



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Fin de Máster:

Reducción de emisiones NO_x y micropartículas por la penetración del vehículo eléctrico en la movilidad urbana

AUTOR: JUAN SALMADOR GONZALEZ

DIRECTOR: JAIME ROMÁN ÚBEDA

Madrid, Agosto de 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. JUAN SALMADOR GONZALEZ DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

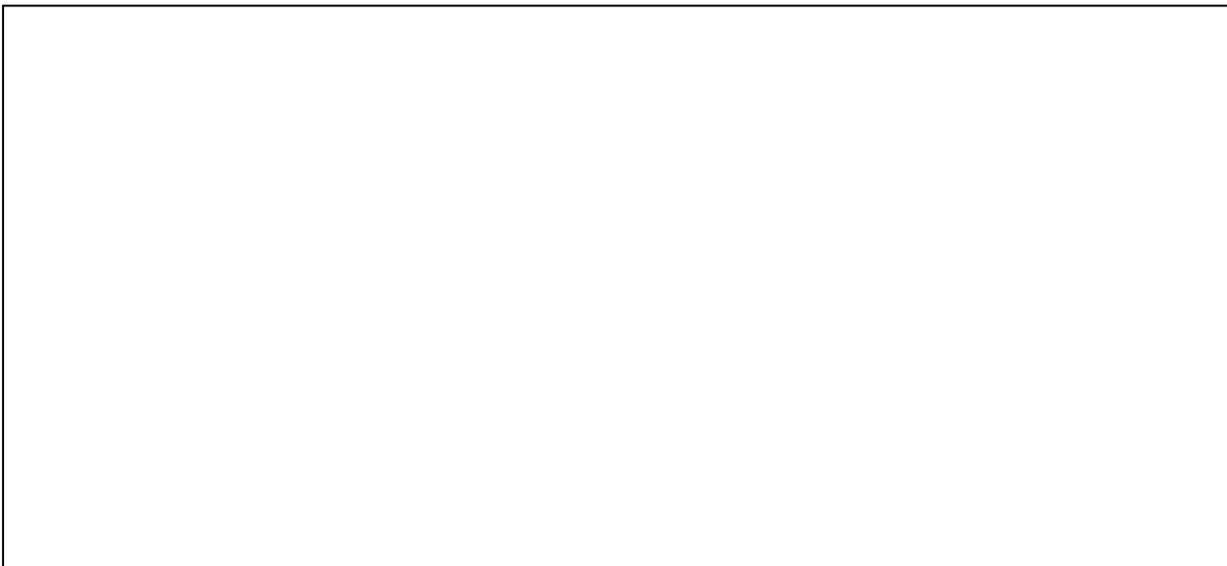
Madrid, a 28 de agosto de 2018

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to provide reasons for requesting restricted access to a work in the Institutional Repository.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *Reducción de emisiones NO_x por la penetración del vehículo eléctrico en la movilidad urbana*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017-18 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Juan Salmador Gonzalez

Fecha: 28/08/2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Román Úbeda

Fecha: 28/08/2018



Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi director, Jaime Román, por su apoyo incondicional durante el transcurso del proyecto, que ha sido clave para poder desarrollarlo de la mejor manera posible. Agradezco también a la Universidad Pontificia de Comillas y todo su personal la formación que he recibido en los últimos 6 años, con los que cierro la mejor etapa de mi vida.

En segundo lugar, quiero acordarme de mis amigos, tanto de ICAI como de fuera de la universidad. Ellos han sido mis compañeros de viaje en los momentos duros y en los felices, y sin las experiencias que hemos compartido no habría podido completar este camino.

Por último, y de forma especial, a mis padres, sin quienes nada de esto hubiera sido posible. Por haberme dado los mejores consejos en cada momento y representar el modelo a seguir con su ejemplo. También quiero acordarme de mis hermanas, de quienes también he aprendido lecciones importantes y por ser un soporte fundamental en mi vida.

REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Autor: Salmador Gonzalez, Juan

Director: Román Úbeda, Jaime

Entidad colaboradora: Universidad Pontificia de Comillas (ICAI)

Resumen

A finales del siglo XX se definió por primera vez el problema medioambiental desde una perspectiva global, considerando que el desarrollo humano debía ser sostenible. En este marco, las emisiones de CO₂ y el calentamiento global constituyen uno de los problemas más acuciantes hoy en día, desde la plasmación del concepto de desarrollo sostenible, Prueba de ello es que la lucha contra la contaminación está marcando los grandes objetivos de transición energética de la mayoría de los países del mundo. El ejemplo más reciente de esto es la cumbre del clima de París (COP21) que tuvo lugar a finales de 2015.

Dentro de este contexto, la contaminación atmosférica en las ciudades también cobra cada vez más importancia, siendo fundamentalmente el NO₂ y las micropartículas, los contaminantes que marcan la calidad del aire de las ciudades. De conformidad con los análisis de la OMS, estos agentes tienen efectos muy perjudiciales para la salud, habiéndose convertido en una de las principales causas de mortalidad a nivel mundial.

Este trabajo considera el NO₂ como indicador de la calidad del aire, analizando los niveles de los últimos dos años en la ciudad de Madrid. Además de los factores meteorológicos que influyen en su concentración en el aire. Se han calculado las emisiones de NO_x, procedentes de los dos principales focos de contaminación urbana; el transporte y las calderas destinadas al consumo energético de los inmuebles urbanos, consecuentemente se ha considerado el parque automovilístico de la ciudad y el consumo energético de los edificios.

A partir de los datos históricos de precipitaciones, temperatura, viento y de las emisiones NO_x que se han estimado (para la ciudad de Madrid), se han construido dos modelos de regresión lineal (uno de primer grado y otro posterior, de segundo grado). El objetivo ha sido determinar la influencia de estos factores en la concentración de NO₂ en la atmósfera.

Los resultados muestran que la relación entre estas variables es compleja, ya que se alcanza un coeficiente de determinación R^2 de 0,58 en el mejor de los casos, un valor poco fiable en una regresión. Para poder predecir la calidad del aire a partir de las variables de entrada citadas con mayor precisión, se recomienda incluir más variables de entrada, utilizando un R^2 corregido y desarrollando modelos estadísticos más complejos (como pueden ser regresiones dinámicas o redes neuronales).

Posteriormente, se han estudiado en detalle las medidas propuestas por el Ayuntamiento de Madrid en el “*Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático*” (Plan A). Se han analizado, en primer lugar, las medidas que afectan al parque circulante de vehículos que tienen pues un efecto directo en las emisiones NO_x . Tras evaluar estas actuaciones clave que afectan a los grupos de vehículos más importantes en cuanto a contaminación (autobuses EMT, turismos y taxis), se ha comprobado que se pueden reducir a la mitad las emisiones del transporte tratando únicamente estos tres grupos. El denominador común de estas actuaciones es la sustitución de los vehículos más antiguos del parque por otros nuevos, que no tendrían por qué ser únicamente eléctricos, aunque si sería más efectiva la reducción de emisiones.

En segundo lugar, se han valorado las medidas que propone el Ayuntamiento en materia de Movilidad Sostenible que tratan de inducir cambios de hábitos en la sociedad. Algunas de éstas son la disminución de carriles en las principales arterias de la capital o la restricción de tráfico en la llamada “Zona Cero Emisiones”. Aunque estas medidas buscan un efecto disuasorio, fundamentalmente sobre los conductores de vehículos particulares, sus consecuencias son inciertas ya que pueden congestionar aún más las calles colindantes y disminuir la velocidad de circulación por Madrid, ya de por si lenta.

Para finalizar, a pesar de que el Plan A tiene unos objetivos muy claros que buscan reducir las emisiones NO_x para mejorar así la calidad del aire, es necesario que estas iniciativas tengan continuidad en las instituciones superiores. En España (y en Europa) se ha subvencionado en exceso el coche diésel en los sucesivos planes PIVE, considerándolos vehículos “eficientes” por sus menores emisiones de CO_2 respecto a la gasolina, siendo sin embargo mucho más contaminantes en términos de NO_x . Estas decisiones han propiciado un crecimiento en las ventas de coches diésel en la pasada década. Con esta situación de predominio de coches diésel en el parque, serán los propietarios de estos

vehículos los primeros afectados por las nuevas restricciones de tráfico, viéndose perjudicados por las decisiones fiscales y regulatorias del pasado.

