de las precipitaciones en aquellas estaciones en las que la estación más cercana (Observatorio Fabra) tenía un alto número de valores vacíos. Por tanto, el estudio se ha encontrado con esta limitación.

Figura 23: Impacto del nivel de precipitaciones en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Impacto del nivel de precipitaciones en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

De los cuatro contaminantes analizados, los dos en los que más peso tiene la variable son el NO y el O<sub>3</sub>. En estas figuras se puede comprobar que el peso no es especialmente relevante, sobre todo comparado con otros pesos como los de las fases de la desescalada. Sin embargo, es interesante analizar cómo cada litro adicional de lluvia tiene un impacto negativo en la contaminación de NO, mientras que es menos claro el impacto en el O<sub>3</sub>.



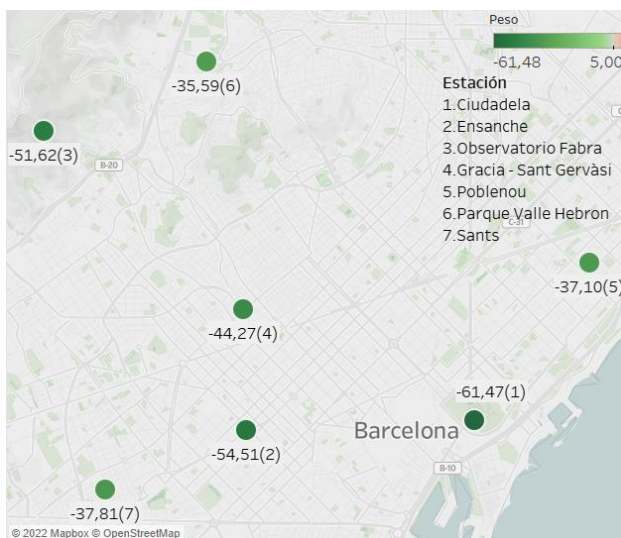
Es comúnmente pensado que las precipitaciones ayudan a disminuir la contaminación de la ciudad. Más allá de razones químicas que no son objeto de estudio, puede estar relacionado con un patrón de comportamiento: con lluvia se hace – por lo general – menos actividad, ya que suele implicar un comportamiento más aislado que reduce la interacción social y que provoca que las personas se queden en sus casas. De esta manera, puede impactar negativamente en coger el coche. Podría resultar interesante en el futuro analizar más en profundidad – de manera similar a la temperatura – el impacto concreto de las precipitaciones en los niveles de óxidos de nitrógeno en una ciudad.

Respecto del  $O_3$ , se tienen solamente tres datos muy cercanos al cero, por lo que no se puede hacer ninguna afirmación con seguridad. Es cierto que la teoría apoya a un menor nivel de generación de  $O_3$  con las precipitaciones, puesto que hay menos irradiación solar (factor que ya se ha comentado que favorece la generación de  $O_3$ ). Sin embargo, una disminución de los niveles de NO genera un aumento de la presencia de  $O_3$  debido a la falta de oxidación, por lo que también resultaría interesante analizar en el futuro el impacto de las precipitaciones en el  $O_3$ , ya que la limitación de datos de este trabajo impide analizar en profundidad.

## ZBE

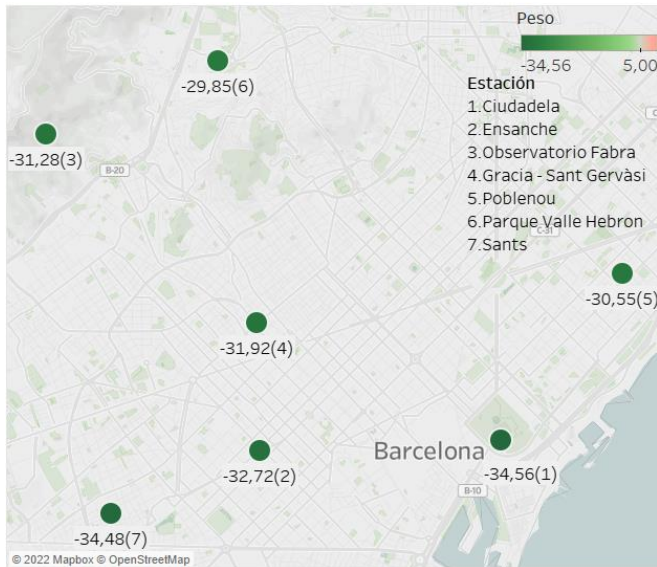
La ZBE ha sido creada para reducir los niveles de tráfico de Barcelona, con el consiguiente impacto que tiene este hecho en los diferentes contaminantes (Área Metropolitana de Barcelona, s.f.).

Figura 25: Impacto de la ZBE en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Impacto de la ZBE en el NO<sub>2</sub>



