



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

## **Estudio sobre la movilidad y su relación con la contaminación en la ciudad de Madrid**

Autor: Francisco Rey Pertierra

Director: Enrique Díaz Plaza

## Resumen:

La motivación para hacer este trabajo surge a raíz de la pregunta: ¿Es suficiente por sí mismo Madrid 360 para disminuir los niveles de contaminación de la capital de España? El campo de estudio de este trabajo abarca desde el año 2018 hasta el año 2023 ya que lo que se pretende estudiar es el impacto esta normativa ha tenido en la calidad del aire. El efecto en la manera en que nos desplazamos por la capital ha sido enorme y no ha dejado indiferente a nadie. Desde las primeras protestas de los comercios poco después de su implementación hasta los nuevos tipos de movilidad que cada día aparecen por nuestras calles, pasando por la calidad del aire, no cabe duda de que la pregunta con la que se abre este resumen está más que justificada.

En este trabajo se han cruzado datos sobre la calidad del aire, los aforos de tráfico y las distintas variables meteorológicas que pueden llegar afectar los niveles de contaminación. El análisis se ha realizado con modelos de regresión lineal y de correlaciones; así mismo, se presentan gráficos para completar el análisis de los datos que corroboran la evolución de las distintas variables tenidas en cuenta y la dispersión que presentan.

Palabras clave: Contaminación, Madrid, Madrid 360, Aforos de tráfico, Meteorología, Transporte, Calidad del aire

## Abstract:

The motivation for this work arises from the question: is it enough just with Madrid 360 to reduce the levels of pollution in Madrid? The field of study of this work covers the period from 2018 to 2023, since the aim is to study the impact that this regulation has had on air quality. The impact it has had on the way we move around the capital has been enormous and has left no one indifferent. From the protests from businesses shortly after its implementation to the way it has encouraged the emergence of new modes of transport, it is logical to ask whether it is really having the expected effect.

In this paper, data on air quality, traffic counts and different meteorological variables that could affect pollution levels have been cross-checked. The analysis has been carried out with linear regression and correlation models, and different visualisations have been made to study the evolution of the different variables and the dispersion between them.

Key words: Pollution, Madrid, Madrid 360, Traffic gauges, Meteorology, Transport, Air quality

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen: .....   | 2  |
| La Revolución Industrial como punto de partida de la contaminación del aire: ..... | 5  |
| Introducción:.....   | 6  |
| Qué es Madrid Central: .....   | 7  |
| Qué es un gas contaminante y cuáles son los principales contaminantes:.....        | 9  |
| Monóxido de carbono (CO) .....   | 10 |
| Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ): .....  | 10 |
| Óxidos de nitrógeno .....  | 11 |
| Ozono (O <sub>3</sub> ).....   | 12 |
| Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ).....                                      | 12 |
| Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S) .....                                      | 12 |
| Fluoruro de hidrógeno (HF) .....   | 13 |
| Alternativas de transporte actuales: .....   | 13 |
| Hipótesis: .....   | 16 |
| Metodología:.....  | 16 |
| Objetivo: .....  | 19 |
| Evolución de los niveles de contaminación:.....                                    | 20 |
| Estaciones: .....  | 20 |
| Tratamiento de los datos: .....  | 24 |
| Evolución: .....   | 25 |
| Evolución del tráfico: .....   | 27 |
| Tratamiento de los datos: .....  | 27 |
| Evolución: .....   | 29 |
| Relación Contaminación – Tráfico:.....   | 35 |
| Hipótesis: .....   | 36 |
| Metodología: .....   | 36 |
| Variables meteorológicas: .....  | 41 |
| Hipótesis: .....   | 42 |
| Metodología:.....  | 42 |
| Humedad: .....   | 43 |
| Precipitaciones: .....   | 45 |
| Presión barométrica:.....  | 45 |
| Temperatura: .....   | 46 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Velocidad del viento: ..... | 46 |
| Conclusiones: .....         | 47 |
| Bibliografía:.....          | 49 |
| Anexo: .....                | 51 |

La Revolución Industrial como punto de partida de la contaminación del aire:

El contexto histórico social de la Inglaterra del siglo XVII tiene como eje convergente una monarquía cada vez más estable y menos absolutista que poco a poco se convierte en el distintivo indiscutible de la unidad de la nación y favorece su desarrollo. Es precisamente en este momento, cuando Inglaterra comienza a dar pasos que a nivel institucional suponen la eliminación de las restricciones que dificultaban el desarrollo del país a gran escala. Paulatinamente, el país comienza, así mismo, a dinamizar sus recursos naturales entre otros el carbón, la energía hidráulica y el innumerable número de vías fluviales que recorren el país e impulsan la comunicación y el transporte de mercancías con los puertos marítimos de sus costas. Si a esto le sumamos los avances científico-tecnológicos del momento, en la segunda mitad del siglo XVIII, concretamente en 1760, ya se puede formalmente hablar del estallido de la revolución industrial (Palmero Escudero, 2022).

Esta profunda transformación en la forma de producción de bienes que se exporta al resto del mundo y cambia el curso de la historia produciendo cambios sociales, culturales políticos y económicos de gran calado es, sin duda, el punto de partida de un sinnúmero de problemas medioambientales que a día de hoy siguen contaminando nuestras aguas, nuestro aire y nuestra tierra afectando no solo grandes áreas del paisaje por culpa del calentamiento global si no también la salud de todos nosotros.

Desde los primeros telares hidráulicos del XVIII pasando por el ferrocarril y la máquina de vapor... a la actual industrialización y medios de transporte a gran escala, no ha habido forma de revertir el proceso de contaminación que estas actividades conllevan: la emisión indiscriminada de gases contaminantes a la atmósfera. Esto es, la aparición de una mezcla de gases de distinta procedencia –fenómenos naturales y/o antropogénicos– a distintas concentraciones que resultan muy difícil de eliminar al mantenerse unidos al planeta por la fuerza de la gravedad (Garnacho Frutos, 2018).

## Introducción:

El proyecto Madrid 360 es un conjunto de medidas implementadas por el Ayuntamiento de Madrid con el objetivo de abordar los desafíos relacionados con la movilidad y el medio ambiente en la ciudad. Fue presentado en 2019 como una evolución y ampliación de la anterior iniciativa denominada Madrid Central, la cual se encuentra actualmente englobada dentro de este marco 360 (Ayuntamiento de Madrid, 2023).

Madrid 360 se basa en cuatro ejes principales: la mejora de la calidad del aire, la reducción del ruido, la promoción de la movilidad sostenible y el impulso de la economía circular (Ayuntamiento de Madrid, 2023). Para alcanzar estos objetivos, se proponen varias vías de actuación tales como:

- Ampliación de la zona de bajas emisiones: además de Madrid Central, se han creado otras zonas de bajas emisiones en diferentes puntos de la ciudad, con restricciones de acceso para vehículos más contaminantes.
- Impulso de la movilidad sostenible: se promueve el uso de medios de transporte más limpios, como bicicletas y vehículos eléctricos, mediante la creación de nuevas infraestructuras, ampliación de la red de carriles bici y fomento del transporte público para acceder a esas nuevas zonas de bajas emisiones.
- Plan de calidad del aire: se van a implementar en el corto y medio plazo diferentes medidas para reducir la contaminación atmosférica, como la renovación de la flota de autobuses urbanos por otros que sean menos contaminantes, las famosas líneas '00' que en el 2022 transportaron a más de 2'6 millones de viajeros, y la creación de áreas de carga y descarga inteligentes.
- Electrificación del transporte público: la Empresa Municipal de Transportes de Madrid cuenta actualmente con un total de 19 rutas de autobús cero emisiones, lo que la convierte, por detrás de Berlín, en la segunda ciudad de Europa que cuenta con más líneas electrificadas.
- Economía circular: fomentando la gestión sostenible de residuos y el reciclaje, promoviendo la economía circular como vehículo para minimizar los impactos ambientales.

A priori, cabe pensar que la iniciativa de Madrid 360 ha sido todo un éxito tal y como los datos respaldan. Por primera vez desde su implantación, la capital madrileña ha cumplido con la Directiva Europea de Calidad del Aire en el año 2022. Desde que se comenzó a a

aplicar esta normativa europea, en los últimos 3 años las 24 estaciones de calidad del aire repartidas por el municipio presentan niveles de NO<sub>2</sub> más bajos y por añadidura, 2022 fue el primer año en el que no fue necesario activar el protocolo anticontaminación (Noticias Ayuntamiento de Madrid, 2023).

Qué es Madrid Central:

Madrid Central es una ZBE -zona de bajas emisiones- ubicada en el pleno corazón de la ciudad de Madrid. En total, la superficie de la misma abarca aproximadamente 480 hectáreas en las que se restringe el acceso a los coches a fin de dar prioridad a los peatones, ciclistas y usuarios del transporte público (Diario de Madrid, 2022). Este proyecto forma parte de Madrid 360, siendo este la primera fase del mismo.

La puesta en marcha de este plan para salvaguardar el medioambiente pasaba obligatoriamente por la ejecución de una profunda renovación de la zona centro y la realización de importantes reformas –mejoras- en las principales arterias de la ciudad para proporcionar más espacio a los nuevos medios de transporte a la vez que se descongestiona el tráfico, mejora la calidad del aire y por consiguiente la salud de los ciudadanos.

El proyecto aspira a lograr tres objetivos (Diario de Madrid, 2022):

- Mejora de la calidad del aire: al restringir el acceso a los vehículos más contaminantes de las personas que no tengan su domicilio en el centro las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirán lo que conlleva otros beneficios como el aumento de la facilidad para estacionar en el centro. El principal objetivo de la mejora de la calidad del aire, y por ende del proyecto, es la disminución de los niveles actuales de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en un 40%.
- Disminuir los niveles de contaminación acústica: al descender el número de vehículos de combustión que acceden a la zona centro, el ruido provocado por estos también disminuirá enormemente.
- Mitigar la congestión del tráfico en Madrid: para lograrlo se fomentará el uso de medios de transporte público y nuevas formas de movilidad que ocupen menos

espacio, reduzcan atascos y por consiguiente atraigan más visitantes a la zona centro.

Los criterios de acceso beneficiarán a los residentes en el centro y a los conductores de vehículos que cumplan con una serie de requisitos (Restricciones Madrid, 2023). Estos últimos, son los siguientes:

1. Los vehículos con etiquetas inferiores a la ECO que vayan a estacionar en parkings públicos o garajes privados. El horario de estacionamiento en la vía pública estará restringido a entre las 7:00 a 22:00.
2. Todos aquellos vehículos VTCs como taxis, Uber, Cabify... que tengan etiquetas inferiores a la ECO, tan solo tendrán permitido el acceso a la almendra central cuando tengan un servicio previamente contratado en la zona. En caso de que la etiqueta sea ECO o superior, el acceso a esta zona no presentará limitaciones ni horarias ni de servicio.
3. Los vehículos de todas aquellas personas residentes en el interior de las zonas de bajas emisiones tendrán acceso ilimitado hasta el año 2025, sea cual sea su etiqueta.
4. Los vehículos de empresas, autónomos e invitados pueden acceder a la zona de bajas emisiones si realizan su actividad en el interior del Distrito Centro o en mercadillos municipales.
5. Todos aquellos vehículos de trabajadores cuyo horario sea nocturno, pueden acceder al interior de la zona de bajas emisiones sin limitaciones entre las 00:00 y las 06:30.
6. Los vehículos empleados en el transporte de personas de movilidad reducida podrán acceder a las zonas de bajas emisiones, de manera ilimitada, si disponen del permiso de estacionamiento para minusválidos. A partir de 2025, estos vehículos deberán de estar adaptados.
7. Los vehículos que se utilicen para llevar o traer a alumnos hasta educación secundaria podrán acceder a la zona de bajas emisiones de manera ilimitada. No obstante, del año 2025 en adelante deberán contar con una etiqueta igual o superior a la B de la DGT.



8. Los vehículos que accedan a los talleres de reparación ubicados en la zona de bajas emisiones pueden hacerlo con un máximo de 4 permisos diarios por cada autorización de estacionamiento del SER – servicio de estacionamiento regulado- Solo se permitirá su acceso si disponen de etiqueta de la DGT.
9. Los vehículos de autoescuela que dispongan de una pegatina de la DGT igual o superior a la C podrán acceder sin restricciones a las zonas de bajas emisiones.
10. Los vehículos de la mayoría de empleados públicos tampoco tendrán restricciones de acceso a las zonas de bajas emisiones.
11. Los vehículos de *carsharing* y *motosharing* –movilidad compartida- pueden acceder a la zona de bajas emisiones siempre y cuando cuenten con la pegatina de la DGT correspondiente.
12. Los vehículos que cuenten con una invitación de visita a una persona que resida en el interior de una zona en la que existan restricciones de movilidad. Estas invitaciones se podrán extender hasta 24 horas después del acceso, y su número está limitado.

Para los conductores de motocicletas o ciclomotores, las limitaciones son similares, y podrán acceder a Madrid Central aquellos que dispongan de pegatina ECO, CERO, B o C. Los vehículos sin pegatina de la DGT no podrán entrar salvo que sean residentes.

Qué es un gas contaminante y cuáles son los principales contaminantes:

Según el tesoro de la Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente (EIONET), un contaminante atmosférico es *«cualquier agente contaminante o combinación de agentes, incluyendo cualquier sustancia o materia física, química, biológica, radiactiva que se emita al aire ambiente o entre en él de otro modo y que pueda, en concentraciones suficientemente elevadas, dañar a los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales»*.

A continuación, y tomando como referencia la definición de EIONET, se describen someramente los gases contaminantes más comunes y cómo impactan sobre los ecosistemas y la salud humana.

## Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas inflamable irritante, incoloro, inodoro, extremadamente tóxico y de muy fácil propagación. De origen natural y/o producido por la actividad humana –industria, automoción, calefacción, tabaco ...- se produce por la combustión incompleta del carbón y la biomasa. Puede permanecer en suspensión en el aire entre uno y tres meses.

Su inhalación produce cefaleas, náuseas, debilidad, dolor en la zona superior del tórax vómito y confusión. Resulta extremadamente venenoso una vez dentro de los pulmones ya que desde allí se trasfiere a la sangre anulando su capacidad para transportar oxígeno al organismo; los daños que ocasiona en los tejidos son considerablemente nocivos llegando incluso a provocar la muerte de personas y animales.

## Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas no inflamable, no explosivo e incoloro con una pervivencia que no supera los tres días. En distintos tipos de producción industrial es necesaria la quema de carburantes fósiles ricos en azufre como el petróleo u otro tipo de combustibles sólidos (antracita, lignito, turba, hulla...) a altas temperaturas. Tanto unos como otros desprenden partículas contaminantes con una capacidad de dispersión tan grande que pueden aparecer a grandes distancias del punto de emisión. Hay procesos naturales como las erupciones volcánicas que también despiden SO<sub>2</sub> con lo que las zonas limítrofes también deben ser desalojadas.

En cuanto a su capacidad de destrucción del medioambiente, señalar que una vez en contacto con el vapor de agua presente en la atmosfera, el SO<sub>2</sub> produce la acidificación de los ecosistemas forestales y acuáticos con la consiguiente pérdida de especies al desprender ácido sulfúrico.

En lo que a la salud humana respecta. el SO<sub>2</sub> altera el metabolismo de las proteínas, provoca asimismo dolores de cabeza, afecciones oculares y ansiedad, aunque donde más se dejan sentir sus efectos es en el sistema respiratorio al provocar insuficiencia pulmonar.

## Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son todos los compuestos químicos binarios que mezclan nitrógeno y oxígeno. De tipo gaseoso son, toxicológicamente hablando, muy perniciosos. A temperatura ambiente su color es bien parduzco o inexistente y no son inflamables. Se forman cuando la combustión se produce a altas temperaturas y el aire es el comburente, es decir, la sustancia que favorece la ignición ya que sus componentes - 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno, 0,89% de gases nobles, 0,1% de agua - producen la total oxidación del combustible.

Los óxidos de nitrógeno se presentan en la atmósfera como:

Óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), un gas volátil que carece de color y tiene un olor dulce. Poco tóxico se suele emplear como droga ya que provoca alucinaciones y falsas percepciones de lo que sus consumidores tocan, comen, huelen, oyen y/o ven. Al provocar un estado de euforia se le conoce como el gas de la risa.

Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). En función de la temperatura a la que se encuentra el dióxido de nitrógeno se presenta como un gas rojizo, un líquido amarillento o un sólido incoloro de muy baja densidad por lo tanto imperceptible. En contacto con el agua se descompone y da lugar ácido nítrico, ácido nitroso y óxido de nitrógeno. Altamente contaminante, es el resultado de la combustión efectuada a altas temperaturas y como en casos anteriores, su origen es tanto natural como antropogénico. Muy irritante, aparece en el origen de otros contaminantes secundarios como el ozono y las partículas  $\text{PM}_{2.5}$ .

La salud de los seres humanos se ve afectada al producir tos, flemas, cansancio, fatiga, dificultades respiratorias y severas irritaciones en la mucosa de la garganta, la nariz y los ojos.

Monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ). Inodoro, incoloro, tóxico y no inflamable, se oxida muy rápidamente transformándose en  $\text{NO}_2$ . Aparece cuando se produce la descomposición bacteriana o en caso de incendio... Una vez en la atmósfera, al interactuar con sustancias producidas por la luz solar produce ácido nítrico, el mayor componente de la lluvia ácida.

En concentraciones elevadas los NOx (combinación de NO<sub>2</sub> y NO) tienen dañar la piel y causan estragos en el sistema respiratorio provocando edemas pulmonares.

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

Este contaminante secundario es el responsable de severos efectos adversos sobre la salud humana y los ecosistemas cuando se sitúa en la troposfera, la capa de la atmósfera el lugar donde se desarrollan todos los procesos climáticos y meteorológicos.

El ozono troposférico aparece cuando los precursores, partículas contaminantes emitidas directamente como los NOx, el CO<sub>2</sub> o los COVs, reaccionan fotoquímicamente con la luz solar, el viento es flojo y las temperaturas altas. Su impacto sobre la salud es muy peligroso al ser capaz de destruir órganos completos debido a su corrosivo potencial.

### Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

Según se recoge en el Registro Estatal de Fuentes y Emisiones Contaminantes, el benceno es un hidrocarburo líquido, muy volátil, poco soluble en agua y de dulce olor.

Al igual todos los contaminantes anteriormente mencionados, tiene un doble origen: natural y antropogénico, destacando, una vez más, la actividad volcánica, los incendios forestales, y el humo del tabaco. Según se recoge en el INSHT (1998), la inhalación de esta sustancia en cantidades muy concentradas incrementa el riesgo de desarrollar cáncer y provoca fuertes alteraciones en el sistema nervioso central.

### Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

Muy fácil de detectar aún en pequeñas concentraciones al tener un olor muy característico, este gas es incoloro, inflamable y muy tóxico. Aparece de forma espontánea en las erupciones volcánicas, el agua estancada, el gas natural y el petróleo.

Resulta letal al concentrarse en espacios confinados como las torres de refrigeración, las alcantarillas, los sumideros y las cloacas.

Se asocia al bloqueo de la función enzimática de las proteínas que producen cambios químicos en el organismo como la descomposición de los alimentos que ingerimos o la coagulación de la sangre. (INSHT, 2011).

#### Fluoruro de hidrógeno (HF)

Aunque es posible encontrar fluoruro de hidrogeno en estado líquido, este gas incoloro se utiliza como materia prima en la industria del aluminio, los refrigerantes y distintos tipos de combustible. Muy corrosivo y abrasivo irrita la mucosa nasal, la conjuntiva, la córnea y la epidermis.

#### Alternativas de transporte actuales:

El contexto tecnológico en el que vivimos está en constante transformación; la interconectividad digital es cada vez mayor, se puede trabajar desde casa, a través de nuestros dispositivos se coordinan distintos tipos de recursos que ya se han materializado en nuevas e innovadoras formas de movilidad. Ya no es necesaria la combustión de materiales fósiles para que un vehículo se mueva, los vehículos eléctricos son una realidad, se acepta socialmente compartir coche para desplazarse y ahorrar, la IA – inteligencia artificial- permite el uso de vehículos autónomos, el *internet de las cosas* programará la señalización y los semáforos, también se nos informará de donde hay plazas de aparcamiento disponibles y es posible ver a algunos coches aparcados solos; de igual modo, ya es posible medir en tiempo real la densidad, la intensidad y la velocidad de los vehículos en las autopistas y las autovías, gracias al 5G los coches irán a recogerte donde indiques... en resumen una innumerable cantidad de nuevas realidades que ya forman parte de nuestro día a día.

Los servicios de transporte tradicional están evolucionando a una velocidad tan vertiginosa, que cada día aparecen nuevos conceptos relacionados con la nueva movilidad (McKinsey & Company, 2023). Del popular *carsharing* -el uso de un coche es lo que se

intercambia– pasamos a hablar de *ridesharing* en el que el recurso de transporte es un viaje en coche, furgoneta... no el vehículo en sí mismo.

A continuación se detallan algunos de los nuevos conceptos de movilidad susceptibles de ver y usar en Madrid.

- Micromovilidad. El último recorrido que una persona hace al bajarse del autobús o el metro hasta llegar a su casa utilizando bicicletas públicas, patinetes eléctricos, ciclomotor eléctrico...
- Ride sharing, ride pooling y ride hailing. Lo que se comparte es el coche. *Ride sharing* viajes en coche entre particulares, *ride hailing* se contrata el viaje en coche a través de una aplicación y *ride pooling* , un conductor profesional lleva a su destino a varios pasajeros.
- *Charging*. Característicos de movilidad eléctrica, los servicios de *charging* informan a los dueños de vehículos eléctricos e híbridos enchufables la ubicación de los puntos de carga más próximos a la vez que facilitan el pago de dicha carga.
- Servicio de movilidad corporativa con tarifa plana de movilidad. Con la que los usuarios pueden desplazarse en zonas urbanas y periféricas hasta 50 km a la redonda abonando una cuota mensual fija
- *Carpooling*, *buspooling*, VTCs, servicios de suscripción de vehículos
- Pago inteligente por aparcamiento

Sin embargo, según indica la consultora McKinsey, es de vital importancia integrar estas nuevas realidades en función de distintas perspectivas –humanística, procesual y tecnológica- y, en consecuencia, adaptarlas a las necesidades de la sociedad, ya que cada una de ellas es muy distinta a la anterior, tanto en usos como en posibilidades y lo que verdaderamente importa es el cuidado del entorno. A este nuevo enfoque integrador, cuyo objetivo es la unión de las nuevas tendencias de la movilidad con el transporte público y

la reducción del uso individual del coche, se le conoce con el término *Mobility as a Service (MaaS)*, en español movilidad como servicio.

Todas estas nuevas opciones de movilidad que se acaban de señalar son susceptibles de cambiar el tránsito de personas y viajeros tal como hasta ahora se ha conocido. Unas se focalizan en el tráfico en las afueras de las ciudades -como el *ridesharing*- y otras en el centro de las mismas -como la micromovilidad -. Sin embargo, no hay que olvidarse de las opciones que actualmente representan una alternativa al vehículo privado y que permiten el acceso a la almendra central.

A día de hoy, una de las mejores opciones disponibles para acceder a Madrid Central es hacer uso del transporte público que cuenta con numerosos medios y líneas para moverse. En esta zona, la ciudad de Madrid cuenta con seis líneas de metro: línea 1, línea 2, línea 3, línea 4, línea 5 y línea 10, varias líneas de cercanías RENFE que llegan a las estaciones de Sol, Atocha, Embajadores y Recoletos y un gran número de líneas de autobús que efectúan paradas en la zona de bajas emisiones. Además, el Ayuntamiento de Madrid dispone de su propio sistema público de bicicletas de alquiler, BiciMAD, que cuenta con 56 estaciones y 1.377 anclajes.

En cuanto a transporte público privado se refiere, taxis y vehículos de transporte con conductor (VTC) de empresas como Uber o Cabify, la legislación les permite actuar prácticamente sin limitaciones. Los taxis pueden acceder a Madrid Central a través de las 27 zonas reservadas para ellos en el distrito Centro. Por su parte, los vehículos de transporte con conductor que tengan un servicio previamente contratado pueden acceder al área para recoger o dejar a un viajero en las calles de la zona.

Los vehículos privados con etiquetas ambientales ECO o CERO tienen una amplia oferta de aparcamientos rotatorios privados y 18 aparcamientos gestionados por el Ayuntamiento de Madrid en la zona. También se puede acceder en bicicleta, motos con etiqueta ambiental y vehículos de alquiler de corta duración, los famosos *carsharing*, *motosharing* y *bicisharing*.

Por otro lado, cada día aparecen nuevos artilugios resultado del ingenio y la creatividad de los viajeros, basta observar la cantidad de patinetes eléctricos, monociclos eléctricos, *segways* y *hoverboards* de batería recargable que transitan por nuestras calles.

## Hipótesis:

Este trabajo tiene como objetivo demostrar que el transporte privado es la principal causa de los altos niveles de contaminación que afecta no solo a la salubridad de una ciudad sino también a la de sus moradores. Es cierto que otras actividades como la calefacción, el aire acondicionado y en menor medida la industrialización -ya que los polígonos industriales se ubican en la periferia de las ciudades alejados de los centros urbanos-, son factores que asimismo impactan en la calidad del aire pero la huella de carbono que dejan es mínima en comparación con los efectos contaminantes de los vehículos.

Todos los datos que se han utilizado provienen del repositorio público del Ayuntamiento de Madrid, la elección de esta fuente se fundamenta en que los datos, además de ser oficiales.

## Metodología:

En el ámbito de estudio que engloba el presente trabajo de fin de grado, la comprensión de la relación entre dos variables es del todo fundamental ya que, sin ella, su realización sería del todo imposible. La metodología más empleada es el modelo de regresión lineal, que se utilizará como punto de partida para el análisis. Este modelo nos permitirá cuantificar la asociación entre las variables de densidad de contaminación, aforo de tráfico y meteorología lo que nos proporcionará una comprensión más profunda del modo en que estas variables se relacionan entre sí. Sin embargo, para obtener un análisis completo y enriquecedor, complementaremos estos modelos con una serie de visualizaciones gráficas. El objetivo de las mismas es brindar una representación intuitiva de los datos que facilite su comprensión y exploración toda vez se añaden comparaciones con otras variables y / o su evolución a lo largo del tiempo, entre otros aspectos a tener en cuenta.

La elección de un modelo de regresión lineal como base del análisis se justifica por su idoneidad para modelar y cuantificar la relación entre variables generalmente continuas. Estos modelos nos permiten estudiar la significancia estadística, es decir, si la interacción entre variables es aleatoria o tiene sentido estadísticamente hablando. De igual modo, los modelos de regresión lineal son los más adecuados a la hora de asumir una relación lineal entre las variables, lo que significa que cuando la variable independiente varía, la variable



dependiente también lo hace proporcionalmente. Esta suposición lineal permite obtener estimaciones de los coeficientes de regresión.

Los coeficientes de regresión permiten estudiar la magnitud y dirección de la variación de dichas asociaciones y estimaciones entre variables. Las variables a analizar se seleccionarán en función de estos tres parámetros fundamentales: la densidad del tráfico rodado, los niveles de contaminación -medidos de acuerdo a la densidad de las partículas contaminantes por metro cúbico de aire- y otras variables meteorológicas como el viento y la lluvia. Todas estas variables son continuas a excepción del nivel de aforo del tráfico, que se ha ponderado contabilizando el número de vehículos que circulan en un tramo de carretera por unidad de longitud en un instante determinado. En este caso en concreto, la velocidad no se ha tenido cuenta ya que las estaciones de medición no recogen este dato.

A pesar de que la variable de la densidad de tráfico sea discreta, sí se tendrá en cuenta al realizar el análisis. Esto se debe al reconocer la existencia de una relación lineal entre la variable tráfico y la variable dependiente continua, contaminación del aire, por lo que es del todo razonable evaluar la influencia de cada categoría en la variable dependiente. La razón subyacente a esta medición se basa en que a la hora de justificar la implementación de las medidas de restricción a la movilidad, la ciudad de Madrid señaló el tráfico como la principal causa de los bajos niveles de calidad del aire y por consiguiente, como el origen de los cuantiosos daños que ocasiona a nivel medioambiental, económico y sanitario entre otros -relación que nosotros pretendemos corroborar-. Más adelante se podrá observar en la práctica cómo esta afirmación tan contundente por parte del Ayuntamiento de Madrid se ha constatado irrefutablemente al haber obtenido en todos los casos un  $p$  – valor mucho menor a  $0'05$ , lo cual nos permite afirmar que el modelo sí tiene significancia estadística.

Retomando la metodología utilizada, afirmar en primer lugar que los modelos de regresión lineal permiten cuantificar cómo es la relación entre variables, indicando la dirección e influencia que tiene el cambio de la variable discreta en la continua. Para el análisis realizado en R Studio, se ha empleado la función `lm()`. En segundo lugar, al haber demostrado la relevancia estadística de la relación, podemos dar por válidas y dotar de sentido a las representaciones gráficas de los datos que enriquecen enormemente el análisis -gráficos de líneas en los que observar la evolución de una variable a lo largo del tiempo, gráficos de barras para hacer comparativas o gráficos de dispersión para estudiar

la evolución de dos variables, por citar algunos ejemplos que más adelante aparecerán reflejados en el trabajo-.

En este trabajo también hemos empleado modelos de correlación, que en R Studio se han realizado empleando la función `cor()`. Más concretamente se ha utilizado el coeficiente de correlación de Pearson que obtenemos con la misma para estudiar con mayor precisión la asociación entre dos variables. La decisión se justifica en el hecho de que este coeficiente de correlación proporciona una medida cuantitativa de la relación -que oscila entre el 1 y el -1- que nos indica la fuerza y la dirección de la relación entre variables.

Para la limpieza, tratamiento -calcular nuevos campos, definir reglas o cruzar *datasets*, entre otros- y presentación final de los datos en bruto, se ha empleado la herramienta de Excel y de CSV. Estos datos ya tratados se han utilizado como input tanto en R Studio como en Power BI.

La herramienta empleada para realizar el análisis de los datos ha sido R Studio. Al haber utilizado este *software* a lo largo de la carrera ya me encuentro familiarizado con el entorno de trabajo y el lenguaje de programación que emplea. Sin embargo, el principal motivo por el que también se ha elegido este software no es otro que la potencia que tiene a la hora de ejecutar el análisis de datos. R Studio cuenta con una amplia gama de paquetes que permiten tanto realizar cálculos y modelos como representarlos visualmente -se podrá observar a lo largo del trabajo. Además, este software cuenta con una amplia gama de usuarios y numerosos recursos en abierto, lo que no hace más que reforzar el argumento a favor de la plataforma.

Las mayoría de las visualizaciones de datos que podremos observar en el trabajo han sido realizadas con Power BI. Nuevamente, esta herramienta ha sido elegida por haber sido empleada en la carrera, por su potencia y por la enorme cantidad de recursos, herramientas y gráficos que se pueden crear con ella. Posibilitan un nivel de personalización casi total a la vez que fomenta la creatividad del usuario ayudando a realizar visualizaciones prácticas, fáciles de entender y muy intuitivas, casi me atrevería a afirmar que pedagógicas, aspectos todos ellos fundamentales para el análisis de datos.

Los datos que aparecerán recogidos visualmente se corresponderán con la media diaria o con el agregado total de cada mes -cuando la comparativa sea entre varias variables a la vez, y siempre aparecerán reflejados en la misma unidad de medida, cuando sea posible, o estandarizados-. Para realizar un análisis comparativo que proporcione *insights* más

provechosos se hará una comparativa por zonas o anillos para ver cómo afectan las medidas de Madrid Central y de Madrid 360 tanto al interior de la almendra como al interior de la M-30. De igual modo, los resultados se compararán con la situación de fuera de la M-30.

Objetivo:

El objetivo del trabajo será demostrar la incidencia de distintas variables en el nivel de contaminación de la ciudad de Madrid. En este trabajo, vamos a estudiar cuatro tipos de variables: dos independientes y una dependiente. Las dos variables independientes que vamos a considerar son meteorológicas y del tráfico. La variable dependiente va a ser la concentración total de gases, entendiendo esta como la concentración de aire contaminante por metro cúbico de aire -  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  -.