REDUCTION OF NO_x EMISSIONS BY INCREASING THE PENETRATION OF ELECTRIC VEHICLES IN ROAD TRAFFIC

Author: Salmador Gonzalez, Juan

Director: Román Úbeda, Jaime

Collaborating entity: Universidad Pontificia de Comillas (ICAI)

Abstract

The environmental problem was first defined as a global concern towards the end of the 20th century, changing the perception of economic progress by considering that sustainable development should be at the center. In this context, global warming and CO₂ emissions have become recurrent topics. The fact that these subjects are setting the direction of political agendas in most developed and developing countries proves it. Most recent example of this are the Paris Accords (COP21), in 2015.

Within this context of global concern for reducing emissions, the concern for local pollution in urban areas is also growing significantly. However, air pollution in cities is determined by other substances (different from CO₂); mainly NO₂ and particulate matter. According to the analysis made by the WHO (World Health Organization) these pollutants have a harmful effect on human health to the point that they have become one of the main death causes worldwide.

This project focusses on NO₂ as the principal indicator of air quality, analysing its levels over the past two years in the city of Madrid. Besides studying the effect of the weather conditions on the concentration of NO₂ in the atmosphere; an entire chapter has been dedicated to calculate NO_x emissions from its the two main sources; road traffic and residential heating systems. To achieve this, it has been necessary to study the characteristics of the automobile park and energy consumption of buildings in the city.

The data records of rain, temperature and wind, and the NO_x emissions that were estimated have been used as inputs to build two linear regression models (one with first order coefficients and the second one with squared coefficients). The objective pursued has been to predict NO₂ levels in the air.

The results however are unsatisfactory as they show that the relationship between these variables is too complex for a simple regression model. The determination coefficient, R^2 , obtained was of 0,58 in the best-case scenario, which is not a reliable value in a regression problem. Therefore, in order to obtain better results that adjust to the real relationship between these variables it is necessary to increase the number of inputs, using an adjusted R^2 and developing more complex statistic models (for instance dynamic regressions or neural networks).

After this chapter, the initiatives presented by the City Council of Madrid in its “*Plan for Air Quality and Climate Change*” (Plan A) have been analysed. Firstly, chapter 5 is dedicated to those actions which are targeted at the main sources of NO_x emissions from road traffic. The main courses of action proposed deals with the three vehicle types that pollute the most; private cars, public buses (EMT) and taxis. The results obtained show that NO_x emissions can be reduced by 50% just dealing with these three sources. The reason for this is that the objectives set in “*Plan A*” are to substitute the oldest cars in the city by new and less polluting ones, which don’t even have to be exclusively electric vehicles, although using EV the reduction will be more effective.

The evaluation of another group of proposals of “*Plan A*” has been made in chapter 6. These measures try to induce a change of habits in the way society uses transport. Some of these actions are: closure of road lanes in the main city streets and driving restrictions in the so-called “Zero Emission Zone” in the heart of the city center. Although the objective pursued is to discourage citizens of driving their own cars inside the city, the final outcome of these initiatives is uncertain because they can result in even more traffic jams in adjacent streets and slower speed with more time of combustion engines use.

To finish the work and although the “Plan A” has very clear and straightforward goals to reduce NO_x emissions and improve air quality in Madrid, it is also necessary that these initiatives are supported by upper political decisions (central and regional governments). Spain and Europe have continuously subsidized and encouraged the purchase of diesel cars, because they were considered “efficient vehicles” as they have lower CO_2 emissions than gasoline cars. These decisions resulted in a sales boom of diesel vehicles over the past decade. However, in terms of NO_x emissions, diesel cars have been proved to be far worse than gasoline. Therefore, this has become a problem in large European cities like

Madrid which now have to make controversial decisions that will affect the owners of these cars.

