

# Análisis del impacto de la COVID19 en las emisiones de contaminantes de las aeronaves en el aeropuerto de Barcelona (2016-2022)

Nom de l'estudiant: Pau Moreno

Nom del tutor/a: Dra. Valeria Bernardo

DATA: 28/06/2023

**MEMÒRIA DEL TREBALL FINAL DE GRAU**

---

**Curs: 2022-2023**

**Estudios: Logística y Negocios Marítimos**

## Agradecimientos

Quisiera aprovechar esta oportunidad para expresar mi profundo agradecimiento a la Dra. Valeria Bernardo por su invaluable apoyo y orientación durante la realización de mi trabajo de fin de grado. Su dedicación y compromiso con mi crecimiento académico han sido fundamentales para el éxito de este proyecto.

Su experiencia y conocimientos, además de su paciencia y aliento constante han sido de gran valor para mejorar la calidad de mi trabajo. Por último, quiero agradecerle por su disponibilidad y disposición para resolver mis dudas y brindarme orientación cuando más lo necesitaba.

Agradecer al tribunal formado por el Dr. Jesús Martínez y la profesora Rosana Salama por el *feedback* dado en la entrega intermedia del trabajo final de grado. Con sus opiniones y recomendaciones, me hicieron sentir que estaba por el camino correcto.

También quería agradecer a mis padres la paciencia y comprensión durante las largas horas que dediqué a la investigación. Su apoyo emocional y presencia han sido de gran apoyo para enfrentarme a los inconvenientes que aparecían.

### **Abstracto**

El proyecto analiza el impacto de la COVID-19 en las emisiones de NOx de las aeronaves en el Aeropuerto de Barcelona durante el periodo de 2016 a 2022. Se comparan los datos recopilados de 11 estaciones de medición de las ciudades de Hospitalet y Barcelona (controladas) con las estaciones del Prat de Llobregat (tratamiento). Los resultados obtenidos, mediante el método de regresión lineal de diferencia en diferencia, muestran una reducción del 25,1% en las emisiones de NOx en el Aeropuerto de Barcelona en época de pandemia (marzo 2020 - mayo de 2021). Además, se observa que el incremento del 1% en el número de vuelos, provoca un aumento del 7,1% de las emisiones de NOx generadas por las aeronaves.

### **Abstracte**

El projecte analitza l'impacte de la COVID-19 en les emissions de NOx de les aeronaus en l'Aeroport de Barcelona durant el període de 2016 a 2022. Es comparen les dades recopilades d'11 estacions de mesurament de les ciutats d'Hospitalet i Barcelona (controlades) amb les estacions del Prat de Llobregat (tractament). Els resultats obtinguts, mitjançant el mètode de regressió lineal de diferència en diferència, mostren una reducció del 25,1% en les emissions de NOx en l'Aeroport de Barcelona en època de pandèmia (març 2020 - maig de 2021). A més, s'observa que l'increment de l'1% en el nombre de vols, provoca un augment del 7,1% de les emissions de NOx generades per les aeronaus.

### **Abstract**

The project analyses the impact of COVID-19 on aircraft NOx emissions at Barcelona Airport during the period from 2016 to 2022. Data collected from 11 measurement stations in the cities of Hospitalet and Barcelona (controlled) are compared with stations in Prat de Llobregat (treatment). The results obtained, using the difference-in-difference linear regression method, show a 25,1% reduction in NOx emissions at Barcelona Airport in the pandemic period (March 2020 - May 2021). In addition, it can be observed that an increase of 1% in the number of flights is associated with a 7,1% increase in NOx emissions generated by aircraft.

## **Índice**

1- Introducción.....	6
2- Marco teórico.....	8
2.1- Salud humana y polución.....	8
2.2- Sector aéreo y polución.....	10
2.3- COVID19, transporte aéreo y emisiones en las ciudades.....	12
2.4- Aeropuerto de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat.....	15
2.5- Conclusiones marco teórico.....	18
3- Objetivos e hipótesis.....	19
4- Datos y metodología.....	21
4.1- Datos.....	21
4.2- Metodología.....	27
5- Resultados.....	30
5.1- Estadísticas descriptivas.....	30
5.2- Autocorrelación.....	33
5.3- Heteroscedasticidad.....	34
5.4- Multicolinealidad.....	35
5.5- Regresiones lineales.....	37
5.5.1- Método Diferencias en Diferencias (DiD).....	37
5.5.2- Regresión adicional (tests de robusteza).....	41
6- Conclusiones y Recomendaciones.....	45
7- Cronograma.....	48
8- Bibliografía.....	49
9- Anexos.....	51
Anexo 1: Tabla de referencias literarias.....	51

### Lista de gráficas

<b>Gráfica 1:</b> Toneladas de CO2 emitidas por el sector aéreo 1990-2018 .....	10
<b>Gráfica 2:</b> Crecimiento del sector aéreo 1970-2020.....	11
<b>Gráfica 3:</b> Principales contaminantes emitidos por un avión durante su actividad.....	13
<b>Gráfica 4:</b> Tráfico Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat.....	16
<b>Gráfica 5:</b> Vuelos realizados en el Aeropuerto de Barcelona 2016-2022.....	23
<b>Gráfica 6:</b> Renta Bruta Familiar.....	24
<b>Gráfica 7:</b> Población de Barcelona, Hospitalet y Prat.....	25
<b>Gráfica 8:</b> Precipitación mensual acum. (mm) Barcelona, Hospitalet y Prat (2016-2022).....	26
<b>Gráfica 9:</b> Comparativa de niveles de NOx de las estaciones tratadas y controladas.....	32

### Lista de tablas

<b>Tabla 1:</b> Directrices sobre la calidad del aire.....	9
<b>Tabla 2:</b> Tráfico Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat (2016-2021).....	16
<b>Tabla 3:</b> Ubicaciones de las estaciones de medición.....	21
<b>Tabla 4:</b> Distancia de las estaciones respecto al aeropuerto.....	26
<b>Tabla 5:</b> Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, mínimos y máximos).....	30
<b>Tabla 6:</b> Correlación entre variables.....	36
<b>Tabla 7:</b> VIF.....	36
<b>Tabla 8:</b> Resultados estimados (DID).....	38
<b>Tabla 9:</b> Resultados estimados (test de robusteza).....	42
<b>Tabla 10:</b> Cronograma de trabajo.....	48
<b>Tabla 11:</b> Resumen de la literatura estudiada.....	51

### Lista de imágenes

<b>Imagen 1:</b> Estaciones de medición de la calidad del aire seleccionadas.....	22
---	----

## **1- Introducción**

La contaminación atmosférica en las ciudades es un hecho que lleva afectando a la población mundial desde la Revolución Industrial en el siglo XIX. Los datos muestran que el 99% de los habitantes del planeta respiran un aire que supera los límites recomendados según la Organización Mundial de la Salud. La contaminación del aire llega a matar a 13 personas cada minuto debido a enfermedades de corazón, cánceres de pulmón y accidentes cerebrovasculares. Este hecho es debido, en gran parte, al sector del transporte que contribuye no solo al empeoramiento de la calidad del aire sino también al cambio climático. (AEMA, 2020)

La extensa mayoría de sectores económicos como son las industrias y productoras de energía han ido reduciendo las emisiones desde 1990 mientras que el transporte ha ido creciendo, representando más una cuarta parte del total de emisiones de efecto invernadero de la Unión Europea. (EEA, 2022)

Los principales contaminantes más preocupantes generados por el sector del transporte debido a los efectos que provocan sobre la población son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) y dióxidos de carbono (CO<sub>2</sub>).

En 2018, el transporte representó casi el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea. Este proyecto se centrará en el sector aéreo siendo responsable del 13,2% de las emisiones que se concentran principalmente en óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre otros. (Anenberg et al., 2019)

Cabe destacar que las emisiones expulsadas de los motores de los aviones en el despegue y aterrizaje son principalmente compuestos no metálicos (NMVOC) con un 39% de las emisiones, seguido de un 26% de PM y 15% de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. ((EEA), 2022)

El objetivo de mi trabajo es analizar el impacto de la COVID19 en las emisiones de contaminantes de las aeronaves en el aeropuerto de Barcelona durante el período de 2016 a 2022. Para ello, se realizarán comparaciones con el período anterior y posterior a la pandemia, a partir de la recopilación de datos de las estaciones de medición del aire de las ciudades colindantes (Prat de Llobregat, Hospitalet de Llobregat y Barcelona).

Mediante el presente estudio, se pretende obtener una visión más detallada del impacto de la actividad del aeropuerto de Barcelona en la calidad del aire. Los resultados obtenidos podrán contribuir a la búsqueda de soluciones para la reducción de la

contaminación en la zona y a la mejora de la calidad del aire en beneficio de la salud pública y el medio ambiente.

El trabajo final de carrera se relaciona con el grado de Logística y Negocios Marítimos ya que combina el sector de transporte, en este caso, el aéreo y el impacto que genera en el medioambiente. La motivación para realizar este proyecto se debe, en primer lugar, es conocer el impacto de la actividad del aeropuerto en la calidad del aire siendo un tema de gran interés en la actualidad, ya que la contaminación del aire es un problema ambiental global que afecta la salud pública y el medio ambiente.

En segundo lugar, la pandemia de COVID-19 ha generado importantes cambios en la demanda de transporte aéreo y en las operaciones de los aeropuertos, lo que a su vez ha tenido un impacto en las emisiones de contaminantes de las aeronaves. Por lo tanto, existe una necesidad de analizar de manera más detallada y rigurosa el efecto de la pandemia en la contaminación del aire en los aeropuertos y a sus alrededores.

Finalmente, el estudio podría contribuir a la generación de soluciones para reducir la contaminación del aire en la zona del aeropuerto y ciudades colindantes, lo que sería un beneficio para la salud pública y el medio ambiente. El hecho de vivir en Cornellà de Llobregat, próximo al aeropuerto, me ha alentado a indagar en el tema, además de ser un gran defensor de la preservación del medioambiente.

El proyecto que se desarrolla a continuación se estructurará a partir del marco teórico, donde se llevará a cabo la investigación para analizar los antecedentes en estudios previos. Seguidamente se marcarán los objetivos e hipótesis del estudio, continuando con la metodología y datos que serán pieza fundamental para argumentar los resultados obtenidos y realizar las conclusiones oportunas sobre lo observado.

Finalmente, todo proyecto necesitará de unas recomendaciones a futuro para ayudar a solventar los problemas que se hayan observado. El último apartado mostrará la literatura encontrada y empleada (artículos, estudios, informes...).

## **2- Marco teórico**

En este apartado se hará referencia a la literatura recopilada para poder proceder al estudio. El marco teórico se estructurará en diferentes apartados, iniciando el análisis por la salud humana y polución en las ciudades, continuando con el sector aéreo y polución hasta la contribución del aeropuerto a las ciudades. Por último, se concluirá el apartado con las conclusiones del marco teórico para seguir con los objetivos e hipótesis del proyecto.

### **2.1- Salud humana y polución**

La salud humana siempre ha estado condicionada por las actividades industriales y/o de transporte que han ido generando un deterioro en la calidad del aire. La contaminación del aire se debe a la presencia de diferentes agentes físicos, químicos o biológicos que han ido modificando las características naturales de la atmósfera.

El informe de la OMS del pasado 2021 indicaba que la exposición a estos contaminantes en el aire supone 7 millones de muertes prematuras, además de agravamientos de salud tanto a niños como adultos (cardiopatías, infecciones respiratorias...). Los causantes de estas enfermedades provienen de los principales contaminantes como las partículas en suspensión (PM), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). ((EEA), 2022)

En el informe, se destacaban las partículas en suspensión de diámetro de 2,5 y 10 micras (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>) como principales contaminantes que afectan a la salud pública, capaces de penetrar en el cuerpo humano por las vías respiratorias y pudiendo las PM<sub>2,5</sub>, llegar al torrente sanguíneo afectando al sistema respiratorio y cardiovascular. A destacar, que el 99% de población mundial vive en lugares donde se vulneran las directrices de la OMS respecto a la calidad del aire. La OMS (2021) estimó que el 91% de los 4,2 millones de muertes prematuras debido a la contaminación del aire, se producen en países con ingresos medios y bajos.

Se calcula que la contaminación atmosférica es responsable en todo el mundo del 9% de las muertes por cáncer de pulmón, el 17% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, más del 30% por cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, y el 9% por enfermedades de transmisión. (Pacific, 2018)



En uno de los estudios sobre la contaminación del aire y las enfermedades que afectan a la población mundial (Xu-Qin Jiang, 2016), se analizan otros contaminantes muy nocivos para la salud como son el ozono (O<sub>3</sub>), óxidos de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>).