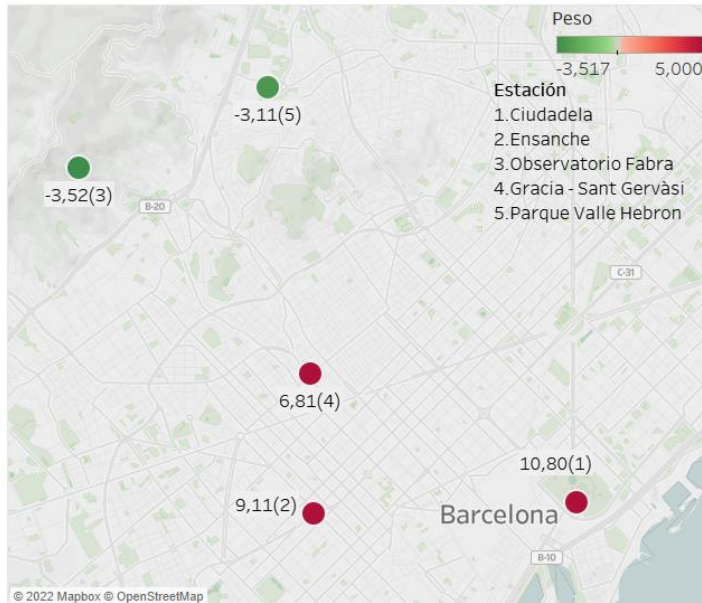
Fuente: Elaboración propia

Las figuras muestran una gran disminución de los niveles de óxidos de nitrógeno a raíz de la ZBE. No obstante, los mapas revelan dos hechos que gozan de importancia para este análisis: en primer lugar, el impacto es notablemente menor que en el confinamiento. Se puede utilizar como ejemplo la estación del Ensanche<sup>3</sup>, donde el confinamiento tuvo un efecto mucho mayor (70,00). Es comprensible este dato, puesto que la ZBE limita a determinados vehículos y el confinamiento supone una paralización de todo movimiento, pero este análisis resulta de utilidad para observar que impedir a determinados vehículos la entrada a Barcelona tiene un gran impacto, parecido a si se paralizara el movimiento de un 60% mitad de las personas de la ciudad (el valor medio de los coeficientes para NO<sub>2</sub> son de 0,322 para la ZBE y de 0,533 para el confinamiento).

El otro dato que goza de relevancia y se puede deducir de las figuras anteriores es la menor distinción entre las estaciones de la periferia de la ciudad respecto de las céntricas. Los mapas contrastan con los anteriores, donde la diferencia entre ambas zonas en la emisión de NO y NO<sub>2</sub> resultaba mayor, pero en este caso se muestran unos niveles similares en todas las estaciones, sin haber una gran diferencia según su localización. Resulta asimismo curioso cuando se comparan las figuras anteriores con la siguiente:

<sup>3</sup> Procede recordar que merece especial atención por ser la estación con mayor R-Squared para NO y NO<sub>2</sub>

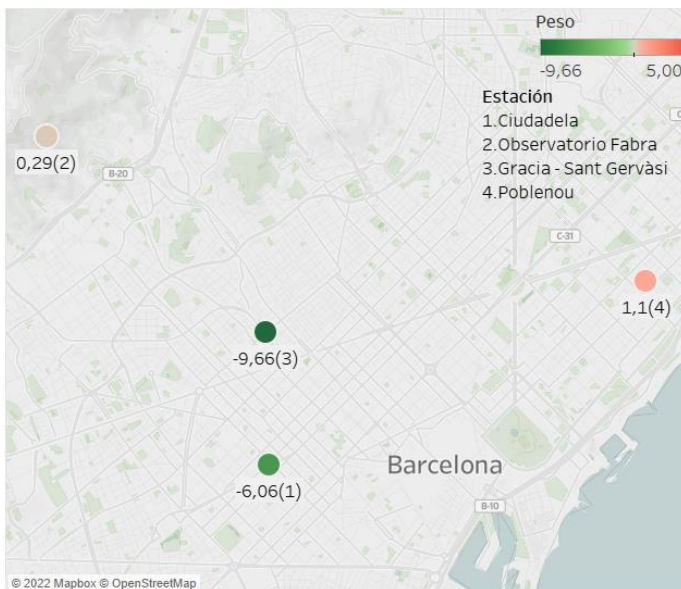
Figura 27: Impacto de la ZBE en el O<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia

A pesar de presentar un impacto menor que el confinamiento, la ZBE ha tenido efectos radicalmente opuestos entre el interior y el exterior de la ciudad. Cabe resaltar que estos datos son de gran fiabilidad, pues todos ellos son significativos (la Tabla 1 muestra que el 100% de los valores de la ZBE para el O<sub>3</sub> son significativos).

Figura 28: Impacto de la ZBE en PM<sub>10</sub>



Fuente: Elaboración propia

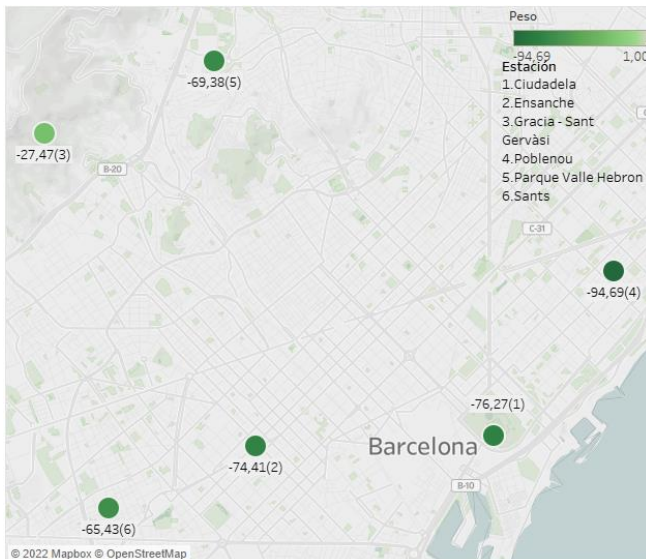
En cuanto al impacto de la ZBE en la emisión de partículas PM<sub>10</sub>, el mapa muestra un ligero descenso de estas partículas en la presencia de este contaminante, especialmente en las zonas interiores de la ciudad.

Este pequeño impacto viene acompañado de un 25% de valores negativos significativos, lo cual implica que efectivamente la ZBE ha ayudado a reducir los niveles de este contaminante, pero en unas cantidades tan pequeñas que reflejan que las partículas que liberan los vehículos por las ciudades son una pequeña proporción de todas las partículas que forman parte del PM<sub>10</sub>. Esta conclusión es apoyada por el análisis del polvo de los vientos del Sáhara y de la combustión de biomasa.