Índice

Agradecimientos	viii
Resumen	x
Abstract.....	xiii
Índice	xvi
Índice de Figuras	xix
Índice de Tablas.....	xxii
1. Introducción	- 1 -
1.1. Estado de la cuestión.....	- 2 -
1.2. Motivación del proyecto	- 4 -
1.3. Objetivos y metodología del proyecto	- 6 -
1.4. Recursos a emplear	- 7 -
2. Calidad del aire.....	- 9 -
2.1. Índice de Calidad del Aire	- 9 -
2.1.1. Cálculo del ICA	- 9 -
2.1.2. Limitaciones del ICA	- 12 -
2.2. NO ₂ en la atmósfera.....	- 13 -
2.3. Análisis de los datos del año 2016.....	- 14 -
2.4. Influencia de las condiciones meteorológicas en los niveles de NO ₂	- 16 -
3. Fuentes de emisiones NO _x	- 19 -
3.1. SNAP 07: Transporte por carretera	- 19 -
3.1.1. Normativa europea	- 20 -
3.1.2. Etiquetas de la DGT	- 22 -
3.1.3. Parque automovilístico	- 22 -

3.1.4.	Factores de emisión NO _x	- 24 -
3.1.5.	Parque circulante	- 33 -
3.1.6.	Modelo de Emisiones NO _x del parque circulante	- 37 -
3.2.	SNAP 02: Sistemas de combustión no industriales	- 40 -
4.	Modelo de regresión lineal	- 45 -
4.1.	Regresión lineal simple	- 45 -
4.1.1.	Relevancia del modelo	- 47 -
4.1.2.	Coefficientes de regresión	- 47 -
4.1.3.	Coefficiente de determinación lineal (R^2)	- 49 -
4.1.4.	Distribución de los residuos	- 50 -
4.2.	Regresión lineal con términos cuadráticos	- 51 -
4.3.	Resumen del modelo de regresión	- 53 -
5.	Plan A: Reducción de emisiones	- 55 -
5.1.	Medida 11: Ampliación y renovación de la flota de la EMT: hacia una flota de bajas emisiones	- 56 -
5.1.1.	Actuaciones y objetivos	- 56 -
5.1.2.	Impacto en las emisiones	- 57 -
5.1.3.	Análisis de los resultados	- 57 -
5.2.	Medida 12: Taxi. Incentivos para transformación a vehículos de bajas emisiones - 58 -	
5.2.1.	Actuaciones y objetivos	- 58 -
5.2.2.	Impacto en las emisiones	- 59 -
5.2.3.	Análisis de los resultados	- 60 -
5.3.	Medida 17: Renovación del parque circulante	- 61 -
5.3.1.	Actuaciones y objetivos	- 61 -
5.3.2.	Impacto en las emisiones	- 62 -

5.3.3.	Análisis de los resultados	- 68 -
5.4.	Efecto global del Plan A en la reducción de emisiones	- 69 -
6.	Plan A: Movilidad Sostenible y cambio de hábitos	- 71 -
6.1.	Restricciones de tráfico.....	- 71 -
6.1.1.	Medida 1: Área Central Cero Emisiones.....	- 71 -
6.1.2.	Medida 2: Rediseño de las vías principales de distribución del tráfico.....	- 72 -
6.2.	Formas de transporte alternativas	- 73 -
6.2.1.	Medida 8: Red de aparcamientos intermodales en la corona metropolitana.....	- 74 -
6.2.2.	Medida 21: Impulso a las iniciativas de movilidad compartida	- 74 -
6.3.	Impacto de las medidas.....	- 75 -
6.4.	Cooperación con otras administraciones	- 75 -
7.	Conclusiones y evaluación.....	- 77 -
7.1.	Sobre la influencia de las emisiones NO _x en la calidad del aire	- 77 -
7.2.	Sobre el Plan A	- 78 -
7.3.	Futuros desarrollos.....	- 79 -
8.	Bibliografía.....	- 81 -

Índice de Figuras

Figura 1: Zonificación de la ciudad de Madrid realizada por el Ayuntamiento [4]	2 -
Figura 2: Protocolo de tráfico contra la alta contaminación en Madrid. (Fuente: El Mundo [6])	3 -
Figura 3: Valores medios de NO ₂ en el año 2016 en distintas estaciones de Madrid (Fuente: Plan A [8])	5 -
Figura 4: Número de superaciones horarias del valor límite de 200 µg/m ³ en el año 2016 (Fuente: Plan A [8])	5 -
Figura 5: Datos meteorológicos de la estación de Moratalaz (Fuente: [12])	11 -
Figura 6: Ciclo de vida del NO ₂ en la atmósfera (simplificado) [17]	14 -
Figura 7: Promedio diario de la concentración de NO ₂ en la zona 1 (elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid [12])	16 -
Figura 8: Parque automovilístico de la Comunidad de Madrid según tipo de vehículo-	24 -
-	
Figura 9: Desglose del número de turismos y vehículos ligeros en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible [24]	26 -
Figura 10: Desglose del número de motocicletas en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible	28 -
Figura 11: Desglose del número de autobuses y camiones en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible [24]	30 -
Figura 12: Perfil de velocidad del ciclo de conducción NEDC [20]	31 -
Figura 13: Perfil de velocidad del ciclo de conducción CADC [29]	31 -
Figura 14: Factores de emisión reales, considerando las penalizaciones al Test NEDC de la Tabla 11	33 -
Figura 15: Zonas de estudio del tráfico en Madrid [30]	34 -
Figura 16: Emisiones según el tipo de vehículo	38 -
Figura 17: Emisiones NO _x diarias del Grupo SNAP 07: Transporte por carretera ...-	39 -