En el informe, se reporta que el O<sub>3</sub> incrementa el riesgo de apendicitis, mientras que el SO<sub>2</sub> localizado en centros urbanos, provocan hospitalizaciones de niños, además de afecciones al corazón como infartos o enfermedades cardiovasculares. En el caso de NO<sub>2</sub>, la exposición prolongada a estas partículas provoca asma, entre otras enfermedades respiratorias como cáncer de pulmón. (Xu-Qin Jiang, 2016)

La causa principal de estos contaminantes en el aire que respiramos se debe a las diferentes fuentes de contaminación antropogénica como son las plantas de producción de energía no renovable, industrias químicas y el transporte terrestre, marítimo y aéreo, siendo el último analizado en detenimiento, entre otras actividades. (Mora-Barrantes et al., 2021)

Ante estos problemas, la OMS marcó unas directrices sobre la calidad del aire, orientando a los países con límites de contaminantes atmosféricos y poder controlar la calidad del aire que se respiran en las ciudades:

**Tabla 1:** Directrices sobre la calidad del aire

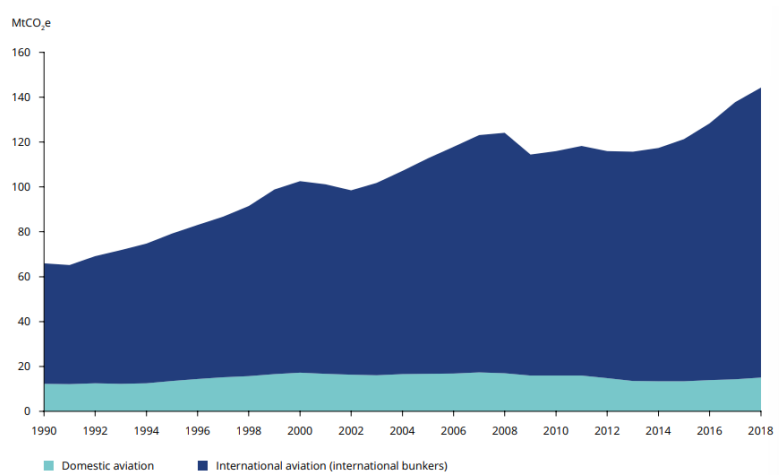
Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
		1	2	3	4	
MP <sub>2,5</sub> , µg/m <sup>3</sup>	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas <sup>a</sup>	75	50	37,5	25	15
MP <sub>10</sub> , µg/m <sup>3</sup>	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas <sup>a</sup>	150	100	75	50	45
O <sub>3</sub> , µg/m <sup>3</sup>	Temporada alta <sup>b</sup>	100	70	-	-	60
	8 horas <sup>a</sup>	160	120	-	-	100
NO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas <sup>a</sup>	120	50	-	-	25
SO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>	24 horas <sup>a</sup>	125	50	-	-	40
CO, mg/m <sup>3</sup>	24 horas <sup>a</sup>	7	-	-	-	4

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS)

## 2.2- Sector aéreo y polución

La aviación se ha convertido en la actividad económica global más importante del mundo debido a su rápido crecimiento en el transporte de pasajeros y de carga, aunque sigue siendo una de las formas de consumo más intensivas en energía, caracterizándose por un incremento de emisiones multiplicado por 6,8 entre los años 1960 y 2018. (Yao et al., 2021)

**Gráfica 1:** Toneladas de CO2 emitidas por el sector aéreo 1990-2018



Fuente: Agencia Ambiental Europea

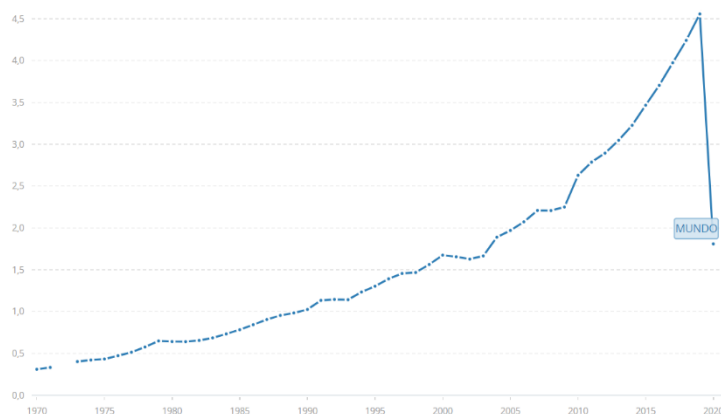
Los datos de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) de los servicios de transporte de pasajeros muestran un crecimiento constante entre el 1970 (310.441.392 pasajeros) hasta 2009 (2,25 mil millones). El punto de inflexión fue a partir de 2010 con 2,63 mil millones de pasajeros transportados, llegando a 2019 con un récord de 4,56 mil millones. En los siguientes apartados, se analizará el año 2020 que, debido a la COVID19, provocó una disminución nunca vista con 1,81 mil millones de pasajeros transportados.

Este punto de inflexión comentado anteriormente se debe a que, en 2001, la Comisión Europea adoptaba el Libro Blanco sobre política europea de transportes de cara al 2010. En él, se creó un programa que seguían unas líneas de actuación que ayudó a liberalizar aún más el sector y en el que incluían:

- El desarrollo de diferentes tipos de transportes, garantizando una competencia eficaz.
- Se crea un sistema integrado vinculando distintos transportes (programa Marco Polo).
- Protección de los usuarios, dando más hincapié al reconocimiento de sus derechos.

- Resolver los problemas principales del sector aéreo como la saturación del espacio, seguridad, infraestructuras y medioambiente (contaminación atmosférica y sonora). (Casnovas i Ibáñez, 2017)

**Gráfica 2:** Crecimiento del sector aéreo 1970-2020



Fuente: Datos obtenidos de la OACI a través del Banco Mundial

Los contaminantes que emiten los aviones, por medio de sus motores de turbina de gas alimentados por queroseno, principalmente son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitido en grandes cantidades durante el transporte tiene efectos directos causantes del cambio climático debido al efecto invernadero. Por otra parte, las emisiones de  $\text{NO}_x$  son responsables de la creación de ozono ( $\text{O}_3$ ) que son dañinas para la salud llegando a causar riesgo de infecciones respiratorias e irritación de garganta, además de lluvia ácida.

Finalmente, se encuentran los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), que se mezclan al reaccionar con diferentes partículas como hidrocarburos, vapor de agua y monóxido de carbono, generando estelas de vapor radioactivas. Los efectos directos en humanos pueden ser desde enfermedades cancerígenas hasta la muerte. (Masiol et al., 2014)

Cabe destacar que en el informe de Büchs y Schnepf (2013), se muestra que el 10% de los mayores emisores (compañías aéreas) del mundo representan el 45% del total de emisiones de  $\text{CO}_2$ , mientras que el 50% de los emisores más bajos produjeron el 13% en 2017. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) prevé que, en 2050, la emisión de carbono pueda llegar a ser del 25% del presupuesto mundial de carbono.

Aun así, el artículo de (Graver et al., 2018) responsabilizan tanto a la OACI como a la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) de la falta de datos sobre el consumo de combustible y las emisiones que se generan a nivel regional y nacional.

En el estudio, se analizaron 39 millones de vuelos en 2018, siendo 38 millones de pasajeros. Los resultados que se obtuvieron incluyendo el transporte de carga se situaban en 918 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>, aumentando un 32% en los últimos 5 años. A partir de estos datos, se pudo extraer conclusiones a causa de que las previsiones de la OACI no se ajustaban a la realidad debido a que el crecimiento de las emisiones era superior al 70% de su proyección actual. (Graver et al., 2018)

### **2.3- COVID19, transporte aéreo y emisiones en las ciudades**

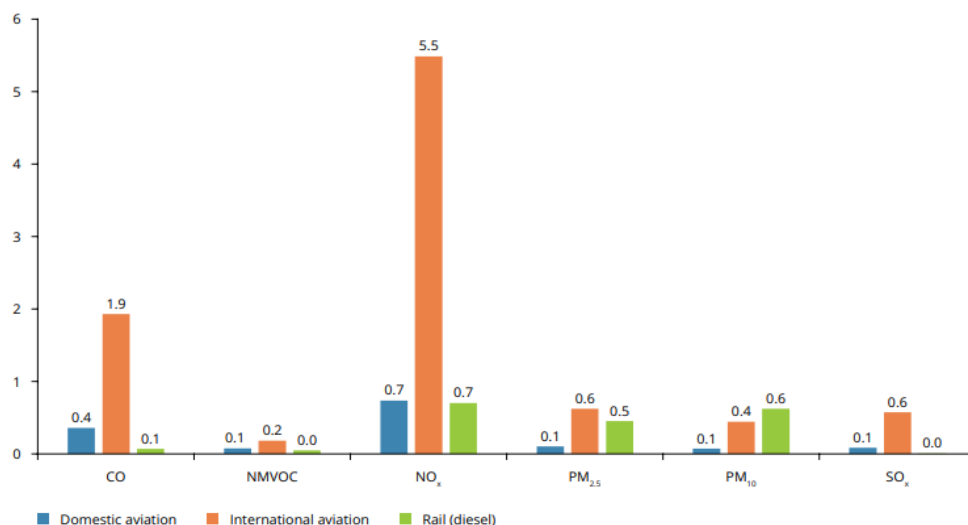
El transporte aéreo, después de 50 años con crecimiento positivo, sufrió su mayor caída en la historia, debido a la pandemia mundial COVID19. En diciembre de 2019, en la ciudad de Wuhan, se inició la propagación del Coronavirus y no fue hasta el 11 de marzo de 2020 cuando la Organización Mundial de la Salud declaró la COVID19 como pandemia. (Sun et al., 2021)

El sector aéreo fue uno de los más afectados debido a las restricciones de movilidad que se impusieron en todo el mundo, provocando una disminución de la demanda de pasajeros conllevando a muchas compañías a cesar en sus actividades, dejando en tierra a sus flotas o el cierre de aeropuertos que únicamente albergaban estacionamiento para aviones. Este hecho conllevó a una reducción de partículas contaminantes que nunca en la historia de la aviación había ocurrido. (Iacus et al., 2020)

En el estudio que realizó (Guevara et al., 2013) sobre los principales contaminantes de las ciudades de Madrid y Barcelona. En la ciudad de Madrid se cuantificó el tráfico como la principal fuente de emisiones con un 65% de NO<sub>x</sub>, 67% de CO<sub>2</sub>, 87% de partículas de PM<sub>10</sub> y un 85% de PM<sub>2.5</sub>. Seguidamente, se encontraba el sector aéreo por medio de los aeropuertos que generaban un 18% de NO<sub>x</sub>, 14% de CO<sub>2</sub>, 6,2% de partículas de PM<sub>10</sub> y un 7,5% de PM<sub>2.5</sub>.

En el siguiente gráfico, se observa el total de emisiones que genera un avión incluyendo el despegue, el trayecto y el aterrizaje siendo el NO<sub>x</sub> el principal contaminante, seguido de CO tanto en viajes domésticos como internacionales. Además, se encuentra al mismo nivel de emisión el SO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>, siendo el PM<sub>10</sub> en menor cantidad. ((EEA), 2022)

**Gráfica 3:** Principales contaminantes emitidos por un avión durante su actividad.



Fuente: Gráfica obtenida de la EEA

En Barcelona, el estudio muestra datos similares a Madrid, siendo el tráfico de la ciudad el principal emisor de contaminantes con un 59% de NO<sub>x</sub>, 85% de PM<sub>10</sub> y un 85% de PM<sub>2,5</sub> pero con la gran diferencia que el segundo sector emisor de contaminantes es el puerto debido a su cercanía con un 16% de NO<sub>x</sub>, 6,2% de PM<sub>10</sub>, 7,2% de PM<sub>2,5</sub> y a resaltar el 70% de emisiones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>). En cambio, no muestra ningún dato de la emisión generada del aeropuerto del Prat sobre la ciudad.

Según un estudio realizado por el Ayuntamiento de Barcelona en 2019, el aeropuerto de Barcelona fue responsable de emitir más de 22.000 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la ciudad. Además, el estudio reveló que los aviones que despegan y aterrizan en el aeropuerto son responsables del 66% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en la ciudad.

El estudio de (Baldasano, 2020a) obtuvo resultados de reducción de concentraciones de NO<sub>x</sub> en las ciudades de Madrid y Barcelona debido a la COVID19. A partir del análisis de datos de contaminación del año 2019 y 2020 de las diferentes estaciones de medición de estas dos ciudades, concluyó que hubo una reducción en el mes de marzo de 2020 de un 62% y 50% respectivamente (inicio de las restricciones de movilidad). Añade que el 97% de las operaciones aeroportuarias en España fueron canceladas lo que conlleva a una reducción de contaminación que no pudo cuantificarla.

En otro de los estudios analizando el impacto de la COVID19 y los cambios de la calidad del aire cerca del aeropuerto de Taiwán (Ngo et al., 2022a), a partir de los datos de tráfico aéreo durante las restricciones de movilidad, además de datos recopilados de

una estación de medición cercana y datos del viento se compararon concentraciones horarias de contaminantes atmosféricos (febrero 2019 - enero 2020 y febrero 2020 - enero 2021). Se obtuvo una reducción de emisiones del 7,3% NO<sub>x</sub> y 10% en PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y SO<sub>x</sub>, en los alrededores del aeropuerto.

En otro estudio realizado en la ciudad de Guayaquil, a partir del uso de modelos de dispersión de contaminantes, concluyeron que la calidad del aire estaba influenciada en gran parte por las operaciones que se realizaban en el aeropuerto de la ciudad con concentraciones altas de CO y NO<sub>x</sub> superando los límites establecidos por la legislación del país. En cambio, el resto de los contaminantes como el PM<sub>10</sub> y SO<sub>x</sub> estaban dentro de los valores permitidos. (García, 2021)

El artículo de Sarrat (2016) analiza a partir de herramientas de modelización, entre ellas, dispersión atmosférica (ADMS), el sistema de modelización de las emisiones y la dispersión (EDMS) o la simulación lagrangiana de transporte de aerosoles para aeropuertos (LASPORT), estudian el impacto que genera el sector aéreo a la calidad del aire a largo plazo, calculando las concentraciones de los contaminantes con ecuaciones analíticas.

A nivel regional, varios estudios concluyen que los aeropuertos contribuyen de manera secundaria a la emisión de contaminantes, por detrás del sector terrestre o las industrias. También analizan los modelos atmosféricos que permiten conocer la dispersión de los gases, la desintegración radiactiva y el movimiento de estas partículas. (Arunachalam et al., 2011; Rissman et al., 2013)

En otro estudio sobre las emisiones del Aeropuerto Internacional de Rosario y la dispersión hacia la ciudad, muestra que el NO<sub>x</sub> tiene una influencia de 1 a 2 km. Además, se pueden identificar los factores que influyen en la concentración de partículas nocivas en la ciudad de Rosario, entre ellas, la distancia del aeropuerto a la ciudad, el número de operaciones diarias en el aeropuerto o el clima del país. (Luccini et al., 2021)

En la ciudad de Barcelona, las emisiones de NO<sub>x</sub> que generaba el aeropuerto en 2008 eran del 0,1%, siendo la cuarta fuente por detrás del tráfico rodado con un 65,6%, seguido del sector industrial con un 4,8%, un 2,1% el puerto de Barcelona y el resto de las emisiones provenían de antecedentes locales. (*Air Pollution Nineteen* - C. A. Brebbia - Google Libros, n.d.)

En cambio, en el estudio que se realizó en el Aeropuerto de Londres a partir de la instalación de diferentes sensores de medición de partículas nocivas en el aeropuerto, se pudo observar que el 75% de NOx provenían de los alrededores del aeropuerto. Este hecho era debido a la dirección del viento que transportaba las partículas de NOx y CO de la ciudad de Londres situada a 13,7 km de distancia del aeropuerto. (Popoola et al., 2018)

También existen otras variables que influyen en la calidad del aire. El estudio de Cheng (2020) tenía como objetivo investigar cómo la precipitación afecta la calidad del aire en el Aeropuerto Internacional de Taoyuan, Taiwán, y cómo los patrones de viento y otras condiciones meteorológicas influyen en las emisiones de los aviones y la calidad del aire en la zona. El estudio se realizó durante un período de 3 años, de 2016 a 2018, en el cual se recopilaron y analizaron datos meteorológicos y de calidad del aire en el área del aeropuerto.