### NO LABORABLES

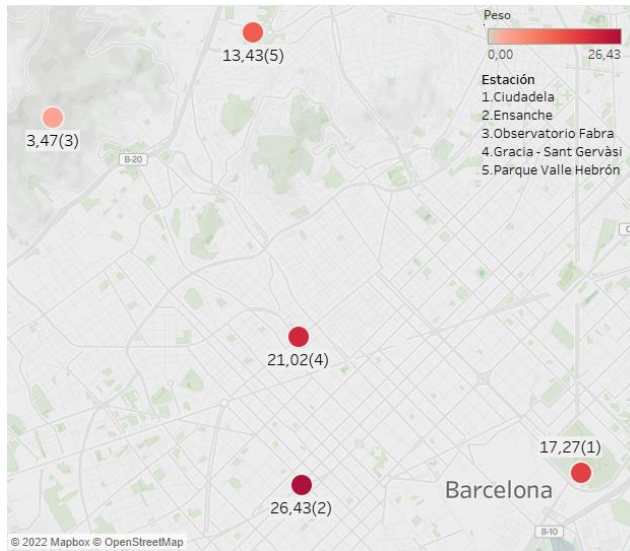
Los tres días no laborables tienen un efecto similar en los contaminantes, pero con distinta intensidad, teniendo un mayor impacto el domingo y los festivos que el sábado. Dada la relación entre el O<sub>3</sub> y el NO, se ha realizado el análisis espacial del domingo en estas dos variables y se ha analizado el impacto de los días festivos en el PM<sub>10</sub> y en el NO<sub>2</sub>.

*Figura 29: Impacto del domingo en el NO*



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 30: Impacto del domingo en el O<sub>3</sub>

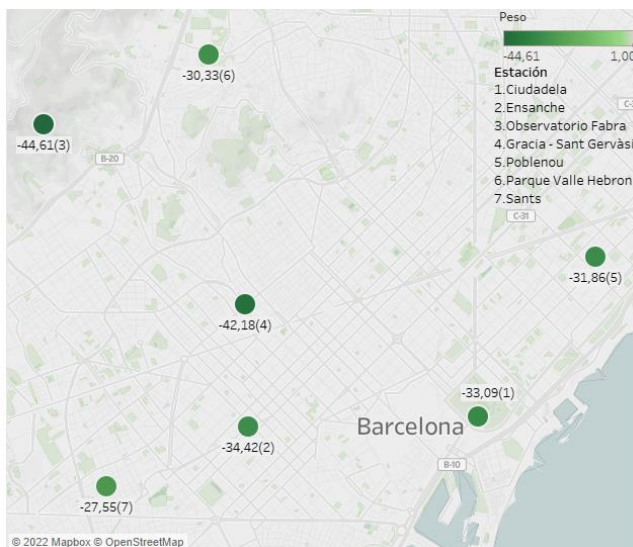


Fuente: Elaboración propia

El domingo es la variable con mayor influencia en la emisión de NO de todas las variables estudiadas. La reducción del tráfico y el cese de actividad industrial provoca una reducción en los niveles mayor aún que la ZBE, lo cual refleja que el tráfico no es la única fuente relevante de este gas (apoya lo mencionado en el incremento de NO de la Fase 0, donde el tráfico no aumentó en gran medida, pero los niveles de NO sí). En esta misma línea, durante los fines de semana es frecuente salir de los hogares – más aún en una ciudad como Barcelona, con playa y montaña cercanas que favorece realizar diversas actividades – por lo que las calefacciones de las casas están menos tiempo funcionando.

No obstante, la distribución espacial de la emisión de O<sub>3</sub> muestra que el contraste entre interior y exterior también permanece los domingos. Por ello, el tráfico sigue siendo el factor determinante que marca la diferencia en la contaminación entre el interior y el exterior de la ciudad.

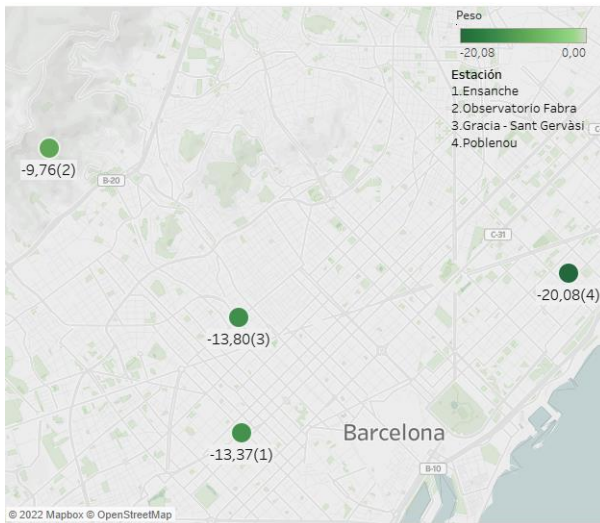
Figura 31: Impacto de los días festivos en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

Durante los días festivos la contaminación presenta una homogeneidad en las distintas estaciones de la ciudad. Este hecho encuentra su explicación en que un día festivo tiene un impacto similar en las personas que viven en las afueras frente a la periferia, ya que un 72% de los festivos de los últimos años han sido viernes, fin de semana o lunes (Calendarios Laborales, 2021), favoreciendo los viajes fuera de la ciudad. A modo de ejemplo, durante el puente del Pilar de octubre de 2020, 419.268 vehículos abandonaron Barcelona, lo cual es un 15% menos que el año anterior debido a la pandemia (El Español, 2020). Este dato refleja el alto abandono de la ciudad durante los festivos.

Figura 32: Impacto de los días festivos en PM<sub>10</sub>



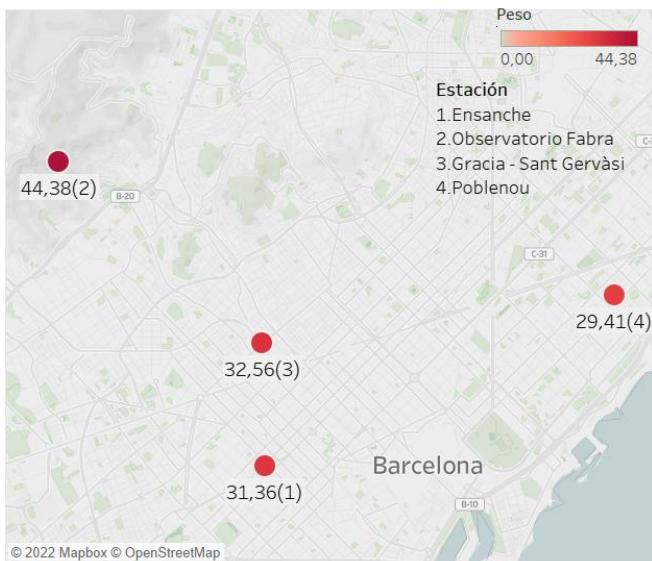
Fuente: Elaboración propia

El mapa y los resultados numéricos (-0,143 con un 75% de valores negativos significativos) prueban cómo la reducción del tráfico y la menor actividad durante los días festivos favorecen la reducción de este contaminante. No obstante, se ha explicado que las partículas procedentes de los vehículos no presentan una alta proporción de todas las partículas PM<sub>10</sub>. Por esta razón, si se analiza atentamente la estación con un menor impacto (Observatorio Fabra) es la que presenta un mayor R-squared para este contaminante (0,4), considerablemente mayor que el de Poblenou (0,27). Por tanto, este impacto es efectivamente negativo, pero no de tanta magnitud como parece en el mapa.