Figura 18: Emisiones NO _x diarias del Grupo SNAP 02: Sistemas de combustión no industriales.....	- 44 -
Figura 19: Representación del modelo de regresión en el set de entrenamiento.....	- 45 -
Figura 20: Representación del modelo de regresión en el set de test	- 46 -
Figura 21: Principales parámetros del modelo de regresión lineal simple, calculada utilizando los datos del Training Set	- 47 -
Figura 22: Calidad de un modelo de regresión lineal con una variable de entrada y otra de salida, para distintos valores de R ² [39]	- 50 -
Figura 23: Distribución de los residuos con modelo de regresión lineal simple.....	- 51 -
Figura 24: Principales parámetros del modelo de regresión lineal con términos cuadráticos	- 52 -
Figura 25: Coeficientes y parámetros del modelo de regresión cuadrático simplificado..	52 -
Figura 26: Distribución de los residuos en el set de test con el modelo de regresión cuadrática.....	- 53 -
Figura 27: Horizonte temporal de actuación para implementar la Medida 11: Ampliación y renovación de la flota de autobuses [8]	- 56 -
Figura 28: Impacto de la Medida 11 en la reducción de las emisiones NO _x de la flota EMT.....	- 57 -
Figura 29: Evolución estimada de las emisiones NO _x de los taxis con la aplicación de la Medida 12 del Plan A	- 60 -
Figura 30: Horizonte temporal para implementar la Medida 17: Renovación del Parque Circulante [8].....	- 62 -
Figura 31: Turismos matriculados cada año desde 2002 en la Comunidad de Madrid [24]	- 63 -
Figura 32: Matriculaciones al año según tipo de combustible en la Comunidad de Madrid [24]	- 64 -

Figura 33: Escenario conservador de penetración de vehículos ecológicos en el parque DGT	- 65 -
Figura 34: Emisiones NO _x de turismos tras la aplicación de la Medida 17 del Plan A: Escenario conservador	- 66 -
Figura 35: Escenario optimista de penetración de vehículos ecológicos en el parque DGT	- 67 -
Figura 36: Emisiones NO _x de turismos tras la aplicación de la Medida 17 del Plan A: Escenario optimista	- 67 -
Figura 37: Efecto global del Plan A en las emisiones de NO _x en el área interior de la M-30 de Madrid.....	- 69 -
Figura 38: Área Central Cero Emisiones (Medida 1 del Plan A [8])	- 71 -
Figura 39: Vías de distribución del tráfico sobre las que actúa la Medida 2 del Plan A [8]	- 73 -
Figura 40: Aparcamientos disuasorios en las afueras de Madrid de la Medida 8 del Plan A [8].....	- 74 -