Los resultados del estudio abocaron que la precipitación juega un papel importante en la reducción de los niveles de contaminación atmosférica en el aeropuerto. La lluvia puede reducir significativamente los niveles de PM2.5 y SO2 en el aire, debido a que se eliminan de la atmósfera cuando entran en contacto con las gotas de lluvia. En cambio, los niveles de NOx y CO no se vieron afectados significativamente por la precipitación.

Además, se descubrió que los patrones de viento también tienen un impacto significativo en la calidad del aire en el aeropuerto, dependiendo de cómo sopla el viento, si es en la dirección del aeropuerto hacia las áreas urbanas cercanas, las emisiones de los aviones pueden causar una acumulación de contaminantes en esas zonas.

#### **2.4- Aeropuerto de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat**

El Aeropuerto de Barcelona es el principal aeropuerto de la región de Cataluña y uno de los principales aeropuertos de España. Se encuentra a unos 12 km al suroeste del centro de Barcelona, a 6 metros sobre el nivel del mar rodeado por los municipios de Viladecans, Prat de Llobregat y Sant Boi. Cabe destacar que es el segundo aeropuerto más grande de España en términos de pasajeros y el primero en tráfico de carga. El aeropuerto tiene dos terminales: la Terminal 1, que atiende a vuelos nacionales e internacionales, y la Terminal 2, que se divide en cuatro subterminales y atiende principalmente a vuelos de bajo costo y de compañías de bandera. (*Aeropuerto Barcelona-El Prat Josep Tarradellas | Aeropuerto de Barcelona, n.d.*)

El COVID-19 tuvo un impacto significativo en el tráfico de aviones en el Aeropuerto de Barcelona y en muchos otros aeropuertos alrededor del mundo. Como resultado de las restricciones de viaje y los cierres de fronteras impuestos para combatir la propagación del virus, el número de pasajeros que viajaban a través del Aeropuerto de Barcelona disminuyó drásticamente en 2020 y en el primer semestre de 2021.

En la siguiente tabla, se han recopilado datos desde 2016 a 2021 sobre el tráfico de pasajeros, operaciones y mercancía en el aeropuerto de Barcelona:

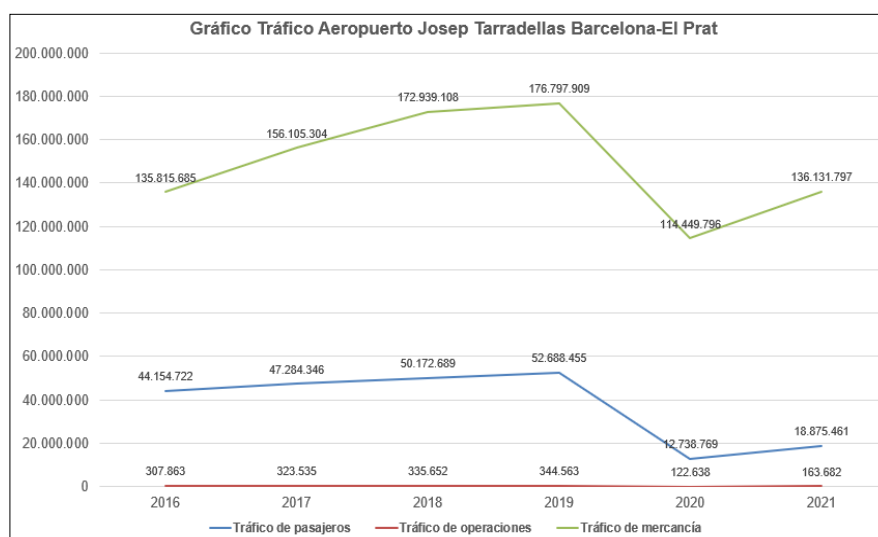
**Tabla 2:** Tráfico Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat (2016-2021)

	Tráfico de pasajeros	Tráfico de operaciones	Tráfico de mercancía
2016	44.154.722	307.863	135.815.685
2017	47.284.346	323.535	156.105.304
2018	50.172.689	335.652	172.939.108
2019	52.688.455	344.563	176.797.909
2020	12.738.769	122.638	114.449.796
2021	18.875.461	163.682	136.131.797

Fuente: Tabla de elaboración propia, datos de AENA

A continuación, se observa la gráfica de tráfico de los datos recopilados de la tabla anterior. Se puede observar la influencia negativa del COVID19 en el gráfico de los 3 tráficos debido a las restricciones de movilidad. (*Estadísticas de tráfico aereo, n.d.*)

**Gráfica 4:** Tráfico Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat



Fuente: Gráfica de elaboración propia con datos de AENA



Los datos indican que la caída tan pronunciada en el sector aéreo tuvo como consecuencia una fuerte crisis económica en muchas compañías áreas debido a los altos costes y sus reducidos beneficios:

- *Costes de cancelación de vuelos:* Muchas aerolíneas han tenido que cancelar vuelos debido a restricciones de viaje y a la disminución de la demanda. Esto ha resultado en costos significativos para reembolsar o reacomodar a los pasajeros afectados.
- *Costes de protección contra el COVID-19:* Las aerolíneas han tenido que invertir en medidas de protección contra el COVID-19, como máscaras y otros equipos de protección personal para el personal de vuelo y el personal de tierra, así como en medidas de limpieza y desinfección adicionales en los aviones y las terminales.
- *Costes de financiamiento:* Muchas aerolíneas han tenido que recurrir a financiamiento externo para ayudar a soportar los costos operativos durante la pandemia. Esto puede incluir préstamos gubernamentales o de otras fuentes de financiamiento.
- *Costes de reducción de personal:* Muchas aerolíneas han tenido que reducir su personal para ajustarse a la disminución de la demanda de viajes aéreos durante la pandemia. Esto puede incluir despidos o turlough (suspensión temporal del empleo sin cancelación del contrato de trabajo). (Merle Bolufer, 2020)

Es cierto que durante la pandemia del COVID-19, la actividad en los aeropuertos disminuyó significativamente debido a las restricciones de viaje y a la disminución de la demanda de vuelos. Esto ha llevado a una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes por parte de los aviones. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la actividad aérea es solo una pequeña parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel mundial. El transporte es responsable de cerca del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA).

Dentro del sector del transporte, el transporte por carretera es el que más contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, responsable de cerca del 75% de las emisiones del sector. El transporte aéreo es responsable de cerca del 12% de las emisiones del sector, mientras que el transporte ferroviario y el transporte marítimo tienen una participación del 5% cada uno. (Merle Bolufer, 2020)

## **2.5- Conclusiones marco teórico**

Cabe destacar que la contaminación que produce el transporte aéreo en las ciudades se sitúa en un segundo lugar en muchas ciudades, siendo el tráfico terrestre el emisor principal de partículas nocivas a la ciudad. (Graver et al., 2018)

La OMS muestra que el sector del transporte es el causante de 7 millones de muertes prematuras y enfermedades, entre ellas, respiratorias. Debido a la necesidad de revertir la situación, la Organización Mundial de la Salud ha actualizado las directrices reduciendo los niveles de referencia de la calidad del aire, entre otras medidas. (Pacific, 2018)

Las conclusiones obtenidas, a partir del análisis de las diferentes fuentes literarias, es la relación entre las emisiones de contaminantes de los aeropuertos hacia las ciudades colindantes y la reducción principalmente de NOx debido a la pandemia COVID19. Aun así, dependiendo de la localización del aeropuerto, clima o número de operaciones, influirán en la calidad del aire de las ciudades. (Mora-Barrantes et al., 2021)

En el apartado de Anexos, se muestran diferentes artículos que investigan sobre la influencia de las emisiones de los aeropuertos en las ciudades y los cambios de niveles de contaminación del sector aéreo en 2020, debido a la pandemia. Además, se analizan los contaminantes principales que desprenden las aeronaves y las consecuencias que generan hacia la población.

### **3- Objetivos e hipótesis**

Una vez analizado los diferentes artículos del apartado anterior, se puede observar que existe una relación entre las emisiones de partículas contaminantes generadas en los aeropuertos, la calidad del aire de las ciudades próximas a estas infraestructuras aeroportuarias y la influencia de la COVID19.

Este proyecto contribuirá a la literatura ya existente, a partir del análisis del impacto de la COVID19 en las emisiones de contaminantes de las aeronaves en el aeropuerto de Barcelona durante el periodo de 2016 a 2022 siendo así el objetivo principal del proyecto. La comparación de los datos recopilados de las estaciones de medición de las ciudades de Hospitalet, Prat de Llobregat y Barcelona durante periodos prepandemia, durante y postpandemia arrojarán resultados detallados de los cambios que hubo en la concentración de partículas contaminantes del aire.

Durante el proyecto se perseguirán los siguientes objetivos:

**Objetivo 1** → Diseñar un plan de muestreo riguroso de recopilación de datos precisos sobre las emisiones de contaminantes extraídas de las estaciones de medición de la calidad del aire de las ciudades colindantes (Prat de Llobregat, Hospitalet de Llobregat y Barcelona) durante el período de 2016 a 2022. En este plan de muestreo se deberán analizar los actores como la ubicación de las estaciones de medición, la frecuencia de las mediciones, cantidad de muestras a recopilar...

**Objetivo 2** → Crear una base de datos con la información obtenida de las estaciones de medición de contaminantes mensuales del Prat de Llobregat, Hospitalet de Llobregat y Barcelona en el periodo de 2016 a 2022, mediante la herramienta Excel.

**Objetivo 3** → Analizar que variables influyen en las emisiones de contaminantes generadas por el aeropuerto de Barcelona como pueden ser las precipitaciones, renta bruta familiar, población...

**Objetivo 4** → Realizar un análisis econométrico con la base de datos creada anteriormente, a partir del método de diferencias en diferencias, además de la regresión lineal, para determinar cualquier cambio significativo en la concentración de partículas contaminantes del aire antes, durante y después de la pandemia en el aeropuerto de Barcelona, mediante la herramienta STATA.

**Objetivo 5** → Analizar los resultados obtenidos y proponer medidas efectivas para mitigar el impacto negativo de las emisiones de contaminantes de las aeronaves en la calidad del aire y la salud pública de las ciudades colindantes del aeropuerto.

Estos objetivos marcados provienen de la pregunta inicial del proyecto:

¿Como ha afectado el impacto de la COVID19 en las emisiones de contaminantes de la actividad aérea del aeropuerto de Barcelona?

Finalmente, se han planteado una serie de hipótesis que irán siendo analizadas a medida que se conozcan los resultados de la investigación:

**Hipótesis 1:** Las emisiones de NOx y CO2 (Baldasano, 2020b) provenientes del Aeropuerto de Barcelona influyen de manera directa a la calidad del aire de las ciudades colindantes.

**Hipótesis 2:** La cancelación del 97% de las operaciones aeroportuarias en España durante la pandemia (Baldasano, 2020b) ha llevado a una disminución significativa de la contaminación del aire sin poder haber sido cuantificada.

**Hipótesis 3:** El clima, la ubicación del aeropuerto y las ciudades cercanas o el número de vuelos (Cheng, Y. H., 2020) que se realizan en el aeropuerto de Barcelona, son factores que influyen en el incremento o reducción de las emisiones de partículas contaminantes emitidas al aire.

## 4- Datos y metodología

A continuación, se mostrará tanto la metodología y datos utilizados para analizar la polución que genera el aeropuerto de Barcelona hacia las diferentes ciudades próximas. Este análisis se realizará a partir de los datos encontrados de los niveles de contaminación de las diferentes estaciones ubicadas en el Prat de Llobregat, Hospitalet de Llobregat y Barcelona.

### 4.1- Datos

Para poder realizar el estudio de las concentraciones de contaminantes en el aeropuerto de Barcelona, se han necesitado recopilar datos de las estaciones de medición de la calidad del aire de las ciudades colindantes al Aeropuerto de Barcelona-El Prat siendo el Prat de Llobregat, Hospitalet de Llobregat y Barcelona. Los datos de contaminación mensuales se han extraído a través del sitio web de la Generalitat de Catalunya (GENCAT), específicamente en la sección de "Medio Ambiente, Sostenibilidad y Calidad del Aire".