### POLVO DEL SÁHARA

Dado el irrelevante impacto del polvo proveniente del Sáhara en el NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, procede realizar un análisis espacial exclusivamente del PM<sub>10</sub>.

Figura 33: Impacto del polvo del Sáhara en  $PM_{10}$



Fuente: Elaboración propia

La variable polvo del Sáhara es la más relevante para este contaminante (0,344 con un 100% de valores positivos significativos), siendo superior a la suma de los coeficientes negativos del confinamiento y la ZBE (-0,233 y -0,036), lo cual refleja el reducido control que los seres humanos tenemos sobre este contaminante.

Respecto a su distribución geográfica, la periferia de la ciudad es la zona más afectada por la presencia de estos vientos africanos. Dado que el Observatorio Fabra es la estación con mayor R-squared para este contaminante (0,4) el impacto que ofrece la figura es el más fidedigno. Los resultados muestran que esta estación muestra una contaminación mayor en un 36% que la media de las estaciones del interior de la ciudad. Ello implica que la zona del Observatorio Fabra – siendo la que mejores niveles tiene en términos de NO y NO<sub>2</sub> – es especialmente sensible ante la presencia de este contaminante. La falta de edificios y menor densidad de población hacen que estos vientos traigan consigo las partículas PM<sub>10</sub> y tarden más en disiparse, permaneciendo durante más tiempo y haciendo del noroeste de la ciudad una zona poco saludable para pasear en las épocas de vientos del Sáhara.

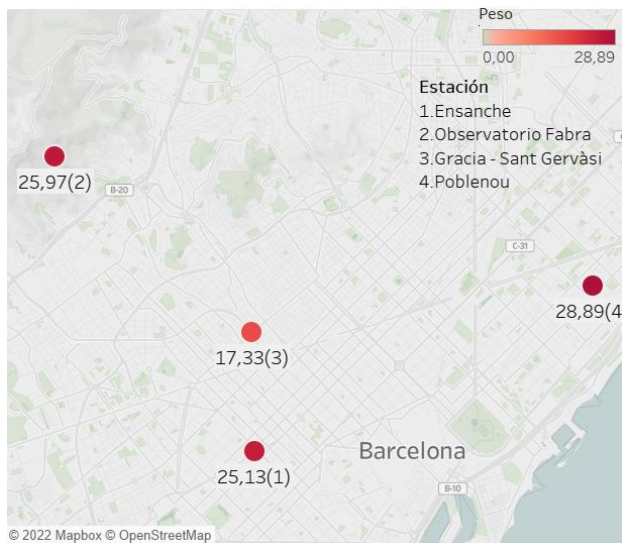
Por el contrario, el nordeste de la ciudad, en el distrito de Poblenou cercano al mar, es afectado en menor medida por estos vientos. Los vientos procedentes del mar ayudan a disipar con mayor rapidez estas partículas, reduciendo su concentración.



## BIOMASA

La combustión de biomasa para generar energía presenta un gran beneficio como fuente de energía renovable, pero en términos de contaminación resulta ser la segunda variable con mayor impacto en partículas PM<sub>10</sub> (0,243). Con una influencia mayor que cualquiera de los días festivos, el análisis espacial muestra la contaminación cuando se produce la quema de biomasa:

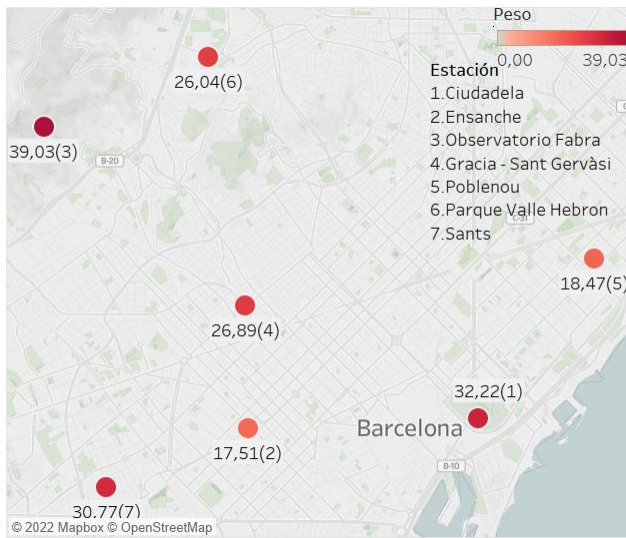
*Figura 34: Impacto de la combustión de Biomasa en PM<sub>10</sub>*



*Fuente: Elaboración propia*

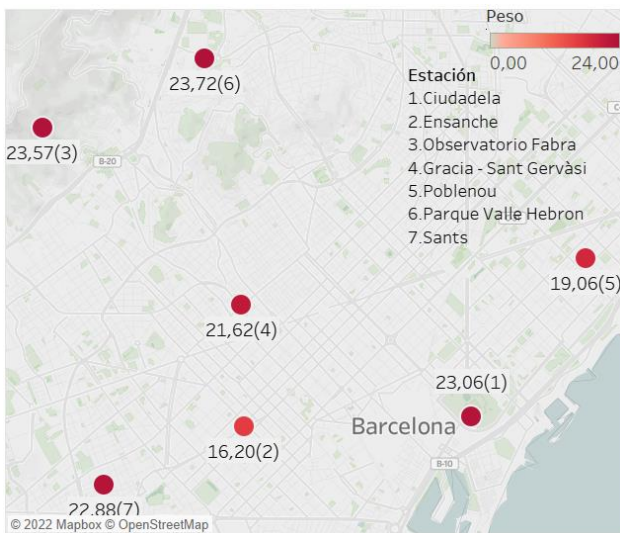
La figura muestra un impacto homogéneo salvo por un coeficiente menor en la estación de Gràcia – Sant Gervasi. Dado el origen industrial de estas partículas, la figura muestra la menor concentración de centrales de biomasa en la zona de Gràcia – Sant Gervasi, lo cual concuerda con las características de estos distritos mencionadas en el capítulo anterior (presencia del casco antiguo y zona de Barcelona con más zonas verdes).