El objetivo es ver cómo varía la variable dependiente en relación a las independientes para ver cuál de ellas tiene más impacto de forma aislada. No obstante, consideraremos una tercera variable como independiente: el paso del tiempo. A priori, no tiene sentido considerar esta variable como un elemento más a ponderar ya que es una evolución lineal y constante que carece de relación a la hora de influir en los niveles de contaminación. Pese a ello, el tiempo también va ineludiblemente asociado al resto de las variables, ya que conforme avanza el tiempo son más las restricciones de circulación y aparcamiento que se implementan en Madrid 360. Además, la meteorología y el tráfico también son cíclicos: en verano hace más calor y llueve menos pero a su vez también hay menos desplazamientos al irse una gran parte de la población de vacaciones. El estudio de esta variable temporal como independiente tan solo tiene como objetivo que nos hagamos una primera imagen mental sobre cómo están evolucionando los niveles de contaminación en la capital, ya que para el resto de casos no se tendrá en cuenta. Se podrán ver los resultados de este modelo con mayor detalle más adelante.

Evolución de los niveles de contaminación:

Estaciones:

Para el estudio de los niveles de contaminación, hemos limpiado varios *datasets* con información sobre los niveles de contaminación y generado un maestro unificando todos los datos disponibles. Cada *dataset* contiene información diaria de los niveles de contaminación de la ciudad de Madrid y se encuentra dividido por años.

Las estaciones de medición de niveles de contaminación atmosférica forman el sistema de monitorización de la ciudad de Madrid y lo componen 24 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la geografía de la capital que recogen información sobre los niveles de concentración en el aire de dos tipos de partículas – las de un tamaño menor a 2,5 µm y las de un tamaño menor a 10 µm - y de 15 gases nocivos para la salud (Ayuntamiento de Madrid, 2023b y Ayuntamiento de Madrid, 2023c). En la siguiente tabla podemos ver las magnitudes, unidades de medida y las técnicas de medida para cada uno de ellos:

| Magnitud |                                     | Abreviatura o fórmula | Unidad medida     | Técnica de medida |                            |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| 01       | Dióxido de Azufre                   | SO <sub>2</sub>       | µg/m <sup>3</sup> | 38                | Fluorescencia ultravioleta |
| 06       | Monóxido de Carbono                 | CO                    | mg/m <sup>3</sup> | 48                | Absorción infrarroja       |
| 07       | Monóxido de Nitrógeno               | NO                    | µg/m <sup>3</sup> | 08                | Quimioluminiscencia        |
| 08       | Dióxido de Nitrógeno                | NO <sub>2</sub>       | µg/m <sup>3</sup> | 08                | Id.                        |
| 09       | Partículas < 2.5 µm                 | PM2.5                 | µg/m <sup>3</sup> | 47                | Microbalanza               |
| 10       | Partículas < 10 µm                  | PM10                  | µg/m <sup>3</sup> | 47                | Id.                        |
| 12       | Óxidos de Nitrógeno                 | NO <sub>x</sub>       | µg/m <sup>3</sup> | 08                | Quimioluminiscencia        |
| 14       | Ozono                               | O <sub>3</sub>        | µg/m <sup>3</sup> | 06                | Absorción ultravioleta     |
| 20       | Tolueno                             | TOL                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Cromatografía de gases     |
| 30       | Benceno                             | BEN                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Id.                        |
| 35       | Etilbenceno                         | EBE                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Id.                        |
| 37       | Metaxileno                          | MXY                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Id.                        |
| 38       | Paraxileno                          | PXY                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Id.                        |
| 39       | Ortoxileno                          | OXY                   | µg/m <sup>3</sup> | 59                | Id.                        |
| 42       | Hidrocarburos totales (hexano)      | TCH                   | mg/m <sup>3</sup> | 02                | Ionización de llama        |
| 43       | Metano                              | CH <sub>4</sub>       | mg/m <sup>3</sup> | 02                | Id.                        |
| 44       | Hidrocarburos no metánicos (hexano) | NMHC                  | mg/m <sup>3</sup> | 02                | Id.                        |

Encontramos tres tipos de estaciones que monitorizan los niveles de concentración de todos estos gases.

- Las urbanas de fondo, que miden los niveles de contaminación a los que están sometidos los habitantes de la ciudad de Madrid. A día de hoy se encuentran ubicadas en distintas plazas, calles, zonas residenciales...
- Las estaciones de tráfico están situadas cerca de las principales arterias de circulación de la ciudad, con lo que mayoritariamente se miden los niveles de contaminación procedentes del tráfico.
- Las estaciones suburbanas están situadas a las afueras de la ciudad donde la concentración de ozono es mayor.

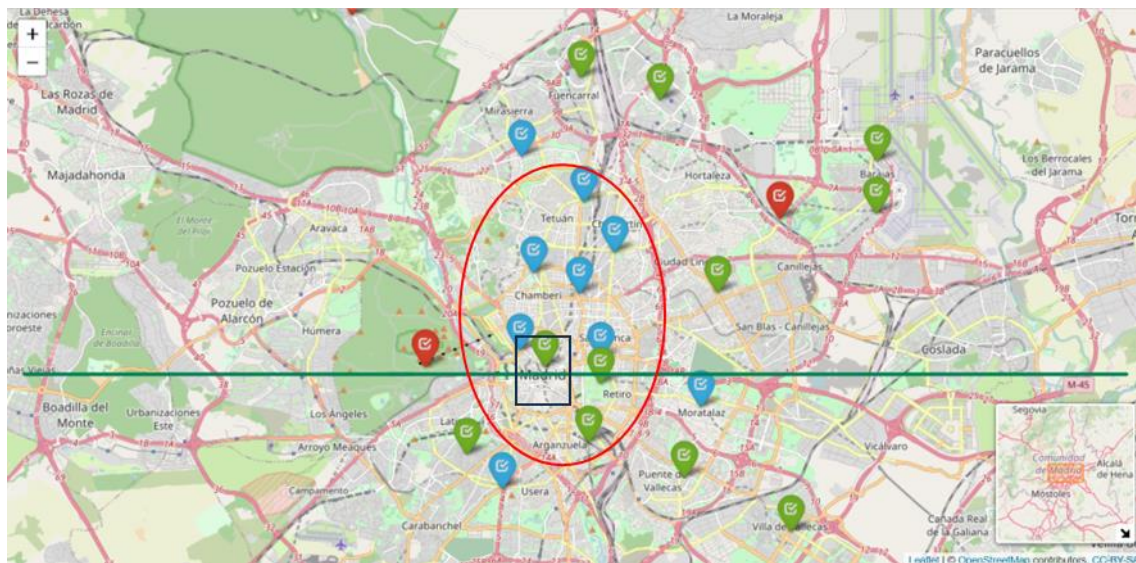
Cada una de estas estaciones recoge información de varios gases a la vez pero no de todos al mismo tiempo. A la hora de hacer el análisis de medición de gases, no hay que olvidar que el 1 de enero del 2021 se dejaron de utilizar como medidores de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire los siguientes dispositivos (Ayuntamiento de Madrid, 2023b):

- Tres analizadores de hidrocarburos (HC), por lo que a partir de esa fecha dejará de haber registros de la concentración de los contaminantes metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarburos no metánicos (NMHC) e hidrocarburos totales (THC).
- Cinco analizadores de CO, aquellos ubicados en las estaciones de Arturo Soria (E16), Casa de Campo (E24), Moratalaz (E36), Barrio del Pilar (E39) y Sanchinarro (E57).
- Cuatro analizadores de SO<sub>2</sub> de la red de calidad del aire. Por tanto, al igual que en el caso de los hidrocarburos, a partir de esa fecha no dispondremos de registros de SO<sub>2</sub>.

Para mostrar cómo se realiza el análisis de la medición de gases en su conjunto, vamos a comenzar con el desarrollo de un mapa interactivo que permita visualizar cuántas estaciones hay y dónde están ubicadas. Con ello queremos determinar el número y la distribución de las estaciones fijas de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid. En el *data set* se reflejan no solo las coordenadas geográficas y altitud de las estaciones, sino también el nombre de las calles en que se encuentran y el código postal de cada una. El resto de los datos han sido eliminados para realizar el análisis ya que no aportan información relativa al caso que nos ocupa. Todas las

estaciones que a continuación aparecen representadas miden la concentración de los gases contaminantes antes mencionados en tiempo real y se han agrupado de tal manera que podamos obtener registros mensuales de los mismos para facilitar el análisis del *dataset*.

Cabe destacar que no consideraremos la altitud como un factor relevante a la hora de medir los niveles de contaminación ya que la desviación típica es de más / menos 38 metros sobre la media. Por tanto, su impacto es apenas relevante (Ayuntamiento de Madrid, 2023d). Se ha generado el siguiente mapa interactivo con el Código 1 del Anexo:



Lo primero que llama la atención al estudiar la ubicación de los centros medidores de calidad del aire es que la mayor parte de ellos están situados en la zona norte de Madrid -en la siguiente imagen no aparece la estación de Villaverde en el sur, y la del El Pardo en el norte-. La línea verde marca la separación entre el norte y el sur de Madrid a partir del KM 0. Lo siguiente que podemos observar es que la densidad de estaciones también es mucho mayor en la zona este que en la oeste. Exceptuando estas pequeñas diferencias, causadas por la densidad del tráfico en los mencionados lugares, podría afirmarse que las estaciones de medición están equitativamente distribuidas por la ciudad.

Como observamos en el mapa, solo aparecen tres estaciones suburbanas -en color rojo-, las cuales, principalmente, se encargan de medir los niveles de ozono en el aire. Tiene sentido que así sea ya que en las afueras de las ciudades la concentración de ozono es mucho mayor debido a la interacción de contaminantes de tipo antropogénico (fábricas, transporte de mercancías...) y a las condiciones atmosféricas de estas áreas, que son totalmente distintas a las del centro de la ciudad.

Según varios estudios realizados (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023; European Union, 2023; Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023; WHO, 2001) hay una serie de motivos que explican la variación en estos niveles:

- Las áreas urbanas suelen verse afectadas por altas emisiones de contaminantes atmosféricos, como óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV), provenientes del tráfico vehicular, las industrias y otras fuentes de combustión como las calefacciones de las casas. Estos contaminantes actúan como precursores del ozono y reaccionan en presencia de la luz solar para formar ozono troposférico.
- En las afueras de las ciudades hay menos obstáculos como edificios y estructuras que impidan la normal circulación de la luz y así mismo bloqueen la radiación solar. Esto significa que la exposición a la radiación solar directa es mucho mayor, factor clave para la formación de ozono. La luz solar activa las reacciones químicas que convierten los precursores del ozono en ozono mismo.

En azul podemos observar las estaciones de tráfico urbano. Situadas en el mismo centro de la ciudad y muy cerca unas de otras, esta concentración se debe a que es el lugar donde más gente vive y más personas se ven afectadas por el humo de la circulación. La mayoría de las estaciones de tráfico urbano están equipadas con medidores para casi todos los gases mencionados anteriormente.

En último lugar mencionar las urbanas de fondo, de color verde, que se encuentran rodeando la ciudad de Madrid en las principales arterias de tráfico que la circunvalan. Están especializadas en la medición de: partículas por tamaño, Ozono y NO<sub>2</sub>.

El rectángulo negro ubica la almendra de Madrid donde se han implementado las restricciones de movilidad de Madrid Central. El óvalo rojo contiene todas las estaciones de dentro de la M-30. Madrid 360 afectará a toda el área interior de la M-30, por lo que hemos considerado estos dos anillos como las referencias de análisis. Queremos comparar la evolución de la calidad del aire en Madrid Centro, Madrid Ciudad y el resto de Madrid. Esta misma división en anillos será la que se realice para estudiar la evolución del tráfico.

Tratamiento de los datos:

Cada registro del fichero de datos incluye el código de la estación, la provincia, el municipio, el número de la estación, el gas que mide, la técnica de muestreo y la concentración total del gas medido (Ayuntamiento de Madrid, 2023b).

Las mediciones vienen presentadas por el total diario. Hay datos que están validados y datos que no, lo que nos indica que esas mediciones son, probablemente, incorrectas.

Para la limpieza de los datos, en primer lugar, se han eliminado todos aquellos registros que no están verificados. Una vez hecho esto, se han eliminado aquellas columnas que nos indicaban si un registro estaba validado o no. A continuación, y para favorecer su representación, se han sustituido los “.” por “,” para que su lectura sea correcta y no haya errores entre el sistema europeo y el estadounidense. Por último, se ha indicado el último día de cada mes como fecha a la que se asociada la media de concentración. También se ha unificado la unidad de medida de cada gas quedando todos ellos representados en microgramos por metro cúbico y, por último, se ha calculado la media mensual de la concentración de cada gas por día del mes, sin contabilizar por supuesto aquellos días en que la medición no estaba validada. El objetivo no es otro que el cálculo de la media mensual de microgramos por metro cúbico de aire que contiene partículas contaminantes. Este total será el que utilizaremos como baremo de medida para determinar qué factores inciden más en la contaminación de Madrid.

Para localizar qué estaciones se encuentran dentro de cada anillo -dentro de Madrid Central, dentro de la M-30 y fuera de Madrid Central y fuera de la M-30- se han utilizado las coordenadas geográficas de cada una y se han cruzado con los límites geográficos de cada zona.

Esta operación se ha repetido para cada fichero que contiene información anual de los registros de contaminación. Los datos del 2018 servirán como base para realizar la comparativa; será el “antes”, la situación previa a la entrada en vigor de las restricciones. Esto es así ya que fue en diciembre de ese mismo año cuando oficialmente entro en vigor el calendario de restricciones que, dicho sea de paso, no han dejado de aumentar año tras año, según las Restricciones de Madrid. La limpieza y agrupación de datos se ha realizado en Excel. La agrupación de los datos ha generado un *dataset* con 9314 registros (véase Anexo 1 para comprender mejor su estructura). La columna PUNTO\_MUESTREO



contiene información sobre la estación de medida, las columnas MES y AÑO equivalen al mes y año en que se tomó la medida, la columna FECHA contiene el último día del mes en que se ha realizado la medida, de manera que muestra que la variable MAGNITUD muestra el agregado, MAGNITUD es el tipo de gas que se está midiendo, TOTAL es la concentración total mensual, MEDIA\_DIARIA es la media de ese mes calculada sobre el número de registros del mes, no de días, y ESTANDARIZAR\_MEDIDAS contiene las medidas de la media diaria en la misma unidad de medida: microgramos por metro cúbico de aire.