Una vez seleccionada las ciudades, se tuvieron que localizar las estaciones de medición. A continuación, la tabla 4 muestra los nombres y dirección de las estaciones de medición seleccionadas:

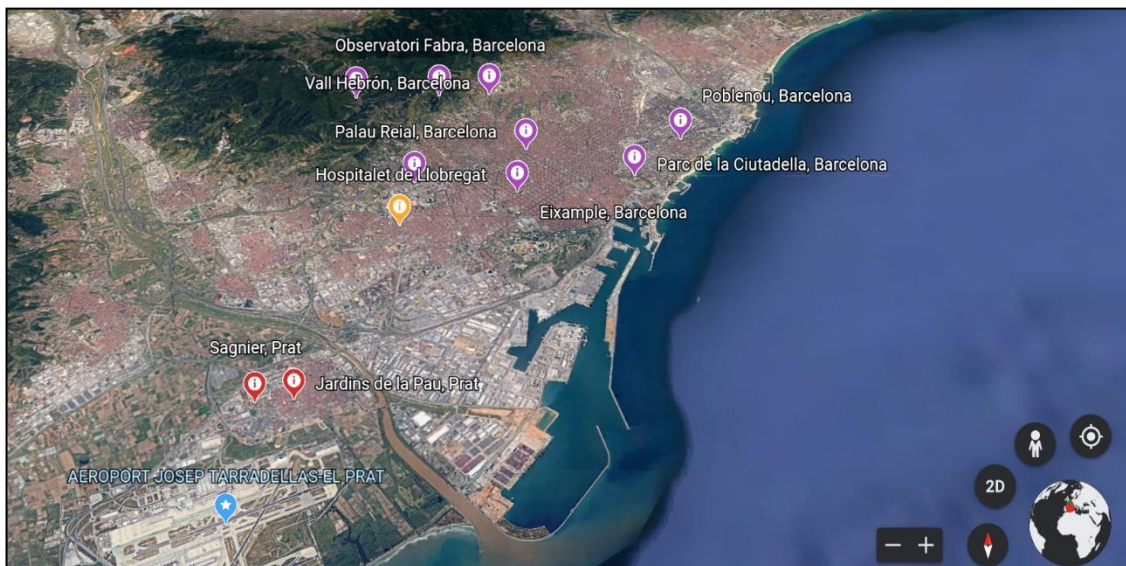
**Tabla 3:** Ubicaciones de las estaciones de medición

MUNICIPIO	DIRECCIÓN
Prat de Llobregat (Jardins de la Pau)	C. de Tarragona, 16
Prat de Llobregat (Sagnier)	C. de Frederica Montseny, s/n
L'Hospitalet de Llobregat	Av. Del Torrent Gornal / Pl. Ocellets
Barcelona (Palau Reial)	C. de Jordi Girona /
Barcelona (Sants)	Jardins de Can Mantega
Barcelona (Eixample)	Av. De Roma / C. d'Urgell
Barcelona (Gràcia-Sant Gervasi)	Pl. de Gal·la Placídia
Barcelona (Ciutadella)	Parc de la Ciutadella
Barcelona (Observatorio Fabra)	Observatorio Fabra
Barcelona (Vall Hebron)	Av. de Martí Codolar
Barcelona (Poblenou)	C. de Lope de Vega / C. de Pujades

Fuente: Elaboración propia con datos de la web <https://mediambient.gencat.cat>

En la imagen 1, se pueden observar las localizaciones de las estaciones en el mapa de los municipios de Hospitalet, Prat de Llobregat, Barcelona y el aeropuerto de Barcelona-el Prat:

**Imagen 1:** Estaciones de medición de la calidad del aire seleccionadas



Fuente: Google Earth

En la recopilación de datos para el presente estudio, se descargaron archivos con información sobre los niveles de contaminantes de cada zona seleccionada. Debido a que no todas las estaciones de medición analizan todos los contaminantes, se seleccionaron aquellas que se encontraban disponibles en la mayoría de las estaciones. Asimismo, se realizó una modificación de los datos originales, ya que la base de datos proporcionaba información por horas y se necesitaban valores mensuales para el análisis.

A primera estancia, los contaminantes seleccionados para estudiar eran el CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub>, los cuales son los principales emitidos en el despegue y aterrizaje en el aeropuerto de Barcelona-El Prat. A continuación, se generó una base de datos de contaminantes propia, a partir de todos los archivos descargados de las estaciones de medición de la calidad del aire (2016-2022).

Después de la creación de la base de datos, se observó que la medición de contaminantes no era uniforme y consistente en todas las estaciones de monitoreo, lo que provocó la falta de medición de algunos de ellos. Sin embargo, se pudo constatar que los únicos contaminantes medidos en todas las estaciones fueron el NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

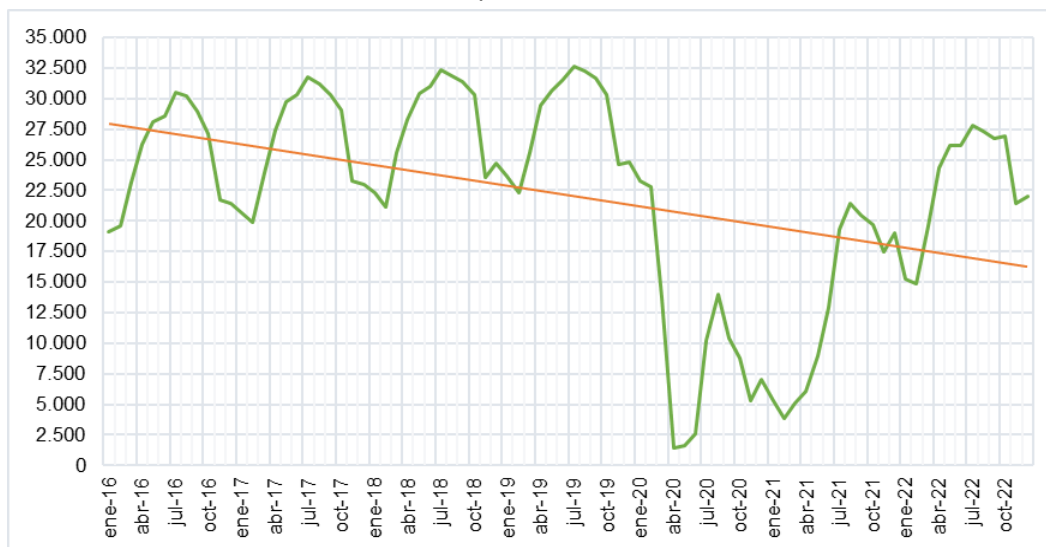
En la literatura previamente encontrada, se identificaba como principal contaminante de la actividad aérea el NO<sub>x</sub>, pudiendo reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar ozono troposférico y partículas finas afectando negativamente la salud humana y en el medio ambiente.

Es por ello por lo que el proyecto estudiará únicamente los óxidos de nitrógeno (**NO<sub>x</sub>**).

Para llevar a cabo un estudio exhaustivo de la contaminación del aire por partículas NO<sub>x</sub> en el aeropuerto de Barcelona, es necesario analizar una serie de variables que pueden afectar los niveles de contaminación. Entre estas variables, es esencial considerar el impacto del número de vuelos programados en el aeropuerto, la renta bruta disponible, la población, la precipitación y la distancia entre el aeropuerto y las ciudades colindantes (variable fija).

La cantidad de vuelos realizados será una variable a analizar ya que tiene un impacto significativo en la emisión de contaminantes al aire. En la siguiente gráfica, se muestra un gráfico de líneas de los vuelos realizados desde 2016 a 2022 en el aeropuerto de Barcelona-El Prat.

**Gráfica 5:** Vuelos realizados en el Aeropuerto de Barcelona 2016-2022



Fuente: Elaboración propia en base de datos de la web <https://aena.es>

Se observa la tendencia de crecimiento desde 2016 a 2019 alcanzando su punto máximo en julio de 2019 con más de 32.000 vuelos coincidiendo con la temporada de verano y el periodo de vacaciones. Es en marzo de 2020 que se produjo una disminución drástica debido a las restricciones de viaje por la pandemia COVID19 (cierre total).

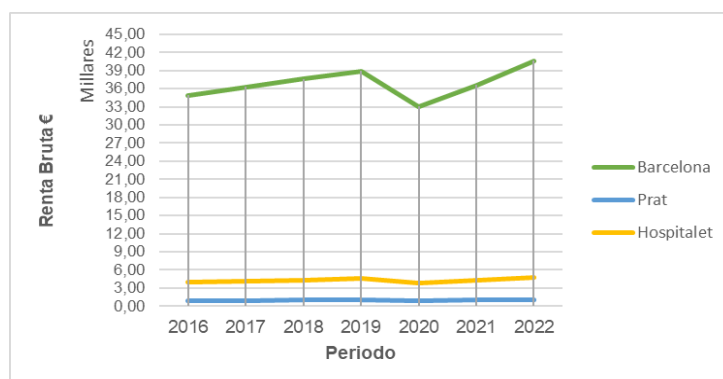
Durante ese mismo año 2020, se muestra un leve crecimiento de los vuelos durante los meses de verano a causa del levantamiento de las restricciones de viajar, sin embargo, el incremento en casos por contagio y la saturación en la sanidad en España, provocó otro segundo cierre parcial a final del año 2020 y principios de 2021, reduciendo la actividad aérea.

Finalmente, a mediados del año 2021, gracias a vacunación contra la COVID19 y el levantamiento de las restricciones a nivel nacional e internacional provocaron el crecimiento de la actividad aérea. Si bien el crecimiento en 2022 es progresivo pero lento, sigue sin alcanzar el mismo nivel de fuerza que en los años previos a la pandemia, ya que el sector ha sufrido una gran crisis económica, además de tener en cuenta que aún sigue habiendo factores que pueden influir en la recuperación completa del sector aéreo, como el surgimiento de nuevas variantes del virus, restricciones de viaje cambiantes o la incertidumbre económica. (Ngo et al., 2022b).

La siguiente variable analizada en la base de datos creada es la renta bruta familiar. La renta disponible familiar es la cantidad de ingresos que una familia tiene a su disposición después de pagar impuestos y otros cargos obligatorios (Instituto Nacional de Estadística (INE)). Esta puede estar relacionada con la cantidad de personas que viajan en avión y con la cantidad de vuelos programados en el aeropuerto. Una mayor renta bruta familiar puede significar que más personas tienen acceso a viajar en avión, lo que podría resultar en un aumento de la cantidad de vuelos y mayor contaminación.

Además, también puede estar relacionada con la calidad del aire. Las personas con mayores ingresos pueden tener más acceso a tecnologías de calefacción y refrigeración más limpias y eficientes, lo que podría disminuir la emisión de contaminantes al aire en sus hogares. En el siguiente gráfico, se muestran los datos de renta bruta familiar:

**Gráfica 6:** Renta Bruta Familiar



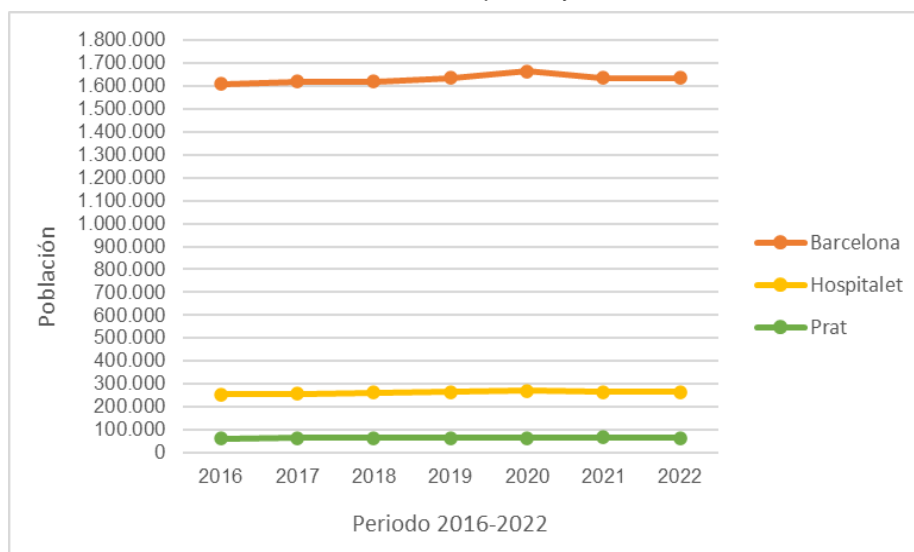
Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de la web de Diputación de Barcelona



Se observa que la renta en Hospitalet y Prat de Llobregat se ha mantenido mientras que Barcelona, una vez pasada la COVID19, la renta bruta familiar llegó a 40.000 € en 2022 incrementándose un 21% desde 2020.

La variable población en ciudades y áreas metropolitanas en crecimiento puede aumentar la demanda de vuelos debido a que hay más personas que necesitan viajar para fines comerciales, turísticos o personales. Esta consecuencia conlleva un incremento en las emisiones de contaminantes (Gillen, 2011). En el siguiente gráfico, se observan los tamaños de población de las ciudades de Barcelona, Hospitalet y Prat:

**Gráfica 7:** Población de Barcelona, Hospitalet y Prat

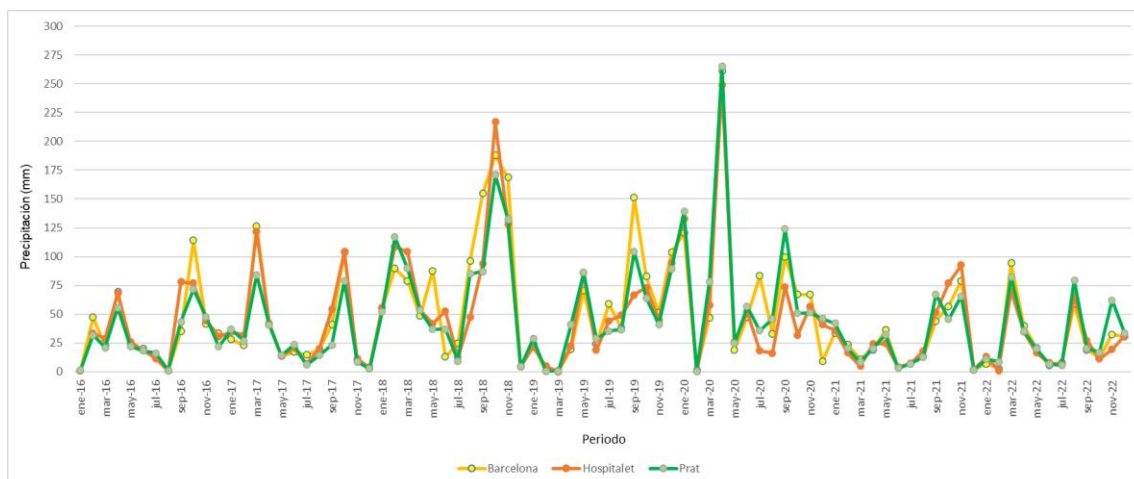


Fuente: Gráfico de elaboración propia con datos de la Diputación de Barcelona

La variable precipitación influye en la cantidad de emisiones de contaminantes que se emiten a la atmósfera. La lluvia puede ayudar a limpiar el aire al arrastrar partículas y gases contaminantes hacia el suelo, reduciendo así su concentración en la atmósfera, en cambio, en los días más secos pueden aumentar la concentración de contaminantes en el aire (Markandeya S. Jois, 2020).