Índice de Tablas

Tabla 1: Coeficientes parciales para el cálculo del ICA horario [11]	10 -
Tabla 2: Niveles de calidad del aire (Fuente: [11])	10 -
Tabla 3: Concentraciones de NO ₂ en las estaciones de la zona 1 a lo largo del año 2016 (elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid [12]).....	15 -
Tabla 4: Correlación entre las variables meteorológicas y la contaminación de NO ₂ -	17 -
Tabla 5: Normativa europea sobre emisiones (en g/km) para turismos [20].....	21 -
Tabla 6: Clasificación de vehículos en España por etiquetas de la DGT según su tecnología [22].....	22 -
Tabla 7: Emisiones de NO _x de turismos (Categoría M1) y vehículos ligeros (Categoría N1, Clase II) según tipo de combustible y antigüedad [25]	25 -
Tabla 8: Emisiones de NO _x de motocicletas de dos ruedas sin sidecar (Categoría L3e) según tipo de combustible y antigüedad [26]	27 -
Tabla 9: Emisiones de NO _x de vehículos pesados de motor diésel (Categorías N2 y N3) según tipo de combustible y antigüedad [25]	28 -
Tabla 10: Emisiones NO _x estimadas en g/km para vehículos pesados de motor diésel ...	29 -
Tabla 11: Coeficiente de aumento de emisiones NO _x utilizando el ciclo CADC respecto al NEDC [29].....	32 -
Tabla 12: Parque circulante de Madrid y distribución según tipo de vehículo y combustible [30].....	34 -
Tabla 13: Datos de las carreras de los taxis en Madrid [34].....	37 -
Tabla 14: Consumo energético total de España del año 2012 en miles de GJ del grupo SNAP 02 [9]	41 -
Tabla 15: Factores de emisión de los distintos combustibles para sistemas de combustión no industriales [9].....	41 -
Tabla 16: Emisiones NO _x de los sectores comercial e institucional y residencial estimadas en el centro de Madrid	43 -

Tabla 17: Coeficientes de regresión estandarizados.....	- 49 -
Tabla 18: Desglose estimado de los taxis en el parque circulante de Madrid (Zona A) ...	- 58 -
Tabla 19: Porcentajes de turismos en el parque circulante según su combustible en distintos años y escenarios.....	- 68 -
Tabla 20: Emisiones diarias de NOX según tipo de vehículo, combustible y antigüedad [30]	- 91 -



1. Introducción

El informe Brundtland (1987) de la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo abordó por vez primera el problema medioambiental desde un punto de vista global, al afirmar que la actividad humana debía desarrollarse de una manera sostenible. A partir de ahí, el concepto *desarrollo sostenible* se impone paulatinamente en la agenda política de los países, entendiéndose por tal, aquél que favorece la satisfacción de las necesidades presentes sin poner en riesgo las capacidades de las generaciones futuras. La Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Medio Ambiente, celebrada en Río de Janeiro en 1992, recogió los postulados del Informe Brundtland y sentó las bases para abordar los desafíos del desarrollo y su incidencia en el medio ambiente [1].

Asimismo, la calidad de vida también supone una preocupación relativamente nueva en la consecución de objetivos económicos. Según datos del Banco Mundial [2], el 50% de toda la población del planeta vive en áreas urbanas, ocupando el 4% de la superficie y consumiendo el 80% de los recursos. En España, la población urbana asciende al 80%, y la tendencia es similar en los países desarrollados y muchos otros en vías de desarrollo. Por este motivo, la importancia de mejorar la calidad del aire en las ciudades está cobrando protagonismo en la legislación medioambiental de muchos países.

En el Acuerdo de París (diciembre de 2015), fueron muchas las ciudades las que se comprometieron a elaborar planes de acción para luchar contra la contaminación, con vistas a 5 años [3]. Las medidas que se elaboran tienen como objetivo reducir las emisiones de gases NO_x y material particulado (entre otros), que afectan a la calidad del aire a nivel local.

Por otro lado, el impacto de la contaminación en las ciudades es alarmante para la salud pública. La OMS (Organización Mundial de la Salud) denunció en 2016 que la contaminación del aire es la 4^a causa de muerte a nivel mundial [4]. Las enfermedades más comunes derivadas de esta exposición a un aire contaminado son: cáncer de pulmón, cardiopatías y accidentes cardiovasculares.

Además, el transporte rodado en las ciudades es causante de una gran parte de estas emisiones. Como resultado, estos planes de acción contra la contaminación dirigen

muchos esfuerzos a regular el tráfico rodado y limitarlo dentro del área urbana, sobre todo en situaciones de mayores niveles de contaminación.