La siguiente tabla indica todos los gases contenidos en el fichero, así como el número que los representa y la unidad de medida en que aparecen:

| Nombre                              | Número | Ud Medida         |
|-------------------------------------|--------|-------------------|
| Dióxido de Azufre                   | 1      | µg/m <sup>3</sup> |
| Dióxido de Nitrógeno                | 8      | µg/m <sup>3</sup> |
| Monóxido de Nitrógeno               | 7      | µg/m <sup>3</sup> |
| Partículas < 2.5 µm                 | 9      | µg/m <sup>3</sup> |
| Partículas < 10 µm                  | 10     | µg/m <sup>3</sup> |
| Óxidos de Nitrógeno                 | 12     | µg/m <sup>3</sup> |
| Ozono                               | 14     | µg/m <sup>3</sup> |
| Tolueno                             | 20     | µg/m <sup>3</sup> |
| Benceno                             | 30     | µg/m <sup>3</sup> |
| Etilbenceno                         | 35     | µg/m <sup>3</sup> |
| Metaxileno                          | 37     | µg/m <sup>3</sup> |
| Paraxileno                          | 38     | µg/m <sup>3</sup> |
| Ortoxileno                          | 39     | µg/m <sup>3</sup> |
| Monóxido de Carbono                 | 6      | mg/m <sup>3</sup> |
| Hidrocarburos totales (hexano)      | 42     | mg/m <sup>3</sup> |
| Metano                              | 43     | mg/m <sup>3</sup> |
| Hidrocarburos no metánicos (hexano) | 44     | mg/m <sup>3</sup> |

Evolución:

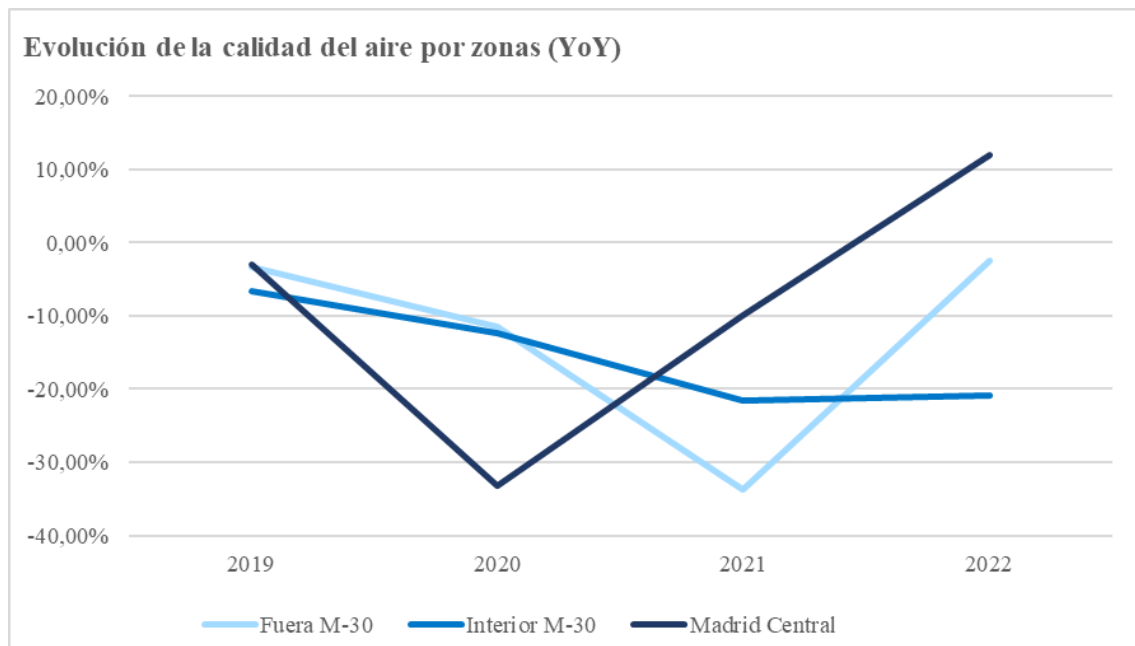
Para poder demostrar que la calidad del aire está mejorando en la ciudad de Madrid, lo primero que tenemos que hacer es probar de forma fehaciente que esta mejora no es casual y aleatoria, sino relevante estadísticamente hablando. Con el objetivo de poder afirmarlo, se ha desarrollado un modelo de regresión lineal (véase Código 2). Este modelo considera la variable fecha como variable independiente y la variable media de concentración de gas como dependiente. El modelo busca predecir los valores de la variable dependiente en función de los de la variable independiente. En este caso, la variable independiente es la fecha y su evolución es lineal, por lo que encajarían dentro del modelo propuesto.

Tanto el intercepto como el coeficiente de la variable independiente fecha son estadísticamente significativos, esto es, poseen un sentido estadístico; el resultado que

arrojan no es aleatorio ya que los valores p asociados a ambos coeficientes son muy pequeños ( $p$  - valor  $< 0.05$ ). En este caso, menor que  $2 \cdot 2^{-16}$ .

El coeficiente nos indica el impacto que tiene la variable independiente en la dependiente. En nuestro caso, este impacto es muy pequeño ya que su coeficiente es de  $-6 \cdot 146 \cdot 10^{-7}$ . Y ha de interpretarse de la siguiente manera: cada mes que pasa, la media diaria de concentración de gases contaminantes por metro cúbico de aire disminuye en  $-6 \cdot 146 \cdot 10^{-7}$  (véase Resultado 1). A pesar de que el coeficiente es muy pequeño, es un primer indicio muy positivo que nos indica que, efectivamente, el aire de Madrid es cada mes algo más limpio.

Sería interesante estudiar a esta misma evolución por zonas y no de manera global ya que nos permitiría comprobar con fiabilidad los efectos que han tenido en la calidad del aire las restricciones de Madrid 360. A la hora de realizar este análisis no se tendrán en cuenta los datos ni del 2023 ni de aquellos medidores que se dieron de baja el 1 de enero del 2021.



| Año   | Fuera M-30 | Interior M-30 | Madrid Central |
|-------|------------|---------------|----------------|
| 2019  | -3,23%     | -6,54%        | -2,95%         |
| 2020  | -11,54%    | -12,39%       | -33,21%        |
| 2021  | -33,73%    | -21,65%       | -10,00%        |
| 2022  | -2,51%     | -20,85%       | 11,96%         |
| Total | -44,70%    | -49,23%       | -34,69%        |

Lo que más llama la atención de este gráfico es que no es Madrid Central el anillo donde más ha mejorado la calidad del aire. Si bien es cierto que la disminución con respecto al año base de la comparativa -el 2018- indica que ha disminuido en más de 1 / 3, la proporción de aire contaminante es la mayor de todas ya que en el interior de la M-30 esa reducción es de casi la mitad. Ni siquiera en el año 2019, primer año natural en que estuvo en vigor la medida, fue el área de Madrid con menor disminución de partículas contaminantes por metro cúbico de aire. Vemos como el año del COVID fue el que más cayó, pero de nuevo en el 2021 fue el que menos cayó de los 3 y en el 2022 fue de hecho el único en el que los niveles de contaminación crecieron.

En términos generales, podríamos afirmar que la calidad del aire de Madrid evidentemente ha mejorado, pero ... ¿por qué?, ¿a qué se debe?, ¿se podría afirmar que es consecuencia directa de la disminución del tráfico?

Evolución del tráfico:

Como hemos podido constatar en el apartado anterior, el aire de la ciudad de Madrid ciertamente se está renovando y limpiando paulatinamente. Las medidas de Madrid 360 que más controversia han causado tienen que ver con las restricciones del tráfico como hemos visto al inicio de este trabajo. Este apartado tiene como objetivo analizar si existe una correlación entre la mejora de la calidad del aire y la disminución de los aforos de tráfico de Madrid.

Tratamiento de los datos:

Tan solo disponemos de datos desde el año 2018, por lo que será el que se tome como referencia para hacer la comparativa. No se mostrará un mapa con las cámaras de medición de la ciudad porque al haber tantas y en tantos puntos, el mapa resultante aparecería completamente distorsionado y solo se verían puntos superpuestos, lo que no aportaría información digna de tomar en consideración.

Cada *data set* contiene los datos de los aforos de tráfico de la ciudad de Madrid medidos por las estaciones permanentes -esto es, aquellas cuya ubicación no varía-. Estos ficheros

están divididos por años. Antes de proceder con el análisis de los datos, se han descargado todos los *data sets* que van del año 2018 al 2023 y se ha procedido a limpiar cada uno de ellos.

Las extracciones originales de las tablas contienen información relativa a la fecha en que se realiza una medición, la estación de aforo del tráfico que realiza dicha medición, el sentido del tráfico -es decir, si sube o baja la calle y si las horas son de horario de mañana o de tarde-, y la medición del aforo total por cada hora. El aforo hace referencia al número total de vehículos que circulan. Se ha considerado esta medida como válida ya que las motos también tienen restricciones de movilidad, lo que no se va a sustituir es un coche por un autobús, y aunque aumente la frecuencia de todas las líneas, cien autobuses más al día no suponen un gran cambio en términos de aforos diarios de varios millares, ni tampoco se va a optar por utilizar taxis o VTCs como sustitutos del coche en los traslados diarios ya que no es real considerar que la amplia mayoría de conductores vaya a utilizarlos como sustitutos.

El primer paso en la preparación de los datos ha sido identificar dentro de qué anillo -Fuera de la M-30, Interior de la M-30 y fuera de la almendra central y dentro de Madrid central- se encontraba cada estación de medida. Al disponer de las coordenadas de ubicación geográfica de cada una, se ha delimitado un cuadrado con las fronteras norte, sur, este y oeste que delimitan cada uno de estos anillos. Posteriormente, se ha analizado qué estación hay dentro de cada uno de ellos. El siguiente paso ha sido obtener el aforo total por cada estación y día. Para ello se han sumado las mediciones hora a hora. Los datos obtenidos tras la preparación son los siguientes -se muestran las primeras filas de la cerca de medio millón de registros que hemos obtenido finalmente-:

| FDIA       | FEST | ESTACION | INTERIOR_MC | INTERIOR_M30 | FUERA_M30 | ZONA             | FSEN | HOR1 | HOR2 | HOR3 | HOR4 | HOR5 | HOR6 | HOR7 | HOR8 | HOR9 | HOR10 | HOR11 | HOR12 | TOT HOR |
|------------|------|----------|-------------|--------------|-----------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|---------|
| 01/01/2018 | ES01 |          | 1           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1-   | 1537 | 1275 | 650  | 512  | 422  | 486  | 372  | 228  | 200  | 208   | 408   | 1091  | 7389    |
| 01/01/2018 | ES01 |          | 1           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1=   | 1657 | 1080 | 540  | 609  | 966  | 1117 | 1246 | 1323 | 1112 | 852   | 617   | 346   | 11465   |
| 01/01/2018 | ES01 |          | 1           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2-   | 1182 | 1071 | 472  | 320  | 335  | 413  | 342  | 206  | 183  | 238   | 395   | 514   | 5671    |
| 01/01/2018 | ES01 |          | 1           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2=   | 689  | 693  | 495  | 583  | 815  | 1089 | 1176 | 1018 | 707  | 499   | 393   | 237   | 8394    |
| 01/01/2018 | ES02 |          | 2           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 1-   | 777  | 787  | 520  | 402  | 279  | 317  | 312  | 191  | 198  | 207   | 243   | 368   | 4601    |
| 01/01/2018 | ES02 |          | 2           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 1=   | 474  | 476  | 387  | 491  | 639  | 694  | 705  | 640  | 527  | 451   | 345   | 223   | 6052    |
| 01/01/2018 | ES02 |          | 2           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 2-   | 864  | 827  | 604  | 405  | 348  | 421  | 349  | 228  | 201  | 277   | 371   | 507   | 5402    |
| 01/01/2018 | ES02 |          | 2           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 2=   | 728  | 726  | 480  | 557  | 817  | 851  | 946  | 885  | 757  | 632   | 446   | 246   | 8071    |
| 01/01/2018 | ES03 |          | 3           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1-   | 2033 | 1092 | 559  | 361  | 294  | 332  | 488  | 298  | 305  | 358   | 496   | 744   | 7360    |
| 01/01/2018 | ES03 |          | 3           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1=   | 1204 | 1300 | 577  | 678  | 1016 | 1298 | 1286 | 1084 | 959  | 610   | 335   | 196   | 10543   |
| 01/01/2018 | ES03 |          | 3           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2-   | 1153 | 808  | 366  | 261  | 222  | 264  | 301  | 215  | 177  | 175   | 250   | 473   | 4665    |
| 01/01/2018 | ES03 |          | 3           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2=   | 695  | 854  | 453  | 382  | 646  | 760  | 967  | 870  | 693  | 463   | 275   | 148   | 7206    |
| 01/01/2018 | ES04 |          | 4           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1-   | 1081 | 771  | 307  | 174  | 160  | 193  | 179  | 130  | 106  | 125   | 246   | 374   | 3846    |
| 01/01/2018 | ES04 |          | 4           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 1=   | 736  | 899  | 344  | 360  | 586  | 807  | 895  | 784  | 574  | 425   | 241   | 133   | 6784    |
| 01/01/2018 | ES04 |          | 4           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2-   | 794  | 568  | 199  | 146  | 107  | 148  | 171  | 97   | 94   | 115   | 172   | 326   | 2937    |
| 01/01/2018 | ES04 |          | 4           | 0            | 1         | 0 Interior M-30  | 2=   | 481  | 566  | 217  | 265  | 401  | 555  | 491  | 463  | 396  | 208   | 158   | 102   | 4303    |
| 01/01/2018 | ES05 |          | 5           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 1-   | 2030 | 1751 | 1199 | 959  | 1110 | 952  | 847  | 553  | 430  | 475   | 691   | 987   | 11984   |
| 01/01/2018 | ES05 |          | 5           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 1=   | 1288 | 1332 | 1091 | 1191 | 1483 | 1828 | 2021 | 1966 | 1591 | 1225  | 1001  | 724   | 16741   |
| 01/01/2018 | ES05 |          | 5           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 2-   | 1470 | 961  | 465  | 295  | 224  | 401  | 318  | 232  | 259  | 334   | 434   | 591   | 5984    |
| 01/01/2018 | ES05 |          | 5           | 1            | 0         | 0 Madrid Central | 2=   | 937  | 1080 | 658  | 712  | 1035 | 1513 | 1443 | 1344 | 943  | 624   | 356   | 206   | 10851   |
| 01/01/2018 | ES06 |          | 6           | 0            | 0         | 1 Fuera M-30     | 1-   | 647  | 398  | 191  | 112  | 120  | 123  | 130  | 77   | 80   | 95    | 170   | 247   | 2390    |
| 01/01/2018 | ES06 |          | 6           | 0            | 0         | 1 Fuera M-30     | 1=   | 413  | 455  | 212  | 228  | 323  | 428  | 470  | 406  | 324  | 233   | 149   | 92    | 3733    |
| 01/01/2018 | ES06 |          | 6           | 0            | 0         | 1 Fuera M-30     | 2-   | 658  | 458  | 190  | 147  | 124  | 129  | 122  | 111  | 88   | 108   | 170   | 258   | 2563    |
| 01/01/2018 | ES06 |          | 6           | 0            | 0         | 1 Fuera M-30     | 2=   | 417  | 468  | 201  | 243  | 349  | 430  | 591  | 436  | 309  | 191   | 138   | 90    | 3863    |

El cruce por estaciones ha quedado de la siguiente manera -se muestra una pequeña parte de las 60 estaciones de la ciudad de Madrid-:

| Estacion | Num_Estacion | Nombre                            | Latitud           | Longitud          | Sentido | Orientacion | Interior_MC | Interior_M30 | Fuera_M30 |
|----------|--------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|---------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| 1        | 1            | Paseo de la Castellana            | 40,43192725889580 | -3,68910874956933 | 1       | S-N         | 0           | 1            | 0         |
| 1        | 1            | Paseo de la Castellana            | 40,43192725889580 | -3,68910874956933 | 2       | N-S         | 0           | 1            | 0         |
| 2        | 2            | Calle Princesa                    | 40,42606790647320 | -3,71270896289063 | 1       | N-S         | 1           | 0            | 0         |
| 2        | 2            | Calle Princesa                    | 40,42606790647320 | -3,71270896289063 | 2       | S-N         | 1           | 0            | 0         |
| 3        | 3            | Calle Doctor Esquerdo             | 40,41757639594440 | -3,66926245767642 | 1       | S-N         | 0           | 1            | 0         |
| 3        | 3            | Calle Doctor Esquerdo             | 40,41757639594440 | -3,66926245767642 | 2       | N-S         | 0           | 1            | 0         |
| 4        | 4            | Paseo de San Francisco de Sales   | 40,44037200525100 | -3,71622659871628 | 1       | O-E         | 0           | 1            | 0         |
| 4        | 4            | Paseo de San Francisco de Sales   | 40,44037200525100 | -3,71622659871628 | 2       | E-O         | 0           | 1            | 0         |
| 5        | 5            | Paseo de Santa Maria de la Cabeza | 40,40656882272390 | -3,69464350381843 | 1       | N-S         | 1           | 0            | 0         |
| 5        | 5            | Paseo de Santa Maria de la Cabeza | 40,40656882272390 | -3,69464350381843 | 2       | S-N         | 1           | 0            | 0         |
| 6        | 6            | Calle Arturo Soria                | 40,45263324863270 | -3,65358647803295 | 1       | S-N         | 0           | 0            | 1         |
| 6        | 6            | Calle Arturo Soria                | 40,45263324863270 | -3,65358647803295 | 2       | N-S         | 0           | 0            | 1         |
| 7        | 7            | Avenida de Portugal               | 40,41167287309070 | -3,73699778904199 | 1       | O-E         | 0           | 1            | 0         |
| 7        | 7            | Avenida de Portugal               | 40,41167287309070 | -3,73699778904199 | 2       | E-O         | 0           | 1            | 0         |
| 8        | 8            | Calle Gran Vía                    | 40,42040933857440 | -3,70329480676606 | 1       | E-O         | 1           | 0            | 0         |
| 8        | 8            | Calle Gran Vía                    | 40,42040933857440 | -3,70329480676606 | 2       | O-E         | 1           | 0            | 0         |
| 9        | 9            | Calle Atocha                      | 40,41386529264490 | -3,70188209550832 | 1       | E-O         | 1           | 0            | 0         |
| 9        | 9            | Calle Atocha                      | 40,41386529264490 | -3,70188209550832 | 2       | O-E         | 1           | 0            | 0         |
| 10       | 10           | Avenida de Castilla               | 40,38587020711480 | -3,73461707734011 | 1       | O-E         | 0           | 0            | 1         |

## Evolución:

Para poder afirmar que el tráfico de Madrid ha disminuido y no se debe a un factor aleatorio, vamos a plantear un modelo de regresión lineal (véase Código 3). En este modelo, la variable independiente será la fecha y la dependiente los aforos de tráfico. Para el caso anterior, realizamos los cálculos con la medida diaria de contaminación. No obstante, para estudiar la variación del tráfico de manera aislada vamos a visualizar los datos por su agregado mes a mes. El cruce posterior con los datos de contaminación sí se hará en base a la media diaria de ambos.