Sin embargo, si la precipitación es demasiado débil, no será suficiente para eliminar los óxidos de nitrógeno y otros contaminantes del aire. Además, en ciertos casos, la precipitación puede reaccionar con los óxidos de nitrógeno para formar ácido nítrico, que puede aumentar la acidez del suelo y de las aguas superficiales, lo que puede tener impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente.(Cheng, Y. H., 2020). En la siguiente tabla, se muestra los datos extraídos de la precipitación mensual acumulada (mm) de los 3 municipios estudiados durante el periodo de 2016 a 2022:

**Gráfica 8:** Precipitación mensual acumulada (mm) de Barcelona, Hospitalet y Prat (2016-2022)



Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de la web <https://www.idescat.cat>

Finalmente, se midió la distancia entre el aeropuerto y cada una de las estaciones para su posterior análisis y determinar si la proximidad del aeropuerto es un factor importante para considerar al evaluar los efectos de las emisiones que genera hacia las ciudades colindantes. (Luccini et al., 2021)

En la siguiente tabla, se observan las distancias que hay entre el aeropuerto y las estaciones analizadas:

**Tabla 4:** Distancia de las estaciones respecto al aeropuerto

AEROPUERTO-ESTACIONES DE MEDICIÓN	DISTANCIA (km)
Aeropuerto del Prat- Prat de Llobregat (Sagnier)	2,45 km
Aeropuerto del Prat- Prat de Llobregat (Jardins)	2,49 km
Aeropuerto del Prat- Hospitalet de Llobregat	8,11 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Sants)	9,36 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Palau Reial)	9,75 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Eixample)	10,36 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Gràcia-Sant Gervasi)	12,09 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Ciudadella)	13,39 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Observatorio Fabra)	14,07 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Vall Hebron)	15,41 km
Aeropuerto del Prat- Barcelona (Poblenou)	15,56 km

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de la web <https://earth.google.com>

## **4.2- Metodología**

La metodología empleada para analizar el estudio de la contaminación del aire del aeropuerto hacia las ciudades anteriormente nombradas será el análisis econométrico con el método de diferencia en diferencia.

El método de diferencias en diferencias (DD) es una técnica estadística utilizada en análisis empíricos para evaluar el efecto causal de un tratamiento o intervención. El DD compara las tendencias en un grupo de tratamiento que recibe el tratamiento o intervención con las tendencias en un grupo de control que no lo recibe. La diferencia entre estas tendencias se utiliza para medir el efecto causal del tratamiento o intervención.

Este análisis es llamado "diferencias en diferencias" ya que se realiza una comparación de las diferencias antes y después del tratamiento, tanto para el grupo de tratamiento como para el grupo de control.

Este método servirá para comparar las concentraciones de NO<sub>x</sub> antes y después de la pandemia en el Aeropuerto de Barcelona. Para ello, la estación de medición del aire de la ciudad del Prat de Llobregat será el **grupo tratado**, es decir, el grupo que está expuesto a la intervención. En cambio, las estaciones de medición del aire de las ciudades de Barcelona y Hospitalet serán los **grupos de control**. Estos grupos de control no están expuestos a la intervención y, por lo tanto, se utilizan como una referencia para comparar los cambios en la calidad del aire en el grupo tratado.

Cabe destacar que se han elegido grupos de control similares al grupo tratado en términos de características relevantes, como son la ubicación, actividad industrial o la topografía. Al comparar las concentraciones de NO<sub>x</sub> antes y después de la pandemia en el Aeropuerto de Barcelona con las concentraciones de NO<sub>x</sub> en las estaciones de control, se podría encontrar el efecto causal de la pandemia sobre las concentraciones de NO<sub>x</sub> en el Aeropuerto de Barcelona.

Este análisis tendrá en cuenta los periodos prepandemia de 2016-2020, continuando con las restricciones durante pandemia con el primer estado de alarma que se inició el 15 de marzo hasta el 21 de junio de 2020 (98 días) y el segundo estado de alarma desde el 25 de octubre hasta 9 de mayo 2021 (196 días). Finalmente, el periodo postpandemia

desde mayo 2021 hasta la fecha de hoy. En este proyecto, los datos estudiados abarcarán hasta 2022 debido a que la información de 2023 no está disponible.

Para formular la ecuación del método diferencia en diferencia se necesitan otras variables dichas anteriormente que deberán ser analizadas y controladas que afectan a la calidad del aire como son las precipitaciones, la renta bruta disponible, el total de población de las ciudades, la distancia que hay entre el área emisora de contaminantes (aeropuerto) y las estaciones de medición de la calidad del aire y finalmente, los vuelos realizados en el aeropuerto de Barcelona durante el periodo estipulado.

El método de diferencias en diferencias se podrá llevar a cabo a partir de la siguiente ecuación planteada que analiza las variaciones de concentraciones de NO<sub>x</sub> a partir del estudio de las ciudades seleccionadas (i) con estaciones de medición (s) en el periodo de tiempo (t):

$$\circ \quad C_{ist} = \alpha + \beta_1 \cdot Rfd_{it} + \beta_2 \cdot Pob_{it} + \beta_3 \cdot Prec_{it} + \beta_4 \cdot Aep_{it} + \lambda_s + \varepsilon_{it}$$

Donde:

**C<sub>ist</sub>** → partícula NO<sub>x</sub> (c) que se estudia en la ciudad seleccionada (i) donde se ubica la estación de medición de la calidad del aire (s) y en el período de tiempo, mensual (t).

**Rfd<sub>it</sub>** → ingreso bruto mensual de las familias de cada ciudad (i) en el periodo de tiempo mensual (t).

**Pob<sub>it</sub>** → población de la ciudad estudiada (i) en el periodo anual (t).

**Prec<sub>it</sub>** → cantidad de precipitación acumulada en la ciudad (i) en el período de tiempo calculado mensualmente (t) y medido en mm.

**Aep<sub>it</sub>** → indicador binario que toma el valor de 1 para la estación (i) ubicada en el Prat de Llobregat durante los meses de pandemia (t), y 0 en otros casos. Su función es identificar cómo la disminución de vuelos en el Prat de Llobregat durante ese período afectó los niveles de NO<sub>x</sub> en el municipio.

**λ<sub>s</sub>** → La variable en cuestión es de efectos fijos y sirve para controlar todas las diferencias entre las estaciones meteorológicas que no cambian con el tiempo. En este caso, la principal variable que se incluye es la distancia entre las estaciones y el aeropuerto.

Además, es importante destacar que, aunque durante el período de estudio existen otras restricciones de movilidad que también pueden afectar la calidad del aire, estas afectan a todas las estaciones meteorológicas, tanto las que son estaciones de control como las tratadas. Es por eso por lo que la variable dummy o variable binaria ayuda a identificar el efecto de las emisiones de NO<sub>x</sub> en las estaciones tratadas del Prat de Llobregat, generadas por los vuelos del aeropuerto de Barcelona.

Cabe mencionar que cada coeficiente representa el efecto causal de cada variable independiente en la variable dependiente (partículas contaminantes) después de controlarlas por otras variables.

Por ejemplo, si el coeficiente  $\beta_4$  de la variable indicadora del aeropuerto es significativo y positivo, esto indicaría que la cantidad de vuelos realizados en el aeropuerto de Barcelona-El Prat tiene un impacto positivo en la concentración de NO<sub>x</sub> en la estación de medición del Prat de Llobregat (aeropuerto).

## 5- Resultados

### 5.1- Estadísticas descriptivas

STATA es un software estadístico utilizado para el análisis de datos en una amplia variedad de disciplinas. Una de las técnicas estadísticas que se pueden utilizar en STATA es el método de diferencias en diferencias, que se utiliza para estimar el efecto causal de una intervención o tratamiento. Como se ha comentado en el anterior apartado, este método se basa en la comparación de las diferencias en los resultados de interés entre un grupo de tratamiento y un grupo de control antes y después de la intervención o tratamiento.

Para aplicar el método de diferencias en diferencias (DD) en STATA, es necesario establecer la estructura de datos de panel utilizando el comando "**xtset**". Se debe incluir el conjunto de datos sobre las concentraciones de NOx en las estaciones del aeropuerto de Barcelona, tanto en las estaciones del Prat de Llobregat (tratamiento) como en las de Barcelona y L'Hospitalet (control), desde el año 2016 hasta el 2022.

En la siguiente tabla, se extrae la media, la desviación estándar y los valores máximos y mínimos de las concentraciones de NOx:

**Tabla 5:** Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, mínimos y máximos).

<b>Variable</b>	<b>Obs</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. est</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>NOx</b>	897	49,10	26,62	5,66	193,38
<b>Vuelos</b>	924	22.105,76	8.454,33	1.449	32671
<b>Población</b>	924	1.222.49	670.955,8	634.457	1.664.182
<b>Renta Bruta</b>	924	27.374,53	15.647,4	892,77	40.640,38
<b>Precipitación</b>	924	47,001	46,77	0	265,2
<b>Distancia</b>	924	10,28	4,36	2,45	15,56

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de STATA.

Los resultados que se observan en la tabla anterior son los siguientes:

La variable **NOx** mide la concentración de óxidos de nitrógeno en el aire, y se observa que tiene un valor medio de 49,10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una desviación estándar de 26,62. En el caso de la concentración de NOx, la Unión Europea establece un valor límite anual de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos negativos de la exposición a niveles elevados de NOx durante un período prolongado de tiempo.

Se puede observar que el valor encontrado supera el marcado por la Unión Europea. (AEMA, 2020). El valor mínimo observado para NOx es de 5,66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación de medición del Observatorio Fabra, en abril de 2020, coincidiendo con las restricciones de movilidad debido a la COVID19. En cambio, el valor más alto es de 193,38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  registrado en la estación de medición de la Eixample de Barcelona, en el período postpandemia de enero de 2022.

La variable **Vuelos** indica el número de vuelos registrados en el aeropuerto de Barcelona. Se observa que tiene un valor medio de 22.105,76. El valor mínimo de vuelos realizados fue de 1.449 en el periodo de abril de 2020, coincidiendo con las restricciones nacionales e internacionales de movilidad, en abril de 2020. El valor máximo de vuelos ocurrió en julio de 2019, durante el periodo vacacional.

La variable **Población** indica la cantidad de habitantes de las áreas geográficas estudiadas. El valor mínimo de población es de 63.457 habitantes en el Prat de Llobregat (2016), mientras que el máximo de población es de 1.664.182 habitantes en Barcelona (2022).

La variable **Renta Bruta** indica la renta bruta disponible promedio en las áreas geográficas determinadas observando un valor medio de 27.374,53€. El valor mínimo observado de renta bruta es de 892,77€ en el Prat de Llobregat en 2016, mientras que el máximo se ubica en Sant Gervasi (Barcelona) con 40.640,38€ en 2022.

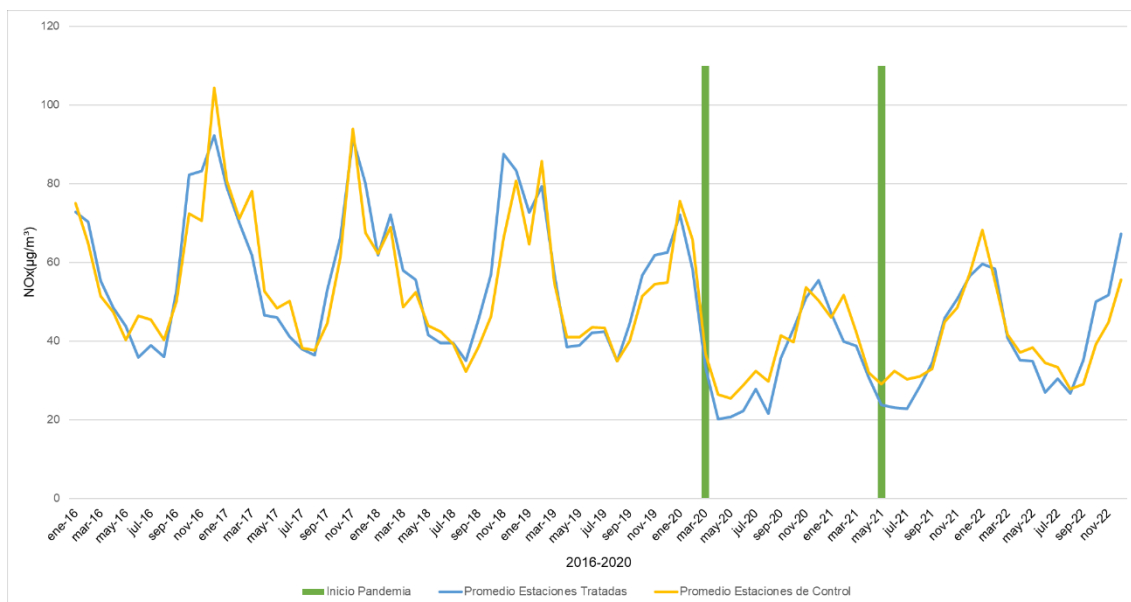
La variable **Precipitación** indica la cantidad de precipitación (mm) caída en las diferentes áreas estudiadas. El valor mínimo de precipitaciones es de 0 mm en marzo de 2019 (prepandemia) en Hospitalet de Llobregat, mientras que el máximo registro fue de 265,2 mm en el Prat de Llobregat, en abril de 2020.

La variable **Distancia** indica la distancia entre las estaciones de medición estudiadas y el aeropuerto de Barcelona siendo la estación del Prat de Llobregat la distancia más

cercana al aeropuerto con 2,45 km mientras que la estación más alejada se encuentra a 15,56 km en Poblenou (Barcelona).

En la siguiente gráfica, se observa el promedio por mes de concentraciones de NOx de las 2 estaciones tratadas (Prat de Llobregat) y las 9 estaciones controladas (Hospitalet y Barcelona) durante el periodo de 2016 a 2022:

**Gráfica 9:** Comparativa de niveles de NOx de las estaciones tratadas y controladas.



Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de STATA.

La evolución de las concentraciones de NOx de las estaciones tratadas y controladas durante 2016 a 2022, muestran un patrón similar en el periodo prepandemia hasta febrero de 2020. En este periodo de 2016 a 2020, las estaciones de control recopilan niveles máximos de óxidos de nitrógeno en el mes de diciembre ( $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) debido a la gran movilidad de la población por vía terrestre y aérea por ser época navideña, mientras que en los periodos con menores concentraciones de NOx ( $32,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se encuentran en los meses de junio, julio y agosto debido a factores como pueden ser la calefacción en las viviendas, reducción de tráfico por las ciudades o patrones climáticos que afectan la dispersión de los contaminantes (viento).

Las estaciones tratadas del Prat de Llobregat tienden a tener promedios anuales de concentración más elevados que los de las estaciones de control durante el periodo de prepandemia, respaldando al análisis que se realizará en los siguientes apartados sobre el impacto del aeropuerto en las concentraciones de NOx.