Figura 35: Impacto de la combustión de Biomasa en el NO



Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Impacto de la combustión de Biomasa en el NO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia

Respecto al efecto de esta generación de energía renovable en los óxidos de nitrógeno, este es menor que otras variables como la ZBE o los días no laborables, pero aun así tiene un impacto que no debe ser despreciado (0,249 y 0,214). El mayor número de estaciones ayudan a realizar un análisis espacial que confirma lo sostenido respecto al PM<sub>10</sub>. Las zonas más céntricas de la ciudad (Ensanche y Gràcia – Sant Gervasi) presentan menores niveles que el noroeste o el sur de la ciudad (Observatorio Fabra y Sants), pero en este caso los niveles en Poblenou son menores, lo cual contrasta con los niveles de PM<sub>10</sub>. Puesto que el R-Squared de Poblenou para los óxidos de nitrógeno es

significativamente mayor que para  $PM_{10}$  (0,43 y 0,41 frente a 0,27), resultan más lógicos los valores de los óxidos de nitrógeno, pues Poblenou es una zona principalmente residencial donde la presencia de estas centrales es menor que en otras zonas más industriales como Sants o los alrededores del Observatorio Fabra.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

El presente trabajo ha analizado el efecto de las restricciones de la movilidad durante el estado de alarma que tuvieron lugar en España del 15 de marzo al 21 de junio de 2020 a causa de la pandemia del Covid-19 en la contaminación de la ciudad de Barcelona. En concreto, se ha analizado las variaciones en los niveles de NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub>, comparando el efecto del confinamiento y de las fases de la desescalada con otras variables que influyen en la contaminación.

Durante el confinamiento los niveles de contaminación se vieron afectados de distinta manera según el contaminante: el NO descendió en un 68,38%, el NO<sub>2</sub> en un 48,85%, las partículas PN<sub>10</sub> en un 31,22%, mientras que el O<sub>3</sub> aumentó en un 24,99%. Este impacto tampoco ha sido homogéneo entre las distintas zonas de Barcelona, dándose una diferencia radical entre los distritos céntricos de la ciudad (en Ciudadela, Ensanche, Gràcia – Sant Gervasi, Sants y Poblenou el NO disminuyó un 71,88%, el NO<sub>2</sub> un 50,64% y el O<sub>3</sub> aumentó en un 38,54%) que en los distritos del norte más periféricos (entre el Parque del Valle de Hebrón y el Observatorio Fabra el NO disminuyó un 39,7%, el NO<sub>2</sub> un 41,01% y el O<sub>3</sub> aumentó un 19,65%).

Estos resultados encuentran su explicación en el hecho de que el tráfico rodado es de mayor intensidad en los distritos céntricos, por lo que los meses de confinamiento causaron un mayor impacto en la población del interior de la ciudad. A este dato se le añade la alta densidad de población de los distritos en los que más impacto tuvo el confinamiento (Ensanche, Ciudadela, Gràcia – Sant Gervasi), que aumenta por tanto los efectos de las medidas de restricción de movilidad.

Por lo tanto, los niveles de los óxidos de nitrógeno se reducen en mayor proporción en aquellos momentos que el tráfico se reduce en mayor cantidad (los no laborables, especialmente los festivos por los viajes, la ZBE y el confinamiento). Sin embargo, la ZBE ha tenido un gran impacto considerando la baja cantidad de coches a los que la ha afectado, por lo que ha demostrado ser una medida de gran efectividad sin implicar grandes cambios en la ciudad.

Respecto a la contaminación del PM<sub>10</sub>, este contaminante ha resultado ser sensible al tráfico y – en menor medida – a la movilidad humana, si bien el gran impacto que recibe es la presencia de polvo procedente de los vientos del Sáhara y de la combustión

de biomasa. Mientras las dos primeras variables implican un mayor impacto en el interior de la ciudad que en el exterior, el polvo del Sáhara afecta especialmente a las afueras de la ciudad, por lo que controlar los niveles de este contaminante resulta de mayor complejidad.

En base a estas observaciones, se pueden proponer medidas futuras para reducir los elevados niveles de contaminación en la ciudad de Barcelona de NO, NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>. Sin embargo, cuando se quieran controlar los dos primeros se ha de tener en cuenta que el impacto será notablemente mayor en el centro de la ciudad y que no resulta necesario limitar la movilidad de todos los vehículos, sino focalizar en aquellos que contaminen más (los más antiguos), pues no resulta necesario restringir el paso a todos los vehículos para poder mantener estables los niveles de los óxidos de nitrógeno. En cambio, si se pretende reducir la presencia de partículas PM<sub>10</sub> en aquellos momentos que estén especialmente altos por presencia de vientos del Sáhara, como fue el caso de marzo de 2022 en España (RTVE, 2022), puede ser conveniente limitar durante un tiempo el uso de vehículos para reducir la emisión de más partículas.

En relación con lo anterior, se propone como futura línea de investigación el análisis de emisión de partículas PM<sub>10</sub> según el tipo de vehículos, para poder focalizar de igual manera que se puede hacer con los óxidos de nitrógeno. Adicionalmente, resultaría interesante investigar en profundidad la relación entre los factores climatológicos como la temperatura y los niveles de precipitación en los niveles de óxidos de nitrógeno y de O<sub>3</sub>.