Los resultados del modelo (véase Resultado 2) arrojan una importante relevancia estadística, por lo que podemos afirmar que la disminución del tráfico no es un hecho aleatorio, sino que está estrechamente relacionada con el paso del tiempo. Esto lo observamos ya que el  $p$  – valor es muy pequeño ( $2 \cdot 10^{-16}$ ). Su coeficiente nos indica que por cada día que pasa, los aforos de tráfico disminuyen en  $1 \cdot 195 \cdot 10^{-5}$ .

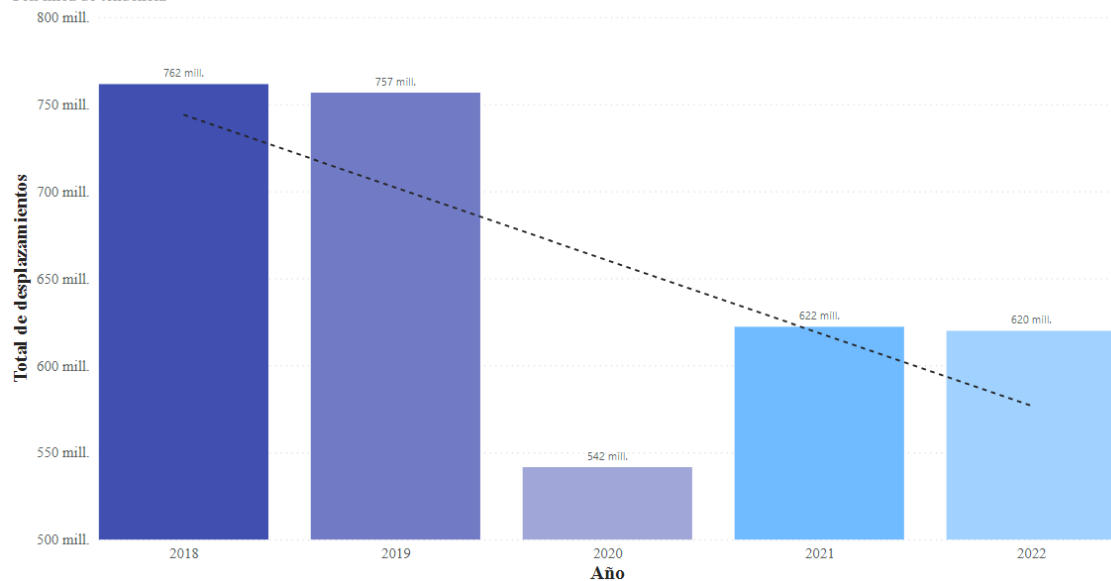
Una vez podemos afirmar que no se trata de un hecho aleatorio, es momento de ahondar en sus causas. La siguiente es una visión global del número de desplazamientos medidos por todas las estaciones de tráfico de la ciudad de Madrid.

Tomando como referencia el año 2018, último año en el que no hubo restricciones de ningún tipo y que, por tanto, nos proporciona una imagen bastante fiable de cuánto se desplazaba la gente de la capital, el número total de vehículos que han circulado por la capital desde el año 2018 ha iniciado una tendencia a la baja, lo que se ha traducido en una disminución desde entonces de un 18,61% (141.716.979 menos de desplazamientos en 4 años). Resulta especialmente llamativo comprobar como el año 2020 ha traído consigo un cambio de nivel en el número de desplazamientos. Entendiendo cambio de nivel en una serie temporal como un cambio en el valor promedio de una serie temporal

(Arroyo Barrigüete, 2021), es especialmente llamativo en las gráficas anuales. Vemos que hay una bajada muy sutil, a penas imperceptible, en el tráfico entre el año 2018 y 2019 pero a partir de la brusquedad con que la que disminuyó en el 2020, el total de desplazamientos no ha vuelto a recuperarse del todo. Aun así, la tendencia sigue a la baja puesto que en el año 2022 hubo menos desplazamientos que en el 2021 -aproximadamente 2'5 millones menos-. La línea de puntos representa la línea de tendencia.

#### Evolución del número total de desplazamientos en un año natural

Con línea de tendencia



Se ha intentado encontrar una explicación a la enorme disminución entre el año 2019 y 2021, ignorando la situación de excepcionalidad del 2020 (año del COVID-19). Para ello hemos analizado el calendario de implantación de las restricciones de Madrid Central.

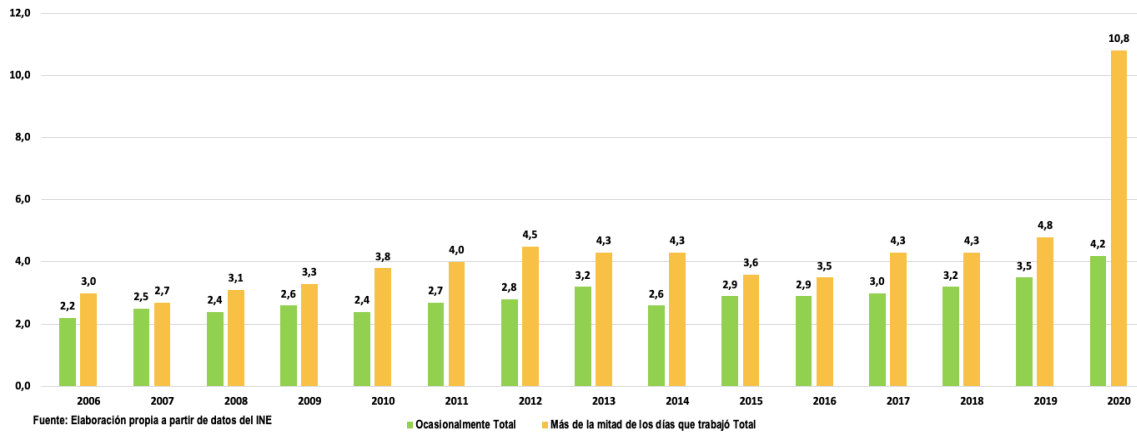
El día 30 de noviembre del 2018 entró en funcionamiento Madrid Central y a partir del 24 de abril del año siguiente pasó a ser obligatorio el uso de pegatinas de la DGT. El 30 de junio de ese mismo año caducaron los permisos adicionales de la APR. Ambos hechos afectaron a una parte del parque circulante de la Comunidad de Madrid, lo cual explicaría el descenso de desplazamientos de ese periodo.

El 1 de enero del 2019 comenzaron las restricciones de la Zona SER para vehículos sin pegatina - única medida que se tomó en ese año-. Un año más tarde, en 2020, entró en vigor la norma que prohibía estacionar a los vehículos sin pegatina dentro de la almendra central -salvo los de residentes-. Hasta 21 meses más tarde, el 13 de septiembre del 2021 no se implementó la siguiente restricción -que fue la de la activación de la fase de preaviso de Madrid 360- vigente hasta el 11 de diciembre de ese mismo año.

Podría dar la sensación de que ambas restricciones han tenido un impacto muy grande en la población, más aún del que cabría esperar a priori. La lógica dicta que tras una epidemia como la del COVID, que en aquel momento seguía causando estragos en la salud física y mental de la mayoría de la población, la gente tuviera aversión a usar el transporte público por miedo al contagio, lo que nos hace pensar que el número de desplazamientos habría aumentado aun por encima del nivel previo a la pandemia. Sin embargo, el COVID ha supuesto un cambio aún más relevante en nuestras vidas, modificando, y muchas veces trastocando, la manera en que nos relacionamos y trabajamos. Debido a esto, el teletrabajo ha aumentado enormemente, lo que conlleva que el número de transportes privados para ir y volver del puesto de trabajo haya disminuido considerablemente. De otro modo, el cambio de nivel en la serie temporal concerniente al número de desplazamientos se debe a la influencia del teletrabajo, como podremos ver con más detalle a continuación. Esto y no las restricciones de movilidad apuntan a haber sido la causa de la disminución.

Para presentar el análisis de la situación actual del teletrabajo en España se han utilizado datos del INE, Eurostat -Oficina Estadística de la Unión Europea- y del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital de los años 2006 –primer año en el que el INE comienza a recopilar información cuantitativa del trabajo en casa- al 2020, ambos inclusive. Este es un periodo de tiempo especialmente irregular habida cuenta que el mercado laboral español se vio sometido a los vaivenes de una coyuntura económica que pasó por etapas de crecimiento económico, una fuerte crisis o recesión y su consiguiente recuperación para enfrentarse de nuevo a una crisis sin precedentes que trastoca la vida del país a raíz de la COVID-19.

En el siguiente gráfico se nos presenta como varía el porcentaje de trabajadores que ocasionalmente trabajan desde sus casas frente a los que lo hacen habitualmente, es decir, más de la mitad de los días laborales. Observamos que esta modalidad de trabajo no deja de aumentar alcanzando su punto más alto en 2020 debido al confinamiento lo que permitió que la actividad laboral no se viera interrumpida durante el tiempo que estuvimos confinados (Hernández, Hernández, 2021).

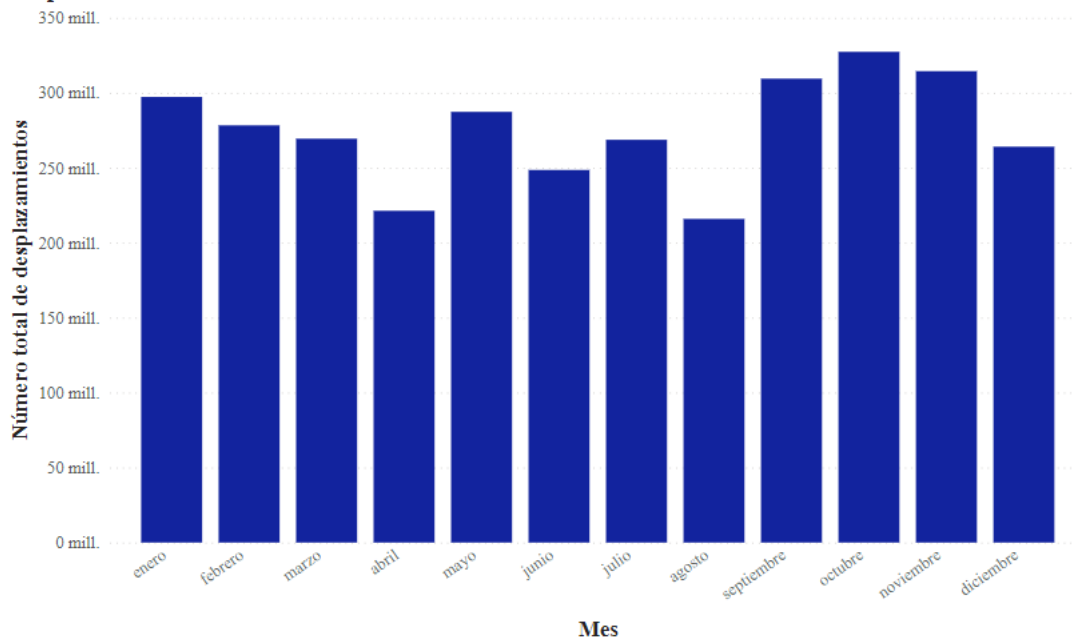


Esta evidencia nos permite concluir que el cambio de nivel en el número de desplazamientos se debe a este efecto. El calendario de restricciones no plantea una nueva limitación hasta el 1 de enero del 2022, fecha en la que entra en vigor la prohibición de acceso y circulación dentro de la M-30 a todos aquellos vehículos pertenecientes a no residentes y que carezcan de la pertinente etiqueta de la DGT, independientemente de la letra que tenga (Restricciones Madrid, 2023).

Esta gráfica año a año nos ofrece una primera imagen de cómo está evolucionando el patrón de comportamiento de los conductores de Madrid. No obstante, resulta también interesante comparar el cómo de esos desplazamientos dentro del año. Para tener una imagen global del número de desplazamientos en la ciudad de Madrid mes a mes vamos a ver el agregado de la cifra del número de desplazamientos totales. Hemos excluido los datos del 2023 del modelo para evitar que distorsionen la cifra de los cinco primeros meses del año.



### Desplazamientos totales Mes



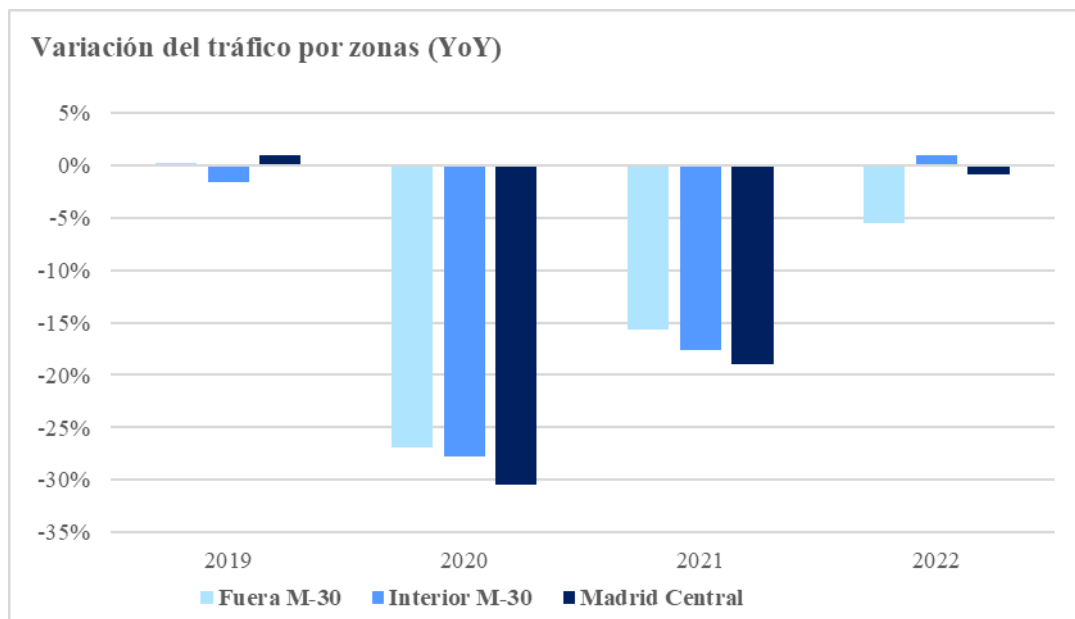
A partir de esta gráfica del histórico mensual podríamos deducir que cuanto mejor es el tiempo en la capital, menor es el número de desplazamientos que se realizan. Otras razones que pueden motivar estas cifras son los periodos vacacionales y el impacto del clima. En abril vemos que el número de desplazamientos disminuye por las vacaciones de Semana Santa. También se observa en los meses de marzo y mayo los desplazamientos aumentan, especialmente en el mes de mayo donde hay un repunte significativo. Esto se debe a que en mayo regresan las personas que han ido de vacaciones en abril y hay un gran movimiento de viajeros en la capital debido a los puentes. En agosto al haber menos gente residiendo en la capital el número desplazamientos es mucho menor. En julio y septiembre con sus respectivas operaciones de salida y retorno, el número de desplazamientos se incrementa de nuevo. A partir de final de verano con la vuelta a la actividad laboral y sobre todo con la llegada del invierno y la bajada de temperaturas, las personas optan de nuevo por la comodidad que supone tanto el transporte privado como el público para trasladarse de un lugar a otro. Esto nos hace pensar que, siguiendo la lógica de la ciudad de Madrid, en esos meses en que la congestión de tráfico es menor, también lo será la contaminación en el aire.