El inicio de la pandemia en marzo de 2020 supuso una reducción drástica en las concentraciones de NOx en todas las estaciones estudiadas. Aun así, cabe destacar un mayor decrecimiento de óxidos de nitrógeno en las estaciones tratadas (abril 2020, 24,42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) debido a la influencia del Aeropuerto de Barcelona y su disminución de su actividad del 72%, conllevando a una reducción drástica de estas partículas.

Si bien las concentraciones de NOx han mostrado una tendencia al alza después de la pandemia (a partir de mayo de 2021), el ritmo de crecimiento ha sido más lento que el periodo prepandemia debido a que la recuperación del sector del transporte aéreo no está siendo tan rápido. Aún así, se observa que el crecimiento de las emisiones de NOx a finales de 2022 en la estación del Prat de Llobregat es muy pronunciado, provocado por el incremento en los vuelos respecto meses anteriores.

## 5.2- Autocorrelación

El Wooldridge test o también conocido como prueba de primer orden de correlación serial se utiliza para verificar si existe correlación serial en los residuos de un modelo de regresión (diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo).

Es una herramienta útil para evaluar la calidad del modelo de panel y es importante para determinar si el modelo puede hacer predicciones precisas y fiables sobre las emisiones de NOx en el aeropuerto de Barcelona. Para ello, esta prueba evaluará las variables estudiadas como son las precipitaciones, la renta bruta disponible, el total de población de las ciudades, las estaciones de medición de la calidad del aire y los vuelos realizados en el aeropuerto durante el periodo estipulado para comprobar si existe correlación serial.

Se han generado logaritmos naturales con la variable dependiente “lnox” y las variables independientes “lvuelos”, “lprecipitación”, “lrenta”, “lpoblación” y “ldistancia” para mejorar la precisión, reducir el sesgo, hacer la interpretación más fácil y mejorar la estabilidad de la regresión.(STATA, 2023b)

En STATA, el Wooldridge test se realiza mediante el comando *xtserial* para datos de panel. El resultado del test se presenta en forma de estadísticas F y el valor p asociado. En este caso, la estadística **F** es **43,073** y el valor **p** asociado es **0,0001**.

El valor de F indica la relación entre la varianza de los residuos que se espera bajo la hipótesis nula (no hay autocorrelación) y la varianza de los residuos que se observa en la muestra. Cuanto mayor sea la estadística F, más evidencia hay en contra de la hipótesis nula.

El valor p asociado indica la probabilidad de obtener los resultados observados o más extremos si la hipótesis nula fuera verdadera. Un valor de p bajo (generalmente menor que 0,05) indica que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, mientras que un valor de p alto (generalmente mayor que 0,05) indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula. (STATA, 2023b)

En este caso, el valor de F es alto y el valor p asociado es muy bajo (0,0001), lo que indica que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de no autocorrelación de primer orden en los residuos del modelo. Por lo tanto, se puede concluir que hay autocorrelación de primer orden en los residuos del modelo.

### 5.3- Heteroscedasticidad

La heteroscedasticidad se refiere a la presencia de variabilidad no constante en los errores del modelo. Es decir, la varianza de los errores no es igual en todas las observaciones y puede estar relacionada con alguna variable del modelo. En este proyecto, al querer realizar el análisis de regresión para analizar las concentraciones de NOx en el Aeropuerto de Barcelona, es importante considerar si existe heteroscedasticidad en los errores del modelo.

Para analizar la presencia de heteroscedasticidad, se pueden utilizar diferentes técnicas. Se ha elegido la prueba de **Breusch-Pagan and Cook Weisberg test**, que evalúa si la varianza de los errores está relacionada con la variable dependiente del modelo (NOx).

Para esta prueba, el primer paso es realizar la regresión y así poder ajustar la ecuación matemática al conjunto de datos para modelar la relación entre la variable dependiente (NOx) y las variables independientes (población, precipitación, renta, vuelos). (STATA, 2023a)

Una vez analizada la regresión, el segundo y último paso ha sido utilizar el comando *estat hettest* para la prueba de heteroscedasticidad en el modelo de regresión. La

hipótesis nula de esta prueba es que los errores tienen una varianza constante (homocedasticidad).

El resultado obtenido indica la variable utilizada en la prueba es "Fitted values of lnox", lo que significa que STATA evalúa si la varianza de los residuos se relaciona con los valores ajustados de la variable dependiente (lnox). El resultado muestra un valor de estadístico **chi2** de **25,78** con un valor **p** muy bajo ( $p < 0.0001$ ), lo que sugiere ir en contra de la hipótesis nula de homocedasticidad.

Se rechaza la hipótesis nula, mostrando que hay presencia significativa de heterocedasticidad en el modelo de regresión que conlleva varianza de los errores (diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo) siendo errores más grandes o pequeños dependiendo del valor de lnox en el que se encuentran.

#### **5.4- Multicolinealidad**

Conocer si existe una relación lineal fuerte entre dos o más variables independientes en un modelo de regresión es llamado multicolinealidad. La presencia de multicolinealidad puede hacer que los coeficientes de regresión sean imprecisos, lo que dificulta la interpretación de los efectos individuales de cada variable independiente en la variable dependiente.

Por medio del comando *correlate*, se ha calculado la multicolinealidad. La matriz de correlación que se presenta a continuación con los resultados obtenidos es una herramienta estadística que muestra la relación lineal entre dos o más variables. En esta matriz, cada variable se correlaciona con todas las demás variables.

En la matriz, los valores de correlación se encuentran en la diagonal principal, donde cada variable se correlaciona consigo misma (valor de correlación 1). (STATA, 2023a) Los valores de correlación van desde -1 a 1, donde -1 indica una correlación negativa perfecta (cuando una variable aumenta, la otra disminuye), 0 indica no correlación (las variables no están relacionadas) y 1 indica una correlación positiva perfecta (cuando una variable aumenta, la otra también aumenta):

**Tabla 6:** Correlación entre variables

NOx	Población	Precipitación	Renta	Vuelos	Distancia
Población	1,00	0,03	0,99	-0,01	0,85
Precipitación	0,03	1,00	0,01	-0,02	0,02
Renta	0,99	0,01	1,00	0,05	0,84
Vuelos	-0,01	-0,02	0,05	1,00	-0,01
Distancia	0,85	0,02	0,84	-0,01	1,00

Fuente: Tabla de elaboración propia con datos extraídos de STATA

En la tabla se muestra una alta relación positiva entre la variable **población** y **renta** al obtener un 0,99. La **distancia** y **población** tienen una correlación positiva con un valor de correlación de 0,8526. Sin embargo, la variable distancia mide en km desde el aeropuerto hacia las estaciones de Hospitalet y Barcelona, mientras que la variable población, mide la concentración de habitantes en cada ciudad. Aunque la distancia puede estar correlacionada con la población (ya que es posible que haya más población en áreas urbanas que están más cerca del aeropuerto), esto no necesariamente significa que haya multicolinealidad.

Después de calcular las correlaciones entre variables, se procedió a calcular el VIF (Factor de Inflación de la Varianza) para cada variable independiente, con el fin de evaluar el grado de correlación entre ellas y posible existencia de multicolinealidad. Básicamente, mide cuánto se incrementa la varianza de los coeficientes de regresión debido a la relación en el conjunto de variables independientes.

Un VIF de 1 indica que no hay multicolinealidad. Aquellos valores que superen 1, indican la presencia de multicolinealidad. En general, se considera que un VIF mayor a 5 o 10 indica una multicolinealidad significativa. A continuación, se presentan los resultados:

**Tabla 7:** VIF

Inox	Irenta	Iprecipitación	Ipoblación	Ivuelos
VIF	16,39	1,01	16,39	1,05

Fuente: Tabla de elaboración propia con datos extraídos de STATA

El resultado generado por STATA se observa que las variables **población** y **renta** tienen un VIF alto (16,39), lo que indica que hay una alta relación entre ellas. Esto significa que la inclusión de ambas variables en el modelo puede causar problemas en la interpretación de los coeficientes de regresión y predicciones precisas.

Por otro lado, las variables **vuelos** y **precipitación** tienen un VIF relativamente bajo (1,05 y 1,01), habiendo una baja relación entre ellas. En este caso, es poco probable que la inclusión de ambas variables en el modelo cause problemas significativos. Es importante tener en cuenta que la multicolinealidad no siempre es un problema grave, siendo aceptada si son relevantes para el objetivo del modelo (población y renta).

## **5.5- Regresiones lineales**

### **5.5.1- Método Diferencias en Diferencias (DiD)**

Para testear la 1ª hipótesis donde se preguntaba si las partículas de NOx generadas en el aeropuerto tenían impacto al Prat de Llobregat, se ha escogido el método de diferencias en diferencias que consiste en comparar la evolución de las concentraciones de NOx en el aeropuerto de Barcelona a partir de un grupo de tratamiento (estaciones del Prat de Llobregat) y un grupo de control (Hospitalet y Barcelona) antes y después de la implementación del tratamiento. El efecto causal del tratamiento se estima como la diferencia entre los dos grupos.

Para poder realizar el método, la variable dependiente escogida será el logaritmo natural de las concentraciones de NOx ( $\ln_{ox}$ ) y las variables independientes serán las 2 estaciones tratadas del Prat de Llobregat ( $treated$ ), la precipitación ( $lprec$ ), la población ( $lpop$ ) y la renta bruta disponible ( $lrenta$ ). La variable tratada actúa como una variable dummy que toma el valor 1 si corresponde a las estaciones del Prat de Llobregat durante la pandemia (marzo 2020 a mayo 2021), y 0 en caso contrario.

El modelo busca determinar si las estaciones del Prat de Llobregat (tratada) experimenta un cambio significativo en la concentración de NOx en comparación con las estaciones de Barcelona y Hospitalet (0 controles), considerando también el efecto de la precipitación, la población y la renta bruta disponible.

En primer lugar, se ha utilizado el comando "regress" para realizar una regresión lineal donde la variable dependiente es " $\ln_{ox}$ " (concentraciones de NOx) mientras que las variables independientes son " $treated$ " (estaciones tratadas), " $lprec$ ", " $lpop$ " y " $lrenta$ ".

Este análisis permitirá entender la relación entre las variables independientes y las concentraciones de NOx de las estaciones tratadas.

Posteriormente, se ha aplicado el comando "xtregar" con efectos fijos (fe) para realizar el análisis de Diferencias en Diferencias. Este método compara las diferencias antes y después de la intervención tanto para el grupo tratado como para el grupo de control, y estima el efecto causal de la intervención al tener en cuenta las diferencias previas entre ambos grupos.

A continuación, se muestra la tabla de resultados obtenidos en el STATA de las dos regresiones.

**Tabla 8:** Resultados estimados (DID)

VARIABLES	NOx		NOx (efectos fijos)	
	Agrupados	Efectos fijos	Sin Irenta	Sin Ipop
Treated	<b>-0,437***</b> (0,099)	<b>-0,251***</b> (0,087)	<b>-0,301***</b> (0,095)	<b>-0,299***</b> (0,097)
Iprec	<b>-0,028*</b> (0,015)	<b>-0,022***</b> (0,006)	<b>-0,022***</b> (0,006)	<b>-0,022***</b> (0,006)
Ipop	-0,007 (0,306)	<b>0,504**</b> (0,243)	<b>0,101*</b> (0,152)	
Irenta	-0,043 (0,272)	<b>-0,628**</b> (0,293)		<b>-0,214*</b> (0,195)
Constant	<b>4,371***</b> (1,528)	<b>3,049***</b> (0,498)	<b>2,452***</b> (0,495)	<b>5,891***</b> (0,413)
R-cuadrado	0,0329	0,0355	0,0356	0,0341
Observaciones	896	896	896	896

Fuente: Tabla de elaboración propia con datos extraídos de STATA

**Los (\*) representan el nivel significativo del estudio: 1% (\*\*\*) , 5% (\*\*) y 10% (\*).**

La primera columna llamada "Agrupados" es una regresión lineal que muestra los coeficientes estimados y errores estándar correspondientes con enfoque de estimación agrupada. En este enfoque, todas las observaciones se agrupan y se realiza una regresión lineal simple que considera las variables explicativas y la variable dependiente para todas las unidades de observación. Los coeficientes estimados indican el efecto promedio del tratamiento (Treated), además de las variables independientes (Iprec, Ipop, Irenta) en la variable dependiente (NOx).

La segunda columna es una regresión lineal con "Efectos fijos" que muestra los coeficientes estimados y los errores estándar correspondientes obtenidos utilizando un

enfoque de estimación con efectos fijos. En este enfoque, se incluyen efectos fijos individuales para cada observación, lo que permite controlar las características individuales específicas de cada unidad. Los coeficientes estimados indican el efecto del tratamiento (Treated), además de las variables independientes (lprec, lpop, lrenta) en la variable dependiente (NOx) teniendo en cuenta los efectos fijos individuales.

Se observa que el coeficiente de la variable "Treated" del modelo "Agrupados" es -0,437 (43,7%) con un nivel de significancia de \*\*\* ( $p < 0,01$ ) y en de "Efectos fijos", la variable "Treated" es -0,251 (25,1%), con un nivel de significancia de \*\*\* ( $p < 0,01$ ). En ambos modelos, el coeficiente estimado indica el efecto promedio del tratamiento sobre la variable dependiente ("NOx") en comparación con el grupo de control. Se observa que tanto en el modelo "Agrupados" (43,7%) como en el modelo "Efectos fijos" (25,1%), el coeficiente estimado es negativo, mostrando que en las estaciones tratadas (Prat de Llobregat) tiene un efecto de reducción en las concentraciones de NOx más pronunciado que en Barcelona y Hospitalet en el periodo de período de pandemia entre marzo de 2020 a mayo de 2021, cuando no había casi vuelos en el aeropuerto.

La reducción de concentraciones de NOx del Prat de Llobregat que es donde se ubica el aeropuerto de Barcelona se reducen en un 25,1% en comparación de las estaciones de control de Hospitalet y Barcelona durante época COVID19. Este resultado muestra que, debido a la reducción de la actividad del aeropuerto, el Prat tiene una menor concentración de partículas NOx que provienen del aeropuerto en comparación a las estaciones de control con una menor influencia de tal actividad.