Este trabajo se ha encontrado con limitaciones de acceso a fuentes de datos que ha impedido hacer un análisis exhaustivo de las implicaciones de las subidas de temperatura y de los niveles de precipitación, por lo que los resultados obtenidos aportan información sobre la correlación entre ambas variables climatológicas y los cambios en los niveles de los contaminantes, pero se podrían abrir investigaciones acerca del impacto en los distintos lugares de Barcelona condicionados por el relieve, la altura o la influencia de los vientos marítimos, dada la proximidad de la ciudad condal al Mar Mediterráneo.

## BIBLIOGRAFÍA

### 1. ARTÍCULOS ACADÉMICOS

- ALARCÓN RUIZ DE LA FUENTE, A. (2021). *Análisis de las condiciones meteorológicas en las inmediaciones del puerto de Barcelona y su afectación en el tráfico* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- BACARDIT, N. S., BARGALLÓ, E. V., UGENA, J. A., & VILA, L. C. (2018). Contaminación atmosférica, riesgo cardiovascular e hipertensión arterial. *Hipertensión y riesgo vascular*, 35(4), pp. 177-184.
- BOGONI, G. & BELCASTRO NILDA, E. (2011), *Una actividad de formación práctica sobre correlación y regresión lineal simple con Rstudio en la enseñanza de estadística*. Universidad Nacional de Misiones.
- CÁRCEL-CARRASCO, J., PASCUAL-GUILLAMÓN, M. & LANGA-SANCHÍS, J. (2021). Analysis of the effect of COVID-19 on air pollution: perspective of the Spanish case, *Environmental Science and Pollution Research*,(2021), N°. 28, pp. 36880-36893.
- CIABURRO, G. (2018). *Regression Analysis with R: Design and develop statistical nodes to identify unique relationships within data at scale*. pp. 23-26. Packt Publishing Ltd.
- ESPINOZA GÓMEZ, A., & TITO MEZA, S. K. (2019). *Distribución espacial de las partículas en suspensión PM10 en relación al viento y la temperatura del aire en la zona sur del Cercado del Callao*. Universidad Nacional del Callao. (Disponible
- GARCÍA, Ó. R., GARCÍA, L. M. J., CASTELLÓ, L. P., APARICIO, A. G., & VIDAL, A. P. (2018). *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*. pp. 1-4. Universidad Miguel Hernández.
- GOLPE, R., MARTÍN-ROBLES, I., & SANJUÁN-LÓPEZ, P. (2017). Combustión de biomasa como factor de riesgo para enfermedad pulmonar obstructiva crónica en España. *Arch. bronconeumol.*(Ed. impr.), 289-289.

- KOPPEN, W. & GEIGER, R. (1936), *Das geographische System der Klimate*, Berlín.
- LI, G., ZHOU, M., CAI, Y., ZHANG, Y. & PAN, X. (2011). Does temperature enhance acute mortality effects of ambient particle pollution in Tianjin City, China. *Science of the Total Environment*, vol. 409, pp. 1811-1817.
- MÉNDEZ-ROJAS, M. Á., FLOOD-GARIBAY, J. A., & PÉREZ-CORTÉS, E. J. (2019). Sistema inmune respiratorio y consecuencias de contaminación aérea por materia particulada. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, Vol. 57, N° 3, pp. 170-180.
- MONTERO GRANADOS, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. *Documentos de Trabajo en Economía Aplicada* Universidad de Granada.
- PARRA, R. (2017). Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, Vol. 9, N° 1.
- RODRÍGUEZ-JAUME, M. J., & MORA CATALÁ, R. (2001). Estadística Informática: casos y ejemplos con el SPSS. *Capítulo 4: Análisis de regresión múltiple*.
- SÁNCHEZ CARABALLO, J. M. (2012). Características fisicoquímicas de los gases y partículas contaminantes del aire. Su impacto en el asma. *Iatreia*, 25(4), 369-379.
- TOBIÁS, A., CARNERERO, C., RECHE, C., MASSAGUÉ, J., VIA, ML, CRUZ MINGUILLÓN, M., ALASTUEY, A. & QUEROL, A. (2020, 5 de abril), Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic, *Science of the Total Environment*, Vol. 726
- VALIENTE SALINAS, A. (2014) *Impacto Económico Para Un País De Albergar Unos Juegos Olímpicos*. Universidad Pontificia Comillas. (Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/450> Último acceso: 12/02/2022
- YOHANNESSEN, K., & UBILLA, C. (2021). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y ASMA EN NIÑOS. *Neumología Pediátrica*, Vol. 16, N° 4, pp. 164-166.

## 2. INFORMES

Agencia de Salud Pública de Barcelona (2019), *Qualitat de l'aire i impacte en salut a Barcelona 2019*. (Disponible en: [https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2020/10/ASPB-INFO\\_qualitat\\_aire\\_2019-02.pdf](https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2020/10/ASPB-INFO_qualitat_aire_2019-02.pdf). Último acceso: 09/06/2022)

Agencia Europea del Medio Ambiente (2021), *Health impacts of air pollution in Europe, 2021*. (Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/health-impacts-of-air-pollution>. Último acceso: 20/05/2022).

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2002). *ToxFAQs™ Óxidos de Nitrógeno*. (Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts175.html#:~:text=EI%20mon%C3%B3xido%20de%20nitr%C3%B3geno%20es,a%20temperaturas%20sobre%2070%20F](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html#:~:text=EI%20mon%C3%B3xido%20de%20nitr%C3%B3geno%20es,a%20temperaturas%20sobre%2070%20F). último acceso: 15/04/2022)

Área Metropolitana de Barcelona (s.f.), *ZBE Rondas de Barcelona*. (Disponible en: <https://www.zbe.barcelona/zones-baixes-emissions/la-zbe.html>. Último acceso: 3/06/2022)

Ayuntamiento de Barcelona (2021). *Anuari Estadístic de la Ciutat de Barcelona*. (Disponible en: <https://ajuntament.barcelona.cat/estadistica/castella/Anuaris/Anuari/Anuari2021.pdf>. Último acceso: 12/02/2022)

Banco de España (2021). Informe Anual 2020. *Capítulo 1. El impacto económico de la pandemia*. (Disponible en: [https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesAnuales/InformesAnuales/20/Fich/InfAnual\\_2020-Cap1.pdf](https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesAnuales/InformesAnuales/20/Fich/InfAnual_2020-Cap1.pdf).. Último acceso: 05/06/2022)

Calendarios Laborables (2019), *Calendario Laboral Barcelona 2019*. (Disponible en: <https://www.calendarioslaborales.com/calendario-laboral-barcelona-2019.htm>

Calendarios Laborables (2020), *Calendario Laboral Barcelona 2020*. (Disponible en: <https://www.calendarioslaborales.com/calendario-laboral-barcelona-2020.htm>



Calendarios Laborables (2021), *Calendario Laboral Barcelona 2021*. (Disponible en: <https://www.calendarioslaborales.com/calendario-laboral-barcelona-2021.htm>)

Direcció General de Qualitat Ambiental (2015). Experiencia en la aplicación del Plan de Mejora de la Calidad del Aire en la región metropolitana de Barcelona. Generalitat de Catalunya. (Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/12aplicacionplancalidadaireenbarcelona\\_tcm30-188076.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/12aplicacionplancalidadaireenbarcelona_tcm30-188076.pdf). Último acceso: 08/06/2022)

DIRECTIVA (UE) 2016/2284 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE

Generalitat de Catalunya, *Qualitat de l'aire als punts de mesurament automàtics de la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica*. (Disponible en: <https://analisi.transparenciacatalunya.cat/en/Medi-Ambient/Qualitat-de-l-aire-als-punts-de-mesurament-autom-t/taf-thgu>. Último acceso: 20/03/2022)

Gobierno de España, *Mapa de transición a la nueva normalidad*. (Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/covid-19/Paginas/mapa-fases-desescalada.aspx>. Último acceso: 12/03/2022)

Instituto de Estadística de Cataluña (2021). *El municipio en cifras. Barcelona*. (Disponible en: <https://www.idescat.cat/emex/?id=080193&lang=es>. Último acceso: 14/05/2022)

Instituto de Estadística de Cataluña (2021). *Meteorología. Observaciones principales. Comarcas y Aran.* (Disponible en: <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=214&lang=es>. Último acceso: 14/05/2022)

Instituto de Estadística de Cataluña (2021). *Parque de vehículos. Por tipo. Provincias*. (Disponible en: <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=589&lang=es>)

Instituto de Estadística de Cataluña (2022), *Matriculación por vehículos. Tipo. Provincias.* (Disponible en: <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=590&lang=es> Último acceso: 22/05/2022)

Instituto Nacional de Estadística (2018). *España en cifra 2018s.* p. 40. (Disponible en: [https://www.ine.es/prodyser/espa\\_cifras/2018/40/#zoom=z](https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2018/40/#zoom=z). Último acceso: 19/05/2022)

IPCC (2022), *Climate Change 2021: Physical Basis*, P.63. (Disponible en: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf). Último acceso: 10/03/2022)

Ministerio de Transición Ecológica (2019), *Informe de Evaluación de la Calidad del Aire en España 2018.* (Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2018\\_tcm30-498764.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2018_tcm30-498764.pdf). Último acceso: 25/05/2022)

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020), *Informe de Evaluación de la Calidad del Aire en España 2019.* (Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2019\\_tcm30-510616.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2019_tcm30-510616.pdf) Último acceso: 25/05/2022)

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021), *Informe de Evaluación de la Calidad del Aire en España 2020.* (Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2020\\_tcm30-529210.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2020_tcm30-529210.pdf). Último acceso: 25/05/2022)

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.), *Gases precursores de ozono troposférico.* (Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y->

[evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases\\_precursores\\_ozono.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx)

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.) *Partículas en suspensión*. (Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx> . Último acceso: 19/04/2022)

OMS (2021), *7 million premature deaths annually linked to air pollution..* (Disponible en: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution#:~:text=Every%20year%2C%20exposure%20to%20air,respriatory%20infections%20and%20aggravated%20asthma>. Último acceso: 25/05/2022).

OMS (2021). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*, (Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa,a%20gudas%2C%20entre%20ellas%20el%20asma](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa,a%20gudas%2C%20entre%20ellas%20el%20asma). Último acceso: 25/05/2022)

OMS (2021), *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. (Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y> último acceso: 18/05/2022)

Real Decreto 818/2018, de 6 de julio, sobre medidas para la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos.

Transparencia Catalunya, *Qualitat de l'aire als punts de mesurament automàtics de la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica* (Disponible en: <https://analisi.transparenciacatalunya.cat/en/Medi-Ambient/Qualitat-de-l-aire-als-punts-de-mesurament-autom-t/taf-thgu>. Último acceso: 20/03/2022)

### 3. RECURSOS DE INTERNET

AEMET, *AEMET OpenData API*. (Disponible en: [http://www.aemet.es/es/datos\\_abiertos/AEMET\\_OpenData](http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData). Último acceso: 10/04/2022)

Ayuntamiento de Barcelona (2020), *Fase 1: nuevas medidas y servicios* [https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/es/noticia/fase-1-nuevas-medidas-y-servicios\\_953117](https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/es/noticia/fase-1-nuevas-medidas-y-servicios_953117)

Ayuntamiento de Barcelona (2020), *Fase 2: Nuevas medidas, menos restricciones y más actividades* [https://www.barcelona.cat/infobarcelona/es/tema/informacion-sobre-la-gestion-del-covid-19/fase-2-nuevas-medidas-menos-restricciones-y-mas-actividades-2\\_957887.html](https://www.barcelona.cat/infobarcelona/es/tema/informacion-sobre-la-gestion-del-covid-19/fase-2-nuevas-medidas-menos-restricciones-y-mas-actividades-2_957887.html)

Ayuntamiento de Madrid, *Ozono y Salud*. (Disponible en: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Servicios-sociales-y-salud/Salud/Ozono-y-Salud/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=e4394bc638eaf310VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=0815c8eb248fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>. Último acceso: 19/05/2022)

BBC News Mundo (2022, 5 de mayo). Covid: el número real de muertes por la pandemia en todo el mundo es de casi 15 millones (y qué países de América Latina tienen mayor exceso de mortalidad), *BBC*. (Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-61333739>. Último acceso: 26/05/2022)

CSIC (2021), *3ª Jornada de sismología a l'Observatori Fabra*. (Disponible en: <https://geo3bcn.csic.es/index.php/news-events/events-2/9-3-jornada-de-sismologia-a-l-observatori-fabra?date=2021-11-14-00-00>

CONGOSTRINA, A.L. (25 de mayo de 2020), Barcelona amanece en Fase 1. *El País*. <https://elpais.com/espana/catalunya/2020-05-25/barcelona-amanece-en-fase-1.htm>

El Confidencial (2020), *Cataluña pasa a Fase 1 de desescalada y Madrid, en Fase 0 con mejoras*. (Disponible en: [https://www.elconfidencial.com/espana/2020-05-15/ultima-hora-coronavirus-contagios-muertes\\_2556204/](https://www.elconfidencial.com/espana/2020-05-15/ultima-hora-coronavirus-contagios-muertes_2556204/))

El Español (2020), *Casi 420.000 coches abandonan Barcelona durante el puente del Pilar*. (Disponible en: [https://cronicaglobal.elespanol.com/vida/coches-barcelona\\_393960\\_102.html#:~:text=10.10.2020%2017%3A28%20h,.2020%2017%3A41%20h.&text=Un%20total%20de%20419.268%20veh%C3%ADculos,al%20impacto%20de%20la%20pandemia](https://cronicaglobal.elespanol.com/vida/coches-barcelona_393960_102.html#:~:text=10.10.2020%2017%3A28%20h,.2020%2017%3A41%20h.&text=Un%20total%20de%20419.268%20veh%C3%ADculos,al%20impacto%20de%20la%20pandemia). Último acceso: 22/05/2022)

Expansión, *PIB de Cataluña*. (Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/pib/espana-comunidades-autonomas/cataluna#:~:text=El%20PIB%20Per%20c%C3%A1pita%20de,en%20Catalu%C3%B1a%20era%20de%2026.976%20>. Último acceso: 20/05/2022)

MONZÓN, L. (2018). *Comparativa de herramientas de Business Intelligence | Power BI vs Tableau vs Qlick* (Disponible en: <https://www.arbentia.com/comparativade-herramientas-de-business-intelligence-microsoft-power-bi/>. Último acceso: 10/03/2022)

ONU (2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, Centro de noticias de la ONU*. (Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#>. Último acceso: 24/05/2022)

ORÚS, A. (25 de febrero de 2022). *Tráfico de pasajeros en el aeropuerto de Barcelona-El Prat 2006-2021*. Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/486731/pasajeros-en-el-aeropuerto-de-barcelona/#statisticContainer>

ROMERO, J. (17 de junio de 2020), *BCN y Lleida están ya en Fase 3 y Cataluña pasa hoy a ser una unidad territorial única*, *El Confidencial* [https://www.elconfidencial.com/espana/2020-06-17/barcelona-lleida-fase-3-fin-alarma-cataluna\\_2643496/](https://www.elconfidencial.com/espana/2020-06-17/barcelona-lleida-fase-3-fin-alarma-cataluna_2643496/)

RTVE (2022), *La calima naranja de polvo del Sáhara cubre el mapa de España*  
<https://www.rtve.es/noticias/20220315/polvo-sahara-calima-espana-calidad-aire/2311500.shtml> (Último acceso: 22/05/2022)

Pontificia Universidad de Perú (s.f.), ¿Qué es Matlab? (Disponible en:  
<https://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/matlab/que-es-matlab/#:~:text=MATLAB%2C%20el%20lenguaje%20de%20c%C3%A1culo,sistemas%20din%C3%A1micos%20multidominio%20e%20integrados>.  
Último acceso: 04/06/2022)

RAÑA, A. Unidades de medición empleadas en Calidad del Aire. *Troposfera. Portal temático de contaminación atmosférica*. (Disponible en:  
<https://www.troposfera.org/conceptos/unidades-de-medicion-empleadas-en-calidad-del-aire/>. Último acceso: 10/03/2022)

RODRÍGUEZ, P., & ORDAZ, A. (2020), Radiografía de la contaminación en Barcelona: una década infringiendo los niveles de la UE debido a los coches. *El Diario*. (Disponible en: [https://www.eldiario.es/catalunya/barcelona/radiografia-contaminacion-barcelona-infringiendo-ue\\_1\\_1186806.html](https://www.eldiario.es/catalunya/barcelona/radiografia-contaminacion-barcelona-infringiendo-ue_1_1186806.html). Último acceso: 06/06/2022)

SÁNCHEZ SANTOS, J. M. (2015). *Introducción a R, RStudio y RCommander*. (Disponible en: <https://gredos.usal.es/bitstream/handle/10366/127037/24%20-%20IntroduccionR.pdf?sequence=1>

TORRES, M.E. (2019). El País. *Supermanzanas de Barcelona: el exitoso plan anticoches que arrancó con la oposición vecinal*. (Disponible en: [https://elpais.com/elpais/2019/10/07/icon\\_design/1570456123\\_584326.html](https://elpais.com/elpais/2019/10/07/icon_design/1570456123_584326.html)

UDIMA (2022), Introducción a la Organización de Empresas, *Clases de producción: diseño del proceso*. Libro online (Disponible en: <https://blogs.udima.es/administracion-y-direccion-de-empresas/libros/introduccion-a-la-organizacion-de-empresas-2/unidad-didactica-5-el-sistema-de-produccion-de-la-empresa/2-clases-de-sistemas-de-produccion-diseno-del-proceso/> . Último acceso: 02/06/2022

VIÑAS, M. (2013), Unidades de medida de la lluvia. *Meteored* <https://www.tiempo.com/ram/36703/unidades-de-medida-de-la-lluvia/>

VON DER LEYEN, (2020, 16 de septiembre), *Discurso del estado de la Unión en el Parlamento Europeo*. (Disponible en: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH\\_20\\_1655](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_20_1655). Último acceso: 08/06/2022)

ZACH (2021). *How to Interpret  $Pr(>|t|)$  in Regression Model Output in R*. (Disponible en: <https://www.statology.org/interpret-prt-regression-output-r/>