Es importante tener esta primera visión, sin embargo no nos da una imagen completa de cómo los patrones de circulación en la ciudad de Madrid están realmente evolucionando. Para mejorar este análisis, se ha dividido la ciudad en tres anillos: el primero de ellos, todo lo que comprende el interior la famosa almendra de Madrid central, el segundo todo

lo que se encuentra en el interior de la M-30 pero fuera de Madrid Central, y el tercero todo lo que se encuentra fuera de la M-30. Se ha optado por hacer esta división ya que, como hemos podido comprobar en el apartado anterior, el calendario de restricciones sigue este patrón: de dentro hacia fuera.

La hipótesis que nos planteamos es que al tener en cuenta ese patrón, cada anillo superior ha ido absorbiendo el número de desplazamientos perdidos del anillo inferior. Salvo para aquellas personas que vivan en los alrededores de la ciudad de Madrid -poblaciones como Majadahonda, Torrelorones o Pozuelo, por nombrar algunos- y que sigan considerando desplazarse en coche como la opción más rápida, lo más normal es que las personas que viven dentro de la ciudad hayan prescindido totalmente del coche y ya hayan comenzado a usar otras alternativas de transporte como el autobús, el metro, la bicicleta o el patinete eléctrico entre otros.

Para hacer este análisis, tras determinar las coordenadas geográficas que delimitan cada zona, se ha determinado qué estaciones de tráfico se ubican dentro de cada una. De cara a estudiar la evolución, se ha obtenido el total de desplazamientos dentro de cada anillo. La comparativa se ha hecho año a año salvo en el 2021. Para estudiar la evolución de ese año se ha cogido como referencia los datos del año 2019, ya que durante la epidemia de COVID en el año 2020 el número de desplazamientos cayó en picado y se desvirtúa la imagen global.



| <b>Año</b> | <b>Fuera M-30</b> | <b>Interior M-30</b> | <b>Madrid Central</b> |
|------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 2019       | 0,22%             | -1,63%               | 1,03%                 |
| 2020       | -26,90%           | -27,74%              | -30,47%               |
| 2021       | -15,72%           | -17,64%              | -18,94%               |
| 2022       | -5,46%            | 0,97%                | -0,83%                |
| Total      | -20,15%           | -18,19%              | -18,79%               |

Como podemos observar, el número de desplazamientos ha disminuido en todos los años y en todas las zonas a excepción del año 2019 fuera de la M-30 y dentro de Madrid Central y, en el último año, en el interior de la M-30. A priori, esto confirmaría nuestra hipótesis anterior que afirmaba que los anillos superiores absorben el tráfico de los inferiores al facilitar la posibilidad de usar esas zona para desplazarse bordeando las restricciones. Sin embargo, el total de disminución del tráfico es muy similar en las tres zonas por lo que verdaderamente podríamos afirmar que ha habido un cambio en la forma en que los madrileños se desplazan y los anillos superiores no han absorbido el tráfico de los inferiores.

Hasta el final de este año 2023, cuando se implanten restricciones de circulación más severas dentro de la M-30, no se podrá comprobar cómo variará la densidad de tráfico en este anillo y cuál será su margen de mejora. Lo que sí parecen indicar los datos es que en el corto plazo no se espera una gran variación en el tráfico en el interior de Madrid central, ya que actualmente las restricciones no se aplicarán a todo aquel que sea residente dentro de ella, ni a personas con vehículos no contaminantes y tampoco a los que aparquen en un parking dentro de la almendra.

#### Relación Contaminación – Tráfico:

Tras estudiar los aforos de tráfico y niveles de contaminación de la ciudad de Madrid, por separado, todo parece indicar que ambas están estrechamente relacionadas al haber disminuido las dos. Es hora de comprobar esta hipótesis. Para ello, vamos a estudiar la correlación entre las variables aforo de tráfico y nivel de contaminación.

## Hipótesis:

La hipótesis que pretendemos demostrar en esta parte del trabajo es que al disminuir el aforo del tráfico también disminuyen los niveles de contaminación. Con el fin de realizar este análisis vamos a hacer un *join* de los distintos *data sets* de contaminación y tráfico, dejando fuera la concentración de los gases de los cuales tan solo tenemos datos hasta el 1 de enero del 2021.

El análisis se ha realizado por anillos y se espera obtener unos resultados en línea con lo expuesto en el apartado de la contaminación. Es decir, que cuanto más alejado se esté del centro, menor será la relación que existe entre el aforo del tráfico y el nivel de contaminación. Esto quedaría respaldado porque cuanto más lejos se está de la almendra central, menor es el número de barreras arquitectónicas que encuentra el aire y por tanto mayor es su capacidad de limpiar partículas y gases contaminantes por sí mismo.

## Metodología:

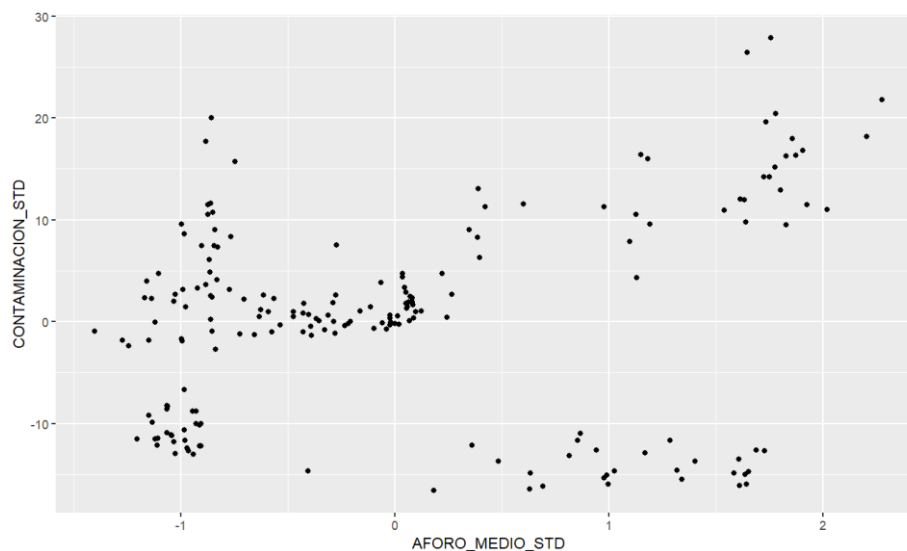
Habiendo limpiado y preparado por separado los *data sets* de tráfico y contaminación, es hora de ponerlos en común. Para ello, vamos a extraer de cada uno de ellos la media diaria mensual de sus respectivas variables, en base al año y la zona -nota: la media diaria de la cantidad de aire contaminado por metro cúbico de aire está transformada a microgramos, de manera que no distorsione las distintas unidades de medida de cada gas-. Una vez tengamos todos los datos puestos en común, es necesario estandarizar ambas variables para evitar distorsiones en los resultados del análisis de correlación. Cuando las variables están en diferentes unidades, la magnitud y dirección de la correlación puede verse afectada arrojando un resultado impreciso. En este caso, el número de desplazamientos no es equivalente ni está en la misma escala que la densidad de contaminación. Para estandarizar variables se ha restado a cada registro la media de la variable y se ha dividido el resultado obtenido por la desviación estándar total. Quedarán fuera de este análisis los datos de mayo del 2023 ya que solo tenemos registros para los niveles de contaminación.

Una vez tenemos los datos listos, vamos a realizar el análisis de correlación entre las dos variables en R Studio. Para ello, seguiremos los siguientes pasos:

- 1- Importaremos los datos directamente desde el fichero en Excel en que los hemos manipulado con la función `read_excel()`.
- 2- A continuación, generaremos un gráfico de dispersión para hacernos una primera imagen mental de la relación que existe entre los microgramos de aire dañino por metro cúbico de aire y la densidad del tráfico. Crearemos ese gráfico de dispersión utilizando la función `plot()` e introduciendo las dos variables como argumentos.
- 3- Posteriormente y para ser más rigurosos en el análisis, se calculará el coeficiente de correlación entre las dos variables. El cálculo se hará utilizando la función `cor()`, donde nuevamente se introducirán las dos variables -densidad de tráfico y contaminación- como argumentos. Con esta función obtendremos el coeficiente de correlación de Pearson.

El análisis se ha realizado en cuatro niveles: el primero de ellos con el agregado de todos los datos medidos por todas las estaciones, el segundo de ellos, midiendo la correlación existente dentro de la almendra central de Madrid, el tercero de ellos estudiando la correlación que existe entre la densidad de tráfico y la contaminación del aire en la zona interior de la M-30 -pero fuera de la almendra central-, y el último de ellos, estudiando la correlación que existe fuera de la M-30.

Para el primer análisis hemos obtenido los siguientes resultados (véase Código 4):



El gráfico mostrado en la parte superior está formado por dos ejes: en el X están los datos normalizados de los aforos medios diarios de tráfico de la ciudad de Madrid y en el eje Y los datos normalizados de los niveles medios diarios de contaminación. Los siguientes

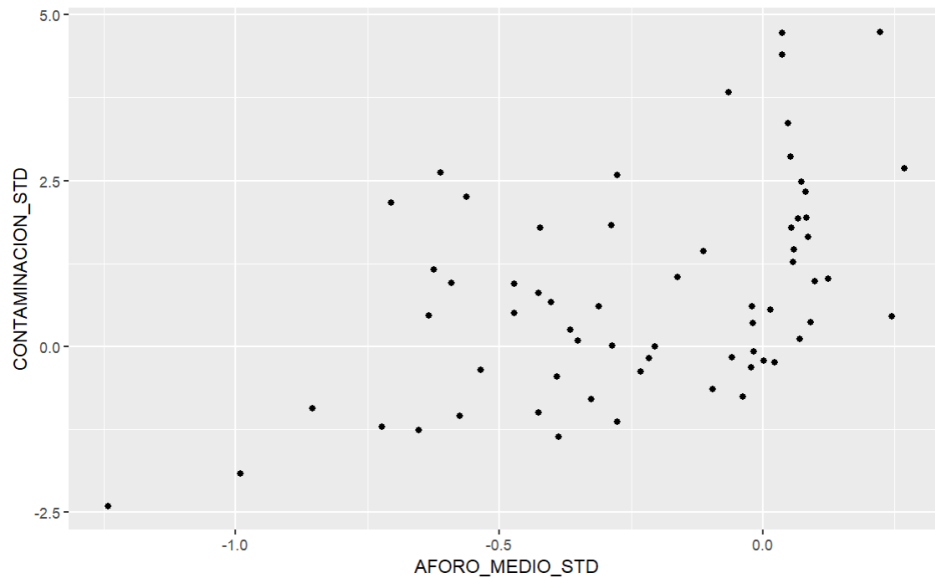
gráficos que mostremos seguirán esta misma estructura. En el que corresponde al primer análisis -todos los datos agregados y sin distinción de zona-, podemos observar cómo la mayor parte de los datos convergen hacia la izquierda. Esto quiero indicarnos que cuanto menor es el aforo, menores son los niveles de contaminación. No obstante, el gráfico no es del todo concluyente puesto que pese a lo que observamos, la dispersión parece muy grande.

A fin de ser más rigurosos y realizar un análisis de mayor calidad, hemos calculado el coeficiente de correlación entre ambas variables tal y como comentábamos en el punto tres de los anteriores. El resultado obtenido no es muy halagüeño, ya que el coeficiente de correlación de Pearson que nos indica el modelo es 0'227506. Al ser muy cercana a cero y positiva -que sea positiva nos indica que al aumentar una también lo hace la otra-, este número nos indica que la relación es muy débil entre las variables analizadas por el modelo. Dicho de otro modo, los cambios en una variable no se corresponden consistentemente con los cambios en la otra variable.

Para realizar el estudio por zonas hemos introducido un par de modificaciones en las líneas de código. El objetivo del cambio es obtener un *subset* para hacer la carga de datos filtrando por los distintos anillos, y no hacer el análisis sin diferenciar las zonas. Podemos observar estas modificaciones en el Código 5 del Anexo.

En el caso del código que se proporciona, el análisis se ha realizado para la zona de Madrid central. Para el resto de casos variará el *subset* que extraigamos, pero al emplear la misma metodología y no variar el resto del código, no se proporcionará el código para cada caso.

En este segundo análisis, obtenemos una correlación mucho más positiva de las variables como podemos observar a continuación:



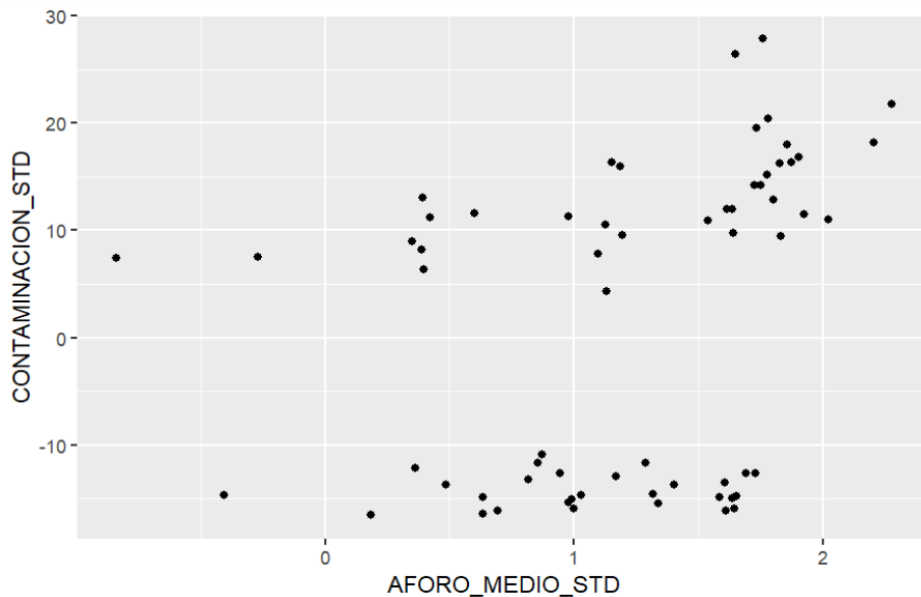
A simple vista vemos una correlación positiva mucho más fuerte que en el anterior caso, que nos permite intuir que cuanto menor es el aforo de tráfico menor es el nivel de contaminación. La correlación obtenida por el modelo es de 0'4837014. Esto significa que existe una correlación moderada y positiva entre las variables de tráfico y contaminación, lo cual nos indica que existe una tendencia dominante que de conforme aumenta el tráfico de la ciudad también lo hace la proporción de gases contaminantes en el aire (no obstante, pese a que para el Ayuntamiento de Madrid, que es quien aplica esta medida, existe una relación directa, estadísticamente hablando esta correlación no implica una relación de causalidad directa, por lo que habría que completar el análisis introduciendo otra variable como haremos más adelante).

Continuemos con el análisis de los resultados obtenidos en esta parte. Como se comenta en los apartados anteriores, la manera en que Madrid central está delimitada aglutina una zona de en la ciudad con una alta densidad de edificios y escasos espacios abiertos. Esta puede ser la explicación de por qué cuanto menor es el aforo de tráfico, menores son los niveles de contaminación: el viento tiene mayor dificultad para fluir y alejar los gases contaminantes que quedan estancados entre los edificios. Es por ello que los efectos de la disminución del tráfico se aprecian mucho más en esta zona.

El análisis de la zona interior de la M-30 ha arrojado unos resultados distintos a los del caso de Madrid central. Podemos observar en el siguiente gráfico que cuando la densidad de tráfico es muy alta, también lo es el nivel de contaminación. No obstante, en la parte inferior del *plot* vemos que esos puntos no siguen un patrón en concreto ya que el nivel

de contaminación es muy bajo independientemente del aforo de tráfico. De hecho, el coeficiente de correlación de Pearson para este caso es de 0'3173012.

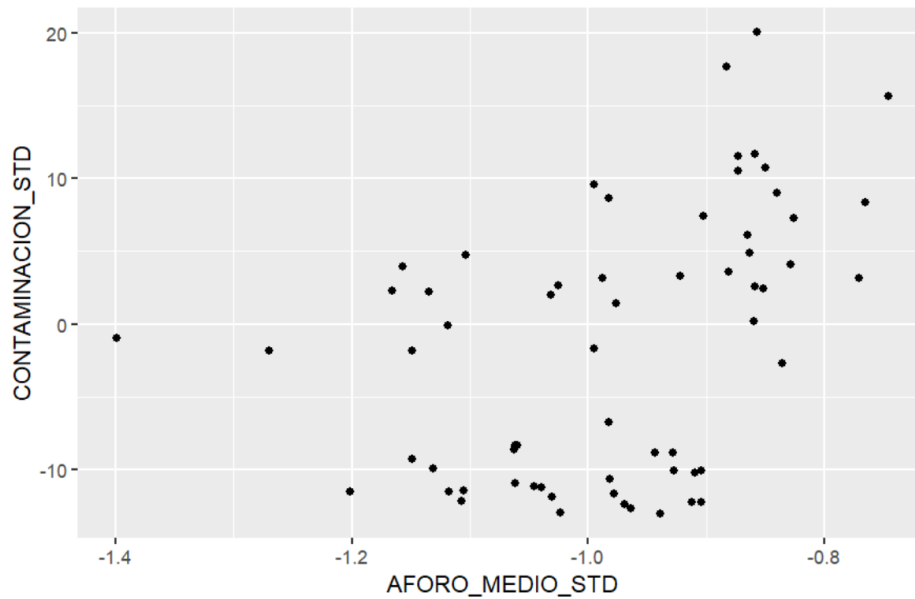
Una posible explicación para que esto sea así quizá se deba a que la densidad de edificios es mucho menor y el aire tiene más capacidad para fluir sin cortapisas, máxime al ser la M-30 un espacio mucho más abierto y con menos barreras arquitectónicas de cualquier tipo tal y como se planteaba como hipótesis al principio.



El análisis de la zona exterior de la M-30, a diferencia de los dos anteriores, no está alineado con las hipótesis que inicialmente se planteaban. En este caso la correlación ha aumentado en comparación con la que encontrábamos en el interior de la M-30. El coeficiente obtenido en este análisis es de 0'3996474, lo que vendría a significar que la incidencia del tráfico en los niveles de contaminación es mayor.

En el siguiente gráfico podemos ver cómo se repite un patrón muy similar al del caso anterior: hay una nube de puntos que parece converger hacia arriba y a la derecha y otra que aparece de forma horizontal en la parte inferior del gráfico. En ambas representaciones también se observan *outliers* en el margen inferior izquierdo. Una posible explicación de la existencia de estos *outliers* es que vengan precedidos por un mes de alta contaminación y que, pese a que el tráfico haya disminuido, aún queden partículas en suspensión sin limpiar en el aire. Sobre el papel se ha comprobado que estos *outliers* corresponden a los meses de marzo y abril del 2020 (en pleno COVID-19) lo que, sin lugar a dudas, explicaría que la densidad del tráfico sea tan baja.





Ceteris paribus el resto de las variables, y observando la evolución del coeficiente de correlación, podría ser lógico pensar que cuanto más abierto es el espacio, mayor es la incidencia del tráfico en los niveles de contaminación -suponiendo una relación de causa efecto entre ambos-. No obstante, la correlación es demasiado débil y no sigue un patrón que la confirme al 100%, por lo que es muy probable que haya otros factores que tengan más peso a la hora de influir en los niveles de contaminación.

Para ello, introduciremos un tercer factor en el análisis: la meteorología y todos los factores a ella aparejados y por consiguiente medidos: viento, lluvia, niebla, granizo... El objetivo es realizar un análisis de correlación múltiple para identificar posibles interacciones y / o efectos combinados entre variables.

VARIABLES METEOROLÓGICAS:

Como hemos visto en los apartados anteriores, la variación en el tráfico de Madrid no explica los cambios en el nivel de contaminación. Es lógico sospechar que un agente externo como es la meteorología pueda ser la pieza que nos falte para terminar de completar este puzzle. Vamos a analizar cómo los distintos parámetros relativos al tiempo influyen en los niveles de contaminación de la ciudad.

## Hipótesis:

La hipótesis que servirá como hoja de ruta hola a la hora de estudiar esta relación es que la lluvia y el viento juegan un papel clave a la hora de limpiar el aire contaminado. El viento porque aleja las partículas en suspensión y las distribuye, haciendo que disminuya la proporción de estas por metro cúbico de aire, y la lluvia porque las absorbe y cae con ellas al suelo. Prueba de ello es que tras un largo periodo sin precipitaciones, cuando hay una tormenta podemos observar que los vehículos que están aparcados en la calle quedan recubiertos de una fina capa de lo que aparentemente parece barro, pero en realidad es también contaminación.

El análisis se realizará componente a componente del *dataset* de meteorología. Ese será el procedimiento ya que todas las variables representan distintos conceptos (lluvia, niebla, viento...) que también se presentan en diferentes unidades de medida por lo que no sería posible obtener un resultado que tuviera sentido en sí mismo. Tomemos en cuenta la velocidad del viento, la temperatura, la humedad relativa, la presión barométrica y las precipitaciones como variables. Se cruzará la media diaria mensual de cada uno de ellos con la del tráfico y la de los niveles de contaminación.

## Metodología:

Para limpiar y preparar los datos, lo primero que se ha hecho ha sido eliminar del modelo todas aquellas mediciones que no estaban verificadas. A continuación, se ha hallado una media mensual de cada magnitud medida por cada estación de monitorización de meteorología. Una vez hemos terminado este proceso anualmente, hemos agrupado todos los años en un único data set. Una vez recopiladas las medias diarias de cada variable y por cada estación, se ha obtenido la medida para cada una de las variables meteorológicas en base a su respectivo anillo -Madrid Central, Interior de la M-30 exceptuando Madrid Central y Exterior de la M-30-. Una vez lo hemos obtenido, se ha estandarizado cada una de las variables meteorológicas por separado para obtener un resultado más preciso en el modelo. El procedimiento de estandarización ha sido el mismo que se ha seguido en el resto de los casos: restar a cada registro de cada variable su media y dividir cada uno de ellos por su desviación típica. Una vez obtenidos estos datos estandarizados, los hemos

puesto en común con los datos estandarizados de tráfico y contaminación que hemos hallado en el apartado anterior.

El código que se utilizará para esta parte será muy similar al que se ha empleado para realizar la regresión lineal que hemos visto anteriormente (véase Código 4). A la hora de interpretar los resultados, vamos a considerar un escenario ideal aquel en el que todos los  $p$ -valores muestren significancia estadística, con el fin de demostrar que ambas variables independientes tienen un efecto significativo sobre la variable dependiente.

Sin embargo, esto no siempre es así, pero pese a todo, se pueden extraer conclusiones de este tipo de variables. Que una variable independiente no sea estadísticamente significativa ya sabemos que significa que no se dispone de suficiente evidencia para demostrar que esa variable tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente en la muestra de datos analizada. En este caso, no se puede afirmar que haya una relación causal entre ambas variables.

No obstante, es importante tener presente que, en nuestro caso, no tiene por qué significar que no exista relación alguna entre ambas ya que las limitaciones a la hora de descargar los datos -tan solo podemos trabajar con mediciones diarias desde el 2019 hasta mayo del 2023- que hemos encontrado hacen que no se pueda afirmar que esto ocurra de este modo en la vida real.

Humedad:

El primer factor que hemos cruzado con la contaminación atmosférica y el aforo de tráfico ha sido la humedad relativa del ambiente. El primer análisis lo realizamos para todos los datos de la zona que está fuera de la M-30.

Como podemos observar en el Anexo Resultado 3, los valores de  $\Pr(>|t|)$  nos indican la significancia estadística de cada coeficiente. En este modelo, para el coeficiente de intersección, el valor  $p$  es de 0'0582, lo que significa que está cerca del nivel de significancia del 5%, pero no alcanza la significancia estadística convencional. Como podemos observar, este modelo nos indica que el coeficiente de intersección, el cual nos da el valor esperado de la variable dependiente, la contaminación, cuando todas las variables independientes son igual a cero, es de 17'741. No obstante, consideraremos este dato como válido al no haber alcanzado el nivel de significancia estadística mínimo.

Lo mismo sucede con el caso del coeficiente de humedad. El valor p del mismo es de 0'2773, lo cual indica que no es estadísticamente significativo, por lo que no podemos dar sus conclusiones como válidas.

Sin embargo, para el cociente del aforo medio si hay significancia estadística, al encontrarse por debajo de ese umbral del 5%. Su coeficiente es de 21'703, lo cual indica que un incremento de una unidad en el nivel del aforo está asociado, de media, con un incremento de 21'703 en la variable dependiente.

Tomaremos el valor del residual estándar -error, 8'272- para compararlo con el resto de los obtenidos con las otras variables. Este valor indica la dispersión promedio de los residuos alrededor de la línea de regresión y, cuanto menor sea, mejor se ajustará el modelo a los datos. Queremos evitar que este dato sea muy bajo para que no haya *overfitting* en el modelo, por lo que será lo que tendremos en cuenta a la hora de hacer la comparación. En caso de que se dispare, tendremos precaución a la hora de hacer el análisis.

El análisis de la zona interior de la M-30 nos arroja unos resultados poco fiables como podemos ver en el Resultado 4 del Anexo. En su valor p, no se alcanza la relevancia estadística. Por tanto, no vamos a considerar este análisis como válido.

Sin embargo, para la zona interior de Madrid central sí obtenemos un interesante resultado. Como podemos observar en el *output* del modelo que mostramos a continuación, sí alcanzamos la relevancia estadística en los tres coeficientes a la vez por lo que vamos a dar estos resultados por válidos.

A partir de las conclusiones del modelo (véase Resultado 5) podemos deducir que cuando el nivel de humedad relativa en el ambiente es alto, con un nivel de aforo constante, la variación en el nivel de humedad hace que aumente el nivel de contaminación. Probablemente esto se deba a que la humedad en el ambiente atrape y haga que las moléculas contaminantes pesen más dificultando que el aire se limpie, pero habría que comprobar esta hipótesis haciendo otros experimentos o ampliando el *dataset*.

La conclusión más fiable que extraemos del análisis de la variable humedad relativa es que no incide, junto al nivel de concentración de tráfico, en el nivel de contaminación de la ciudad.

## Precipitaciones:

Vamos a obviar la zona interior de Madrid central ya que no hay ningún medidor de humedad relativa en esta zona.

El objetivo del análisis de esta variable es demostrar que está estrechamente relacionada con los niveles de contaminación de la ciudad de Madrid. La hipótesis inicial espera que la relación sea alta. Al igual que en otros casos, no contamos con datos medidos en el interior de la almendra central. Por lo tanto, centraremos en análisis en la zona interior y exterior al anillo de la M-30.

Como podemos observar (Resultado 6), para la zona exterior de la M-30 tanto el valor del intercepto como del aforo medio alcanzan la relevancia estadística. Este modelo parece indicarnos que cuando se mantiene constante el nivel de precipitaciones, el aumento en el aforo del tráfico hace que aumenten los niveles de contaminación, no incidiendo la lluvia en los mismos. Este análisis daría por válidos los argumentos presentados por el ayuntamiento de Madrid de que el nivel de contaminación depende -casi- exclusivamente del tráfico.

Para la zona interior de la M-30 (Resultado 7) los resultados obtenidos nos indican que la relación entre precipitación y nivel de contaminación es aleatoria. En este caso tampoco daremos por válido el análisis.

## Presión barométrica:

Con esta variable se produce un fenómeno curioso, para la zona exterior del anillo de la M-30 observamos que no hay relevancia estadística (véase Resultado 8 en el Anexo). Por tanto, esto refuerza de nuevo el argumento del ayuntamiento de que el nivel de contaminación depende en su práctica totalidad del aforo de tráfico de la ciudad.

No obstante, para la zona interior del anillo sucede algo muy distinto: en este caso sí que existe una importante relevancia estadística -muy alta de hecho- para el caso de la presión, pero no la hay para el caso del aforo de tráfico (Resultado 9). Este modelo nos permitiría afirmar que la presión atmosférica sí que hace variar al nivel de contaminación aunque el la densidad del tráfico permanezca estable.

Para obtener una conclusión firme, el conjunto de datos tendría que ser mucho mayor, o se tendría que probar científicamente cuál de las dos hipótesis es la correcta.

Temperatura:

Tanto para el anillo exterior como para el interior de la M-30, los resultados del modelo nos indican una ausencia de relevancia estadística para todas las variables por lo que no podemos dar sus conclusiones por válidas. Sin embargo, cuando estudiamos los datos de la almendra central nos damos cuenta de que hay una fuerte correlación entre las tres variables, siendo además todas ellas estadísticamente significativas (Resultado 10).

Como se puede observar en el resultado, todo hace sospechar que la temperatura está estrechamente relacionada con los niveles de contaminación. Debido al coeficiente negativo de la temperatura, si no encontramos variaciones en el nivel de aforo, cuando la temperatura aumenta, el nivel de contaminación disminuye.

Pese a que estos últimos resultados resulten tan contundentes, se contradicen con los obtenidos en los anillos anteriores. Debido a la limitación de datos que comentábamos al principio, lo idóneo sería completar este análisis bien con un mayor *data set*, bien mediante experimentos.

Velocidad del viento:

Los resultados obtenidos con esta variable no nos permiten confirmar la hipótesis inicialmente planteada al no alcanzar un nivel de significancia lo suficientemente alto.

## Conclusiones:

Este trabajo tenía por objetivo demostrar que la densidad del tráfico es la mayor causa de los niveles de contaminación de las ciudades. Para demostrar esta afirmación, se ha tomado como ejemplo la ciudad de Madrid al ser la primera capital de España donde se delimitó una zona de bajas emisiones –Madrid Central- con las restricciones de circulación que ello conllevaba. El principal motivo que por sí solo justificaba la elección de este tema fue la enorme controversia que la creación de Madrid Central suscitó al entrar en vigor a finales de 2018 y, por supuesto, el estudio riguroso de la relación tráfico-salud y salud medioambiental.

Para el análisis de esta correlación se han empleado datos abiertos de la ciudad concernientes a los niveles de contaminación, tráfico y distintas variables meteorológicas. El estudio se ha hecho por anillos de la ciudad desde el mismo centro a la periferia; desde lo que se conoce como Madrid Central hasta el exterior de la M-30 acotando con claridad los tres anillos analizados: la almendra central, el interior de la M-30 exceptuando la almendra central y el exterior de la M-30.

La primera hipótesis planteada ha sido refutada. Como se detalla en el trabajo, el aforo del tráfico es importante pero no de manera especialmente contundente por lo que podríamos afirmar que Madrid 360 no es tan efectivo como se esperaba. Son otros los factores que sí impactan en la salud y la calidad del aire al subir los niveles de contaminación del entorno analizado; se llegó a esta conclusión al observar que la representatividad estadística del tráfico rodado no era lo suficientemente grande. Se plantearon entonces diferentes variables meteorológicas que por sí mismas sí podrían explicar las fluctuaciones en el nivel de contaminación si a estas se les sumaba el impacto del tráfico.

Analizados los datos de la presión atmosférica, las precipitaciones, la temperatura, la velocidad del viento y la humedad de la zona, los resultados arrojados tampoco han sido concluyentes e incluso, en algunos casos, han resultado contradictorios.