En los coeficientes de las variables independientes, se observa que en el modelo "Agrupados", la variable "lprec" tiene un coeficiente estimado de -0,028 (-2,8%) con un nivel de significancia de \* ( $p < 0,05$ ). Este resultado muestra que un aumento del 1% de la precipitación se asocia con una disminución del 2,8% en las concentraciones de NOx. En el modelo "Efectos fijos", la variable precipitación se muestra negativo -0,022 (-2,2%), pero con un mayor nivel de significancia \*\*\* ( $p < 0,01$ ). Se remarca una relación más robusta ya que las concentraciones de NOx se reducirían en un 2,2%.

En cuanto a las variables "lpop" y "lrenta", en el modelo "Agrupados", la variable "lpop" no es estadísticamente significativa ( $p > 0,05$ ), lo que indica que no hay evidencia suficiente para afirmar una relación significativa entre la población y las concentraciones de NOx, tal y como también sucede en la variable "lrenta".

En cambio, el modelo "Efectos fijos", la variable "lpop" muestra un coeficiente estimado positivo de 0,504 (50,4%), con un nivel de significancia de \*\* ( $p < 0,05$ ). Este resultado muestra que un incremento del 1% de la población, provoca un aumento del 50,4% de concentraciones de NOx.

Por otro lado, la variable "lrenta" tiene un coeficiente negativo de -0,628 (-62,8%) y significativo con \*\* ( $p < 0,05$ ), lo que indica que un mayor nivel de renta está asociado a una disminución del 62,8% de las concentraciones de NOx. Las zonas más próximas al aeropuerto (Hospitalet y Prat) tienen una renta inferior en comparación a Barcelona.

En el modelo "Agrupados", el coeficiente estimado para la constante es 4,371, con un nivel de significancia de \*\*\* ( $p < 0,01$ ) y en el de "Efectos fijos" es 3,049, también significativo con \*\*\* ( $p < 0,01$ ). La constante en ambos modelos representa el valor de "NOx" que se espera cuando no hay efecto de la variable "Treated" ni de las variables de control ("lprec", "lpop" y "lrenta").

Finalmente, se observan dos columnas "sin renta" y "sin población". Tal y como se estudió anteriormente, el resultado del VIF era de 16,39 (muy alto). Esto indica que hay una fuerte relación entre estas variables, lo cual no es sorprendente ya que la renta y la población suelen estar correlacionadas en muchos contextos. Debido a la alta correlación entre ellas, se generan problemas de multicolinealidad, lo que dificulta la interpretación de los coeficientes y puede afectar la precisión de las predicciones.

La variable "treated" en el modelo de efectos fijos sin la variable "renta" es de -30,1%, con una significancia del 1% aumentando en 5 puntos respecto al modelo de efectos fijo completo (-25,1%). Esto quiere decir que hay una disminución de las concentraciones del 30,1% en época COVID19 respecto a las estaciones controladas debido a la reducción de vuelos. La variable "lprecipitación" se mantiene en un 2,2% respecto al modelo completo. En cambio, la variable "población" aun siendo significativa respecto al modelo fijo completo, se ha visto reducida de 50,4% al 10,1% pasando de (\*\*) a (\*). Esto significa que, incluso cuando la variable "renta" se excluye del modelo, la variable "población" aún tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable dependiente (NOx), es decir, tiene un impacto directo en la variable NOx, independientemente de la influencia de la variable "renta".

En el modelo de efectos fijos sin la variable "población", la variable "treated" tiene un coeficiente de -0,299 (-29,9%) con una significancia del 1% aumentando en 4 puntos respecto al modelo de efectos fijos completos (-25,1%). Esto significa que durante el



período de la epidemia de COVID-19, las concentraciones de NOx disminuyeron en un 29,9% en comparación con las estaciones de control.

Por otro lado, la variable "lprecipitación" en el modelo de "sin lpop" se mantiene en un 2,2%, mismo valor que el modelo completo. Esto indica que la precipitación sigue siendo un factor estadísticamente significativo en la variable dependiente NOx, incluso cuando se excluye la variable "población" del modelo.

Sin embargo, al eliminar la variable "población" del modelo, la variable "renta" reduce su coeficiente al -21,4% con una significancia del 10% mientras el modelo completo marcaba -50,4%. Esto sugiere que la variable "renta" tiene un impacto menor pero significativo en la concentración de "NOx" durante la epidemia de COVID-19, incluso cuando la variable "población" se excluye del modelo.

### **5.5.2- Regresión adicional (test de robusteza)**

La 2ª hipótesis planteada consiste en determinar si existe una relación entre la reducción del 97% de las actividades aéreas en España durante el periodo de la pandemia (marzo de 2020 a mayo de 2021) y la disminución de la concentración de partículas NOx generadas por las aeronaves en el Aeropuerto de Barcelona.

Se han planteado dos ecuaciones adicionales: "xtregar lnox lvuelos lprec lpop lrenta, fe" y "regress lnox lvuelos lprec lpop lrenta". Al incluir "lvuelos" como una de las variables independientes en el modelo de regresión, se busca examinar si existe una relación significativa entre el número de vuelos y las concentraciones de NOx y ver cómo afecta al nivel de NOx en el aire. En ambos enfoques, se están incluyendo las variables precipitaciones, la población y la renta para controlar su posible influencia en las concentraciones de NOx.

En la tabla de resultados que se muestra a continuación, se hayan dos columnas llamadas "Agrupados" y "Efectos fijos".

En la primera columna "Agrupados" se realiza una regresión agrupada o de efectos agregados a partir del comando "regress lnox lvuelos lprec lpop lrenta". El objetivo es estimar la relación entre las concentraciones de NOx y los vuelos del Aeropuerto de Barcelona. No se tiene en cuenta los efectos fijos.

Por otro lado, en el modelo "Efectos fijos" a partir del comando "xtregar lnox lvuelos lprec lpop lrenta, fe", se incluyen los efectos individuales cada estación estudiada. Esto

permite capturar las diferencias individuales entre las estaciones sobre las concentraciones de NOx y los vuelos. Por lo tanto, los coeficientes estimados representan el efecto de cada variable independiente sobre las concentraciones de NOx en cada estación de medición. El objetivo es analizar cómo las concentraciones de NOx están relacionadas con los vuelos que se realizan en el Aeropuerto de Barcelona.

**Tabla 9:** Resultados estimados (test de robusteza)

VARIABLES	NOx		NOx (efectos fijos)	
	Agrupados	Efectos fijos	Sin Irenta	Sin Ipop
Ivuelos	<b>0,231***</b> (0,032)	<b>0,071***</b> (0,024)	<b>0,067***</b> (0,024)	<b>0,067***</b> (0,097)
Iprec	<b>-0,029**</b> (0,014)	<b>-0,022***</b> (0,005)	<b>-0,024***</b> (0,006)	<b>-0,022***</b> (0,006)
Ipop	<b>0,766**</b> (0,330)	<b>0,434*</b> (0,240)	<b>0,055*</b> (0,152)	
Irenta	<b>-0,704**</b> (0,291)	<b>-0,598**</b> (0,291)		<b>-0,237*</b> (0,195)
Constant	-2,02 (1,827)	<b>2,995***</b> (0,499)	<b>2,405***</b> (0,495)	<b>5,891***</b> (0,413)
R-cuadrado	0,066	0,036	0,0310	0,0341
Observaciones	896	896	896	896

Fuente: Tabla de elaboración propia con datos extraídos de STATA

**Los (\*) representan el nivel significativo del estudio: 1% (\*\*\*) , 5% (\*\*) y 10% (\*).**

Los resultados obtenidos en el modelo "Agrupados", muestran que la variable "Ivuelos" tiene un coeficiente estimado es 0,231 (23,1%) con un nivel de significancia muy alto (\*\*\*). Esto indica que un incremento del 1% en los vuelos está asociado con el aumento en las concentraciones de NOx del 23,1% en promedio para todas las estaciones.

En el caso del modelo de "Efectos Fijos", la variable "Ivuelos" tiene un coeficiente de 0,071 (7,1%) con un nivel de significancia muy alto (\*\*\*). Los resultados revelan que la variable Ivuelos en la estación del Prat de Llobregat muestran un efecto positivo significativo del 7,1% en las concentraciones de NOx. Esto significa que un aumento del 1% en los vuelos en el Prat de Llobregat se asocia con un incremento del 7,1% en las concentraciones de NOx, teniendo en cuenta las características específicas de cada estación. Los vuelos en el Prat de Llobregat tienen un impacto significativo en las concentraciones de NOx ya que, en el periodo de pandemia, la causa principal de la disminución en un 25,1% de óxidos de nitrógeno fueron la reducción de los vuelos como marca el modelo estudiado.

En el modelo "Agrupados", la variable "lprec" tiene el coeficiente de -0,029 (-2,9%) con un nivel de significancia significativo (\*\*). Esto indica que un aumento en la precipitación (1 mm) está asociado con una disminución del 2,9% de concentraciones de NOx. En el modelo de "Efectos Fijos", el coeficiente estimado es -0,022 (-2,2%) con un nivel de significancia muy elevado (\*\*\*), indicando que un aumento en la precipitación (1 mm) está asociado con una disminución del 2,2% en las concentraciones de NOx.

El modelo "Agrupados", la variable "lpop" tiene un coeficiente estimado es 0,766 (76,6%) con un nivel de significancia significativo (\*\*). Esto indica que un crecimiento del 1% en la población está asociado con el aumento del 76,6% de las concentraciones de NOx. En cambio, en el modelo "Efectos Fijos" el coeficiente se reduce al 0,434 (43,4%) con un nivel bajo de significancia (\*). Esto indica que un incremento en la población del 1% puede estar asociado a un aumento del 43,4% en las concentraciones de NOx debido al incremento del uso del aeropuerto por parte de la población.

En el modelo "Agrupados", la variable "lrenta" tiene un coeficiente de -0,704 (-70,4%) con un nivel de significancia significativo (\*\*). Se muestra que un aumento del 1% en la renta está asociado con una disminución del 70,4% en las concentraciones de NOx. En cambio, el modelo "Efectos Fijos" el coeficiente estimado es -0,598 (-59,8%) con un nivel de significancia significativo (\*\*). El aumento en la renta del 1% está asociado a una disminución del 59,8% en las concentraciones de NOx, puede ser debido, a una combinación de factores, como el uso de tecnologías más limpias, menos tráfico vehicular o una planificación urbana más favorable desde el punto de vista ambiental.

En el modelo "Agrupados", el coeficiente estimado para la constante es -2,026 sin nivel de significancia, lo que implica que no hay evidencia suficiente para afirmar que el valor de la constante es diferente de cero. En cambio, el de "Efectos fijos" es 2,995 con un nivel de significancia elevado (\*\*\*) mostrando que la constante cuando todas las variables independientes sean cero, se espera que la variable dependiente ("lnox") tenga un valor de 2,995.

Tal y como se estudió anteriormente, el resultado del VIF sobre la variable "renta" y "población" era de 16,39 (muy alto), así que se creó una variante del modelo para corroborar que los resultados obtenidos en los modelos explicados fueran lo más precisos posibles. Para ello, conociendo esta circunstancia, se han realizado el mismo modelo eliminando cada una de las variables y ver si afectaban en menor o mayor medida a los resultados.

En el modelo de efectos fijos sin la variable "población" muestran que la variable "lvuelos" tiene un coeficiente de 0,067 con una significancia del 1%. Esto significa que durante el período de la epidemia de COVID-19, las concentraciones de "NOx" disminuyeron en un 6,7% en comparación con las estaciones de control debido al factor de los vuelos. Aunque el coeficiente se reduce ligeramente en comparación con el modelo de efectos fijos completo (7,1%), la significancia se mantiene en el mismo nivel.

La variable "lprecipitación" se mantiene en un -2,2% en comparación con el modelo completo. Esto indica que la precipitación sigue siendo un factor estadísticamente significativo en la variable dependiente "NOx", incluso cuando se excluye la variable "población" del modelo.

Al eliminar la variable "población" del modelo, la variable "renta" reduce su coeficiente a -0,237 (-23,7%) con una significancia del 10%, reduciéndose casi la mitad respecto al modelo completo (-59,8%) con una significancia de (\*\*). Esto sugiere que la variable "renta" tiene un impacto menor pero significativo en la concentración de "NOx" durante la epidemia de COVID-19, incluso cuando la variable "población" se excluye del modelo.

## **6- Conclusiones y Recomendaciones**

Al inicio del proyecto, se planteó el objetivo principal de analizar el impacto de la COVID19 en las emisiones de NOx del Aeropuerto de Barcelona durante el periodo 2016 a 2022. Se quería aportar nueva literatura sobre los cambios de concentraciones de partículas NOx en el Aeropuerto de Barcelona durante el período de pandemia (marzo 2020-mayo 2021) debido a que los estudios previos realizados sobre la reducción de contaminación se centraban en el transporte terrestre de las ciudades.

A partir de los datos estudiados, se extraen las siguientes conclusiones:

1- La primera hipótesis del trabajo era conocer si las emisiones de NOx afectaban a las ciudades más próximas al aeropuerto, en este caso, el Prat De Llobregat. Se observa que en la estación tratada (Prat de Llobregat) durante el período de la pandemia (marzo de 2020 a mayo de 2021), hubo una reducción adicional del 25,1% en las concentraciones de NOx, respecto a las estaciones de Barcelona y Hospitalet. Esto indica que la actividad reducida del aeropuerto de Barcelona en el Prat de Llobregat tuvo un efecto significativo en la disminución de las emisiones de NOx en comparación con las estaciones de control en Hospitalet y Barcelona durante el COVID-19.

Estos resultados sugieren que las emisiones de NOx provenientes del Aeropuerto de Barcelona tienen una influencia directa en la calidad del aire de las ciudades colindantes, en este caso, el Prat de Llobregat, ya que la reducción de la actividad aeroportuaria resultó en una disminución sustancial de las concentraciones de NOx en la estación del Prat de Llobregat.

2- La segunda hipótesis plantea que la cancelación del 97% de las operaciones aeroportuarias en España durante la pandemia provocó a una disminución significativa de la contaminación del aire, aunque no se había cuantificado. Los resultados del modelo muestran que hay una relación muy significativa entre el número de vuelos y emisiones de NOx mostrando que la reducción del 1% de vuelos provocó una disminución del 7,1% de las concentraciones de NOx.