1.1.Estado de la cuestión

El 21 de enero de 2016, el Ayuntamiento de Madrid aprobó “*Protocolo de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación por dióxido de nitrógeno.*” [5], cuya entrada en vigor se efectuó el 5 de febrero de ese mismo año. En este protocolo se divide la ciudad de Madrid en 5 zonas, según la Figura 1:

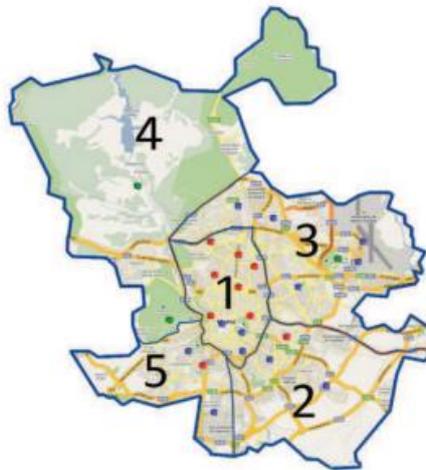


Figura 1: Zonificación de la ciudad de Madrid realizada por el Ayuntamiento [5]

En cada zona hay distintas estaciones de medida donde, de forma horaria se registra la concentración de NO₂ (dióxido de nitrógeno) y otros gases en el aire. La concentración de NO₂ es la que se utiliza principalmente para evaluar la calidad del aire, y sus niveles tienen dos límites anuales fijados en el Real Decreto 102/2011 del 28 de enero (ver Anexo I del documento oficial) [6]:

- Valor límite horario de 18 horas anuales en las que la concentración de NO₂ no debe superar los 200 µg/m³.
- Valor límite medio anual de 40 µg NO₂/m³.

A parte de estos límites anuales, en función del nivel de µg NO₂/m³ registrado horariamente y el tiempo que persiste este nivel, el Ayuntamiento pone en marcha distintas medidas de contingencia para regular el tráfico, hasta que disminuya la

contaminación. Estas medidas se ilustran en la Figura 2, produciéndose 15 episodios de contaminación en Madrid en el año 2016 que dieron lugar a estas restricciones de tráfico.



Figura 2: Protocolo de tráfico contra la alta contaminación en Madrid. (Fuente: El Mundo [7])

Es importante resaltar que estas medidas se aplican cuando además de superarse los citados niveles de contaminación, se tienen previsiones meteorológicas desfavorables. Estas situaciones desfavorables se dan cuando no se produce renovación del aire en la atmósfera. En un trabajo anterior [8], se construye un modelo estadístico que explica la interacción entre las principales condiciones meteorológicas y la concentración de NO₂ en la atmósfera. Estas son:

- La temperatura, que afecta de forma indirecta; al aumentar la temperatura, disminuye la concentración de NO₂.
- La presión atmosférica, que afecta de forma directa; al aumentar la presión también lo hace la concentración de NO₂.
- La velocidad del viento, que afecta de forma indirecta ya que está inversamente relacionada con la presión atmosférica; bajas presiones atmosféricas se corresponden con velocidades de viento elevadas y viceversa.
- Las precipitaciones, que afectan de forma indirecta; al aumentar éstas, disminuye la concentración de NO₂.



Las fechas en las que se ha activado alguna de las medidas de la Figura 2 han coincidido con la presencia de un anticiclón (altas presiones) en la Península, y se han caracterizado por la ausencia de lluvias. Esto ha sucedido en durante los pasados meses de octubre y noviembre de 2017, y también en esos mismos meses durante el año 2016, tal y como recoge el periódico el Mundo [7].

Por tanto, queda claro que las condiciones atmosféricas tienen un peso importante a la hora de que se produzcan o no estos episodios de contaminación. Sin embargo, es fundamental también reducir las emisiones de NO_x para disminuir así la dependencia del clima en un aspecto tan importante para la salud pública.

1.2. Motivación del proyecto

En marzo de 2017, el Ayuntamiento de Madrid presentó el “*Plan de calidad de aire y cambio climático*” (Plan A, de ahora en adelante) [9]. Mientras que el *Protocolo de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación por dióxido de nitrógeno* [5] citado anteriormente, contiene medidas de contingencia, el Plan A es un documento más extenso con el objetivo mejorar la calidad del aire en la ciudad de Madrid y establecer bases para la adaptación al cambio climático a medio y largo plazo.

En primer lugar, el documento del Plan A recoge un análisis de la calidad del aire y los niveles de distintos gases contaminantes en los últimos años (SO₂, PM10 y 2,5 y NO₂ entre otros). De todos ellos, el único cuyos niveles se encuentran por encima de los límites fijados es el dióxido de nitrógeno