Una posible explicación a lo sucedido podría situarse en el tamaño de la muestra de los datos. Si bien es cierto que son datos oficiales y contrastados -pertenecen todos al Ayuntamiento de Madrid-, la muestra es pequeña ya que comenzaron a medirse al implementarse la zona de bajas emisiones hace unos años.

Este trabajo da pie a continuar estudiando el fenómeno de la contaminación y los factores que en ella influyen siendo recomendable, según el criterio del autor, cruzar los datos obtenidos con los niveles de contaminación y tráfico de otras ciudades, incorporar datos sobre las emisiones contaminantes de las industrias cercanas a la ciudad y, por supuesto, transporte aéreo. A mayores, quizá incluso, otras variables meteorológicas de las que a día de hoy no hay suficientes datos. De esta manera, se podría ampliar mucho más el *data set* y el campo de estudio lo que permitiría obtener unos resultados mucho más precisos, o al menos, más representativos y fieles a esta realidad tan preocupante.



## Bibliografía:

- Arroyo Barrigüete, J. L. (2021). Machine Learning II, Universidad Pontificia Comillas
- Ayuntamiento de Madrid (2023). Madrid 360. Recuperado el 16 de marzo del 2023 de <https://www.madrid360.es/>
- Ayuntamiento de Madrid (2023b). Intérprete de ficheros calidad del aire global. Recuperado el 30 de marzo del 2023 de [https://datos.madrid.es/FWProjects/egob/Catalogo/MedioAmbiente/Aire/Ficheros/Interprete\\_ficheros\\_%20calidad\\_%20del\\_%20aire\\_global.pdf](https://datos.madrid.es/FWProjects/egob/Catalogo/MedioAmbiente/Aire/Ficheros/Interprete_ficheros_%20calidad_%20del_%20aire_global.pdf)
- Ayuntamiento de Madrid (2023c). Calidad del aire. Datos diarios desde 2001. Recuperado el 30 de marzo del 2023 de <https://datos.madrid.es/sites/v/index.jsp?vgnextoid=aecb88a7e2b73410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD>
- Ayuntamiento de Madrid (2023d). Estaciones de control de calidad del aire. Recuperado el 30 de marzo del 2023 de <https://datos.madrid.es/sites/v/index.jsp?vgnextoid=9e42c176313eb410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD>
- Diario de Madrid (2022). Madrid Central – Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático. Recuperado el 20 de marzo del 2023 de <https://diario.madrid.es/aire/madrid-central/>
- EIONET (2023). ETC Human health and the environment (ETC HE). Recuperado el 4 de abril del 2023 de <http://www.eionet.europa.eu/gemet/theme/3>
- European Union (2023). EU air quality standards. Recuperado el 22 de marzo del 2023 de [https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en)
- Garnacho Frutos, J. (2018). La Revolución Industrial: ¿Por qué primero en Inglaterra? [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de Valladolid
- Hernández Negrín, L. M., Hernández Brito, L. (2021). El teletrabajo en España: análisis y evolución reciente [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de la Laguna

- McKinsey & Company (2023). McKinsey Center for Future Mobility. Recuperado el 1 de abril del 2023 de <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/overview>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023). Ozono. Recuperado el 21 de marzo del 2023 de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx>
- Noticias Ayuntamiento de Madrid (2023). Almeida anuncia que Madrid cumple por primera vez con la directiva europea de calidad del aire. Recuperado el 20 de marzo del 2023 de <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Actualidad/Noticias/Almeida-anuncia-que-Madrid-cumple-por-primera-vez-con-la-directiva-europea-de-calidad-del-aire/?vgnextfmt=default&vgnextoid=e74558e974075810VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=a12149fa40ec9410VgnVCM100000171f5a0aRCRD>
- Palmero Escudero, S. (2022). La Revolución Industrial en Inglaterra: orígenes, realizaciones y consecuencias [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de Valladolid.
- Restricciones Madrid (2023). Restricciones de acceso y circulación a la ciudad de Madrid. Recuperado el 16 de marzo del 2023 de <https://restricciones-madrid.es/>
- Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial del Ministerio para la Transición
- Ecológica y el Reto Demográfico (2023). Tendencias de la calidad del aire en España 2001-2021. Recuperado el 31 de marzo del 2023 de [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/analisisdetendenciasdelosprincipalescontaminantesatmosfericos\\_tcm30-561228.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/analisisdetendenciasdelosprincipalescontaminantesatmosfericos_tcm30-561228.pdf)
- WHO (2001). Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91

Anexo:

Código 1:

```
#####  
#----- AFOROS DE TRAFICO DE LA CIUDAD DE MADRID  
#install.packages(c("leaflet", "sp", "readxl"))  
library(sp)  
library(leaflet)  
library(readxl)  
Capa_de_estaciones <- read_excel("Modelo_Trafico.xlsx")  
df <- data.frame(longitude = Capa_de_estaciones$LONGITUD,  
                 latitude = Capa_de_estaciones$LATITUD,  
                 Ciudad = Capa_de_estaciones$DIRECCION,  
                 País = Capa_de_estaciones$ESTACION,  
                 group = cut(Capa_de_estaciones$COD_TIPO, breaks = c(1, 2, 3, Inf),  
                             labels = c("green", "blue", "orange")))  
  
coordinates(df) <- ~longitude+latitude  
content <- paste(sep = ", ",  
                Capa_de_estaciones$ESTACION,  
                Capa_de_estaciones$DIRECCION  
                )  
  
content_2 <- paste(sep = "<br/>",  
                  Capa_de_estaciones$ALTITUD  
                  )  
  
icon.glyphicon <- makeAwesomeIcon(icon = 'check', markerColor = df$group,  
                                  iconColor = 'lightgray', library = 'glyphicon')  
  
leaflet(df) %>% addTiles()%>%  
  addAwesomeMarkers(~Capa_de_estaciones$LONGITUD, ~Capa_de_estaciones$LATITUD,  
                    icon = icon.glyphicon, label = content, popup = content_2,  
                    labelOptions = labelOptions(noHide = F, textSize = "20px"))%>%  
  addMiniMap(  
    tiles = providers$Jawg.Terrain,  
    toggleDisplay = TRUE) %>% addProviderTiles("Jawg.Terrain") %>%  
  setView(lng = 6.1, lat = 48.85, zoom = 2.5 )
```

Anexo 1:

| PUNTO_MUESTREO | MES (MMMM) | AÑO  | FECHA      | MAGNITUD | TOTAL  | MEDIA_DIARIA | ESTANDARIZAR_MEDIDAS |
|----------------|------------|------|------------|----------|--------|--------------|----------------------|
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 1        | 129    | 4,161290323  | 4,161290323          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 6        | 12     | 0,387096774  | 387,0967742          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 7        | 831    | 26,80645161  | 26,80645161          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 8        | 1554   | 50,12903226  | 50,12903226          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 9        | 273    | 8,806451613  | 8,806451613          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 10       | 395    | 12,74193548  | 12,74193548          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 12       | 2829   | 91,25806452  | 91,25806452          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 14       | 936,54 | 30,21096774  | 30,21096774          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 20       | 64,5   | 2,080645161  | 2,080645161          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 30       | 17,1   | 0,551612903  | 0,551612903          |
| 28079008       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 35       | 9,4    | 0,303225806  | 0,303225806          |
| 28079011       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 7        | 745    | 24,03225806  | 24,03225806          |
| 28079011       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 8        | 1440   | 46,4516129   | 46,4516129           |
| 28079011       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 12       | 2579   | 83,19354839  | 83,19354839          |
| 28079011       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 20       | 49,5   | 1,596774194  | 1,596774194          |
| 28079011       | 1          | 2022 | 31/01/2022 | 30       | 12,5   | 0,425483871  | 0,425483871          |

Código 2:

```
#####
#----- NIVELES DE CONTAMINACION
#install.packages(c("leaflet", "sp", "readxl"))
library(sp)
library(leaflet)
library(readxl)
Niveles_Contaminacion <- read_excel("Join Contaminación.xlsx")

# Creación de un modelo de regresión lineal utilizando la función lm
modelo <- lm(ESTANDARIZAR_MEDIDAS ~ FECHA, data = Niveles_Contaminacion)

# Resultados del modelo
summary(modelo)
```

Resultado 1:

```
Call:
lm(formula = ESTANDARIZAR_MEDIDAS ~ FECHA, data = Niveles_Contaminacion)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-120.61  -70.00  -40.83  -11.11  1772.74

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.053e+03  6.997e+01   15.05  <2e-16 ***
FECHA        -6.146e-07  4.375e-08  -14.05  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 206.4 on 9312 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.02075,    Adjusted R-squared:  0.02064
F-statistic: 197.3 on 1 and 9312 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Código 3:

```
#####
#----- AFOROS DE TRAFICO DE LA CIUDAD DE MADRID
#install.packages(c("leaflet", "sp", "readxl"))
library(sp)
library(leaflet)
library(readxl)
Aforos <- read_excel("Modelo_Trafico.xlsx")

# Creación de un modelo de regresión lineal utilizando la función lm
modelo <- lm(AFORO ~ FECHA, data = Aforos)

# Resultados del modelo
summary(modelo)
```

Resultado 2:

```

Call:
lm(formula = AFORO ~ FECHA, data = Aforos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-97384  -5815  -2765   1990 109436

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.676e+04  5.418e+02   49.39  <2e-16 ***
FECHA        -1.195e-05  3.387e-07  -35.28  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 11140 on 459254 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.002704, Adjusted R-squared:  0.002701
F-statistic: 1245 on 1 and 459254 DF, p-value: < 2.2e-16

```

#### Código 4:

```

#####
#----- ESTUDIO DE LA CORRELACION CONTAMINACION Y TRAFICO

# Instalacion de los paquetes necesarios
#install.packages("readxl")
#install.packages("ggplot2")

# Carga de las librerías
library(readxl)
library(ggplot2)

# Leer los datos del archivo Excel
cruce <- read_excel("Cruce.xlsx")

# Realizar el análisis de correlación
correlacion <- cor(cruce$AFORO_STD, cruce$CONTAM_STD)

# Imprimir el resultado
print(correlacion)

# Generar un gráfico de dispersión
ggplot(cruce, aes(x = AFORO_STD, y = CONTAM_STD)) + geom_point()

```

#### Código 5:

```

# Carga de las librerías
library(readxl)
library(ggplot2)

# Leer los datos del archivo Excel
cruce <- read_excel("Cruce.xlsx")

# Filtrado de los datos por zonas
Almendra <- subset(cruce, ZONA == "Madrid Central")

# Realizar el análisis de correlación
correlacion <- cor(Almendra$AFORO_STD, Almendra$CONTAM_STD)

# Imprimir el resultado
print(correlacion)

# Generar un gráfico de dispersión
ggplot(Almendra, aes(x = AFORO_STD, y = CONTAM_STD)) + geom_point()

```

#### Resultado 3:

Call:  
lm(formula = CONTAMINACION\_STD ~ AFORO\_MEDIO\_STD + HUMEDAD\_STD,  
data = Zona)

Residuals:  
Min 1Q Median 3Q Max  
-10.714 -7.151 -3.328 7.676 18.201

Coefficients:  
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) 17.741 9.147 1.939 0.0582 .  
AFORO\_MEDIO\_STD 21.703 9.063 2.395 0.0205 \*  
HUMEDAD\_STD 1.317 1.199 1.099 0.2773  
---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.272 on 49 degrees of freedom  
(12 observations deleted due to missingness)  
Multiple R-squared: 0.1296, Adjusted R-squared: 0.09405  
F-statistic: 3.647 on 2 and 49 DF, p-value: 0.03337

#### Resultado 4:

Call:  
lm(formula = CONTAMINACION\_STD ~ AFORO\_MEDIO\_STD + HUMEDAD\_STD,  
data = Zona)

Residuals:  
Min 1Q Median 3Q Max  
-20.28 -12.58 -6.76 13.76 23.85

Coefficients:  
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) -6.138 3.816 -1.608 0.114  
AFORO\_MEDIO\_STD 4.257 2.971 1.433 0.158  
HUMEDAD\_STD 3.060 1.969 1.555 0.126

Residual standard error: 13.78 on 49 degrees of freedom  
(12 observations deleted due to missingness)  
Multiple R-squared: 0.09043, Adjusted R-squared: 0.0533  
F-statistic: 2.436 on 2 and 49 DF, p-value: 0.09807

#### Resultado 5:

Call:  
lm(formula = CONTAMINACION\_STD ~ AFORO\_MEDIO\_STD + HUMEDAD\_STD,  
data = Zona)

Residuals:  
Min 1Q Median 3Q Max  
-1.7451 -0.8957 -0.1004 0.6270 3.0788

Coefficients:  
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) 1.1769 0.2258 5.211 3.73e-06 \*\*\*  
AFORO\_MEDIO\_STD 2.2008 0.5351 4.113 0.000149 \*\*\*  
HUMEDAD\_STD 0.3770 0.1657 2.274 0.027353 \*  
---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.241 on 49 degrees of freedom  
(12 observations deleted due to missingness)  
Multiple R-squared: 0.3295, Adjusted R-squared: 0.3021  
F-statistic: 12.04 on 2 and 49 DF, p-value: 5.588e-05

#### Resultado 6:

```
Call:
lm(formula = CONTAMINACION_STD ~ AFORO_MEDIO_STD + PRECIPITACION_STD,
    data = Zona)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-10.777  -7.026  -3.191   6.712  18.770
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    18.8903     9.3416   2.022  0.0486 *
AFORO_MEDIO_STD  22.5292     9.2901   2.425  0.0190 *
PRECIPITACION_STD  0.1459     1.0953   0.133  0.8946
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 8.372 on 49 degrees of freedom
(12 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.1085,    Adjusted R-squared:  0.07208
F-statistic: 2.981 on 2 and 49 DF,  p-value: 0.06003
```

## Resultado 7:

```
Call:
lm(formula = CONTAMINACION_STD ~ AFORO_MEDIO_STD + PRECIPITACION_STD,
    data = Zona)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-17.015 -12.894  -7.603  13.622  26.121
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    -6.9065     3.8783  -1.781  0.0811 .
AFORO_MEDIO_STD  4.7714     3.0465   1.566  0.1237
PRECIPITACION_STD  0.8712     2.1925   0.397  0.6929
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 14.1 on 49 degrees of freedom
(12 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.04863,    Adjusted R-squared:  0.009802
F-statistic: 1.252 on 2 and 49 DF,  p-value: 0.2948
```

## Resultado 8:

```
Call:
lm(formula = CONTAMINACION_STD ~ AFORO_MEDIO_STD + PRESION_STD,
    data = Zona)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-10.815  -6.996  -3.137   6.833  18.656
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    18.4518     9.5715   1.928  0.0597 .
AFORO_MEDIO_STD  22.2099     9.2331   2.405  0.0200 *
PRESION_STD     0.3283     3.5986   0.091  0.9277
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 8.372 on 49 degrees of freedom
(12 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.1083,    Adjusted R-squared:  0.0719
F-statistic: 2.975 on 2 and 49 DF,  p-value: 0.06032
```

## Resultado 9:

```
Call:
lm(formula = CONTAMINACION_STD ~ AFORO_MEDIO_STD + PRESION_STD,
    data = Zona)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-20.757 -12.961  2.793   9.158  22.268
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -1.633     3.657  -0.447 0.657122
AFORO_MEDIO_STD  1.883     2.750   0.685 0.496804
PRESION_STD     5.394     1.397   3.861 0.000331 ***
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 12.36 on 49 degrees of freedom
(12 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.2682,    Adjusted R-squared:  0.2383
F-statistic:  8.98 on 2 and 49 DF,  p-value: 0.0004758
```

## Resultado 10:

```
Call:
lm(formula = CONTAMINACION_STD ~ AFORO_MEDIO_STD + TEMPERATURA_STD,
    data = Zona)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.2587 -0.9310 -0.0893  0.7398  3.4058
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   1.1658     0.2197   5.305 2.69e-06 ***
AFORO_MEDIO_STD  2.3199     0.5186   4.473 4.58e-05 ***
TEMPERATURA_STD -0.4749     0.1663  -2.855 0.00629 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 1.208 on 49 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3644,    Adjusted R-squared:  0.3385
F-statistic:  14.05 on 2 and 49 DF,  p-value: 1.506e-05
```