Cabe destacar que el impacto de la pandemia (marzo 2020 - mayo 2021) en el aeropuerto de Barcelona cayó en un 72,3% con un promedio de 7398 vuelos (15 meses) respecto a los 26.723 vuelos de promedio que se realizaron entre enero de 2016 a febrero de 2020. Esta reducción en los vuelos implicó que las concentraciones de NOx se redujesen en un 25,1%, mejorando la calidad del aire de la zona del Prat de Llobregat.

3) La tercera hipótesis que se planteó fueron si los factores como el clima, la renta, la ubicación del aeropuerto, el número de vuelos y la población influían en las emisiones de óxidos de nitrógeno generados por el Aeropuerto de Barcelona. Los resultados indican que la precipitación tiene un efecto negativo en las concentraciones de NOx en un -2,2%, un incremento de 1 mm de precipitación reduce en un 2,2% las concentraciones de NOx.

En la variable población, el crecimiento del 1% de los habitantes se asoció a un incremento del 50,4% en las concentraciones de NOx debido a un mayor uso del aeropuerto de Barcelona. Por otro lado, un mayor nivel de renta se relacionó con una disminución del 62,8% en las concentraciones de NOx a factores como el uso de tecnologías más limpias, menos tráfico vehicular o una planificación urbana más favorable desde el punto de vista ambiental.

La variable distancia se incluyó en efectos fijos debido a que podía ser de ayuda para identificar factores no observados y constantes en el tiempo que pudieran estar relacionados con las concentraciones de NOx.

Finalmente, el segundo objetivo marcado fue ofrecer soluciones/alternativas, una vez que se obtuvieran los resultados de los cambios de concentración de NOx en el Prat de Llobregat, para mejorar la calidad del aire del Aeropuerto de Barcelona y reducir los efectos nocivos hacia las ciudades colindantes debido a la actividad aérea.

Después de haber revisado de forma exhaustiva literatura científica, las soluciones que se dan para mejorar el problema de las partículas de NOx generadas por el Aeropuerto de Barcelona son las siguientes:

1) Estudios de impacto ambiental: Los estudios de impacto ambiental pueden identificar los impactos de las emisiones de NOx en el medio ambiente y proporcionar recomendaciones para mitigarlos. Los aeropuertos a menudo realizan estos estudios para cumplir con las regulaciones ambientales y para obtener permisos para operar.

2) Tecnologías limpias: Las buenas prácticas y las tecnologías limpias pueden ayudar a reducir las emisiones de NOx. Por ejemplo, el uso de combustibles más limpios y la mejora de los sistemas de control de emisiones de los motores de los aviones pueden reducir significativamente las emisiones de NOx.

3) Mejoras en la gestión del tráfico aéreo: La gestión eficiente del tráfico aéreo podría reducir el tiempo de espera en la pista y, por lo tanto, las emisiones generadas durante el proceso de aterrizaje y despegue. Se podrían implementar medidas como el uso de sistemas de control de tráfico aéreo más avanzados o la optimización de las rutas de vuelo.

4) Fomento del transporte público y la movilidad sostenible: Una reducción en el número de vehículos particulares que acceden al aeropuerto de Barcelona podría contribuir significativamente a la disminución de las emisiones de NOx. Se podrían establecer incentivos para fomentar el uso del transporte público y la movilidad sostenible entre los pasajeros y el personal del aeropuerto.

Aunque estas acciones podrían reducir las concentraciones de NOx en el Aeropuerto de Barcelona, el problema seguirá estando debido al incremento de los vuelos en el periodo postpandemia (2021-2022). El promedio de vuelos por mes (junio 2021-diciembre 2022) fue de 19.021, mientras que en el periodo prepandemia era de 26.723 vuelos. Esto indica una recuperación gradual en la actividad aérea en comparación con la época de la pandemia, aunque a un ritmo menor del que se pronosticaba.

A pesar de la implementación de nuevas políticas medioambientales en el sector del transporte, la complejidad técnica y logística de los vuelos, así como la falta de alternativas viables debido a las grandes inversiones requeridas, siguen siendo obstáculos significativos. Sin embargo, es esencial abordar los desafíos ambientales asociados con la aviación para mitigar su impacto negativo en el medio ambiente.

Para un futuro estudio, recomendaría el estudio de la propuesta de ampliación del Aeropuerto de Barcelona, evaluando las posibles consecuencias que esta ampliación podría tener en términos de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx). El crecimiento del Aeropuerto de Barcelona podría aumentar el número de vuelos y, por lo tanto, potencialmente aumentar las emisiones de NOx en la zona. Esto podría tener un impacto negativo en la calidad del aire y la salud de las personas que viven en las proximidades del aeropuerto.

Otra recomendación podría ser el estudio del impacto de las partículas NOx generadas en el aeropuerto de Barcelona hacia las ciudades colindantes y ver cuanta influencia del total de partículas que se emiten en la ciudad por medio de otras actividades (transportes terrestres, industrias...), a partir del análisis de variables que influyan como son la dirección del viento, temperatura, precipitaciones...(Popoola et al., 2018)

## 7- Cronograma

Tabla 10: Cronograma de trabajo

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Lectura de artículos/estudios	■	■							
Redactar introducción		■							
Redactar marco teórico		■							
Redactar conclusiones marco teórico		■							
Objetivos e hipótesis		■							
Metodología de recolección		■	■						
Corrección de fallos (gramática, vocabulario..)			■						
Entrega memoria 1 al tutor			■						
Feedback y correcciones			■						
Análisis de los datos recopilados			■	■					
Comparación de datos de polución				■	■				
Análisis de los resultados					■				
Entrega memoria 2					■				
Feedback y correcciones						■			
Resultados obtenidos						■	■		
Conclusiones							■		
Entrega al tutor								■	
Feedback y correcciones								■	
Entrega final									■
Presentación final									■

Fuente: Elaboración propia



## 8- Bibliografía

- (EEA). (2022). Transport and environment report 2021 — European Environment Agency. In EEA Report. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>
- AEMA. (2020). *Transporte — Agencia Europea de Medio Ambiente*. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/es/themes/transport/intro>
- Aeropuerto Barcelona-El Prat Josep Tarradellas | Aeropuerto de Barcelona*. (n.d.). Retrieved from <https://www.aeropuertobarcelona-elprat.com/home.html>
- Air Pollution Nineteen - C. A. Brebbia - Google Libros*. (n.d.). Retrieved from [https://books.google.nl/books?hl=es&lr&id=YVsdEPKI0p4C&oi=fnd&pg=PA25&dq=airport+barcelona+emissions+to+cities&ots=t3hiGAk1Gp&sig=jz8PNe2gg5r3n4RrcX2Ia-WezO0&redir\\_esc=y#v=onepage&q=airport barcelona emissions to cities&f=false](https://books.google.nl/books?hl=es&lr&id=YVsdEPKI0p4C&oi=fnd&pg=PA25&dq=airport+barcelona+emissions+to+cities&ots=t3hiGAk1Gp&sig=jz8PNe2gg5r3n4RrcX2Ia-WezO0&redir_esc=y#v=onepage&q=airport%20barcelona%20emissions%20to%20cities&f=false)
- Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., & Minjares, R. (2019). *A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015*. Retrieved from [www.theicct.org](http://www.theicct.org)
- Arpad Horvath and Samer Madanat. (2002). 'Telecommuting: An Effective Strategy for Reducing Vehicle Emissions?' *Journal of Urban Technology*, Vol. 9, No. 2, 2002.
- Baldasano, J. M. (2020a). COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 741. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.140353
- Baldasano, J. M. (2020b). COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain). *Science of The Total Environment*, 741, 140353. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.140353
- Casanovas i Ibáñez, Ò. (2017). *El proceso de liberalización del transporte aéreo en la UE. Efectos jurídicos sobre la protección de consumidores*. Retrieved from [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/368173/OCI\\_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/368173/OCI_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cheng, Y. H., et al. (2020). *Impact of precipitation on the air quality in Taoyuan International Airport, Taiwan*.
- Estadísticas de tráfico aéreo*. (n.d.). Retrieved from <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>
- García, E. (2021). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL*.
- Gillen, D. (2011). 'Aviation, Population, and the Environment: A Regional Analysis'.
- Graver, B., Zhang, K., & Rutherford, D. (2018). *CO<sub>2</sub> emissions from commercial aviation, 2018*.
- Iacus, S. M., Natale, F., Santamaria, C., Spyrtatos, S., & Vespe, M. (2020). Estimating and projecting air passenger traffic during the COVID-19 coronavirus outbreak and its socio-economic impact. *Safety Science*, 129. doi: 10.1016/J.SSCI.2020.104791

- Luccini, E., Lamagni, L. M., Deco, C., Insausti, J. G., & Herrera, L. (2021). *Estimación integral de emisiones por motores de combustión en el Aeropuerto Internacional Rosario y de la dispersión en su entorno*. Retrieved from <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/12275/1/estimacion-integral-emisiones-motores.pdf>
- Markandeya S. Jois. (2020). *'Rain scavenging of air pollution in an urban environment'*.
- Masiol, M., & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*, 95, 409–455. doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2014.05.070
- Merle Bolufer, H. M. (2020). *Análisis Económico y Otros Efectos Derivados del COVID-19 en las Aerolíneas Europeas y Estudio de un Modelo Estratégico de Recuperación*. Retrieved from <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/156915>
- Mora-Barrantes, J. C., Sibaja- Brenes, J. P., & Borbón- Alpizar, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica en el agua de lluvia y de niebla. *Revista Tecnología En Marcha*, 34, 92–103. doi: 10.18845/tm.v34i1.4806
- Ngo, T. H., Pan, W. C., & Waits, A. (2022a). Reduction in Aviation Volume due to COVID-19 and Changes in Air Pollution near the International Airport in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(4). doi: 10.4209/aaqr.210297
- Ngo, T. H., Pan, W. C., & Waits, A. (2022b). *Reduction in Aviation Volume due to COVID-19 and Changes in Air Pollution near the International Airport in Taiwan*. 22. doi: 10.4209/aaqr.210297
- Pacific, W. (2018). *7 Million Premature Deaths Annually Linked To Air Pollution*. Retrieved from <https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>
- Popoola, O. A. M., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V. B., Mead, M. I., Stettler, M. E. J., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment*, 194, 58–70. doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2018.09.030
- Sarrat, C., Aubry, S., Chaboud, T., & Lac, C. (2016). *Making Aviation Environmentally Sustainable*. doi: 10.3390/aerospace4030046
- STATA. (2023a). *STATA USER'S GUIDE*.
- STATA. (2023b). *Title stata.com corrgram-Tabulate and graph autocorrelations Description Quick start Menu Syntax Options for corrgram Options for ac and pac Remarks and examples Stored results Methods and formulas Acknowledgment References Also see. STATA*.
- Sun, X., Wandelt, S., Zheng, C., & Zhang, A. (2021). COVID-19 pandemic and air transportation: Successfully navigating the paper hurricane. *Journal of Air Transport Management*, 94. doi: 10.1016/j.jairtraman.2021.102062
- Xu-Qin Jiang, X.-D. M. and D. F. (2016). *Air pollution and chronic airway diseases: what should people know and do?* Retrieved from

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4740163/>

Yao, L., Kong, S., Zheng, H., Yan, Q., Chen, K., Yin, Y., Yuan, L., Wang, Z., Zhang, Y., Cheng, Y., Wu, J., Zeng, X., Zheng, S., Niu, Z., Fan, Z., Yan, Y., Liu, D., & Qi, S. (2021). Optical properties closure and sources of size-resolved aerosol in Nanjing around summer harvest period. *Atmospheric Environment*, 244. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118017

## 9- Anexos

### Anexo 1: Tabla de referencias literarias

**Tabla 11:** Resumen de la literatura estudiada

Referencia	Año	Partículas	País	Contribución
Xu-Qin Jiang, Xiao-Dong Mei, and Di Feng	2016	PM, O3, NO2, SO2 y CO	China y nivel mundial	- Efectos de la contaminación del aire en la salud de la población en función del contaminante.
Brandon Graver, Ph.D., Dan Rutherford, Ph.D., and Sola Zheng	2018	CO <sub>2</sub>	Nivel mundial	- Análisis de los gases CO <sub>2</sub> emitidos por los aviones.
Xiaoqian Sun, Sebastian Wandelt, Changhong Zheng and Anming Zhang	2021	-	Nivel mundial	- Impacto de la COVID19 en el transporte aéreo (número de viajes).
José M. Baldasano	2020	NO <sub>2</sub>	Madrid y Barcelona	- Reducción del 62% y 50% de NO <sub>2</sub> en el mes de marzo de 2020.
Luccini, E. Lamagni, L.M. Deco, C. Insausti, J. Herrera, L	2021	CO y NO <sub>x</sub>	Rosario, Argentina	- Influencia de NO <sub>x</sub> entre 1 y 2 km en los alrededores del aeropuerto. - Composición de NO <sub>x</sub> en los procesos de combustión: 89% NO, 10% NO <sub>2</sub> y 1% N <sub>2</sub> O.
García, Evelyn	2021		Guayaquil, Ecuador	

		NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> y PM10		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afectación directa de las emisiones del aeropuerto a la calidad del aire de la ciudad.</li> <li>- El CO fue el contaminante principal.</li> <li>- Seguido de NO<sub>x</sub> superando los límites máximos permitidos.</li> </ul>
Olalekan A.M. Popoola, David Carruthers, Chetan Lad, Vivien B. Bright, Mohammed I. Mead, Marc E.J. Stettler, John R. Saffell y Roderic L. Jones	2018	NO <sub>x</sub> y CO <sub>2</sub>	Londres	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El 75% de las emisiones de NO<sub>2</sub> de los alrededores del aeropuerto no provienen de las actividades del aeropuerto.</li> <li>- La dirección del viento ENE/E provoca que las partículas de NO<sub>x</sub> y CO provengan de la ciudad de Londres.</li> </ul>
Ngo, Tuan Hung Pan, Wen Chi Waits, Alexander	2022	SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub>	Taiwán	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción en un 17,5 % de SO<sub>2</sub> y 7,3% de NO<sub>2</sub> en el aeropuerto y en alrededores (feb 2019- ene 2020 y feb 2020- ene 2021).</li> </ul>
Lee, D. S. Fahey, D. W. Skowron, A. Allen, M. R.	2021	CO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub>	Nivel mundial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 50% respecto al 2000.</li> <li>- Se analiza los efectos de NO<sub>x</sub> a corto y largo plazo (O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>).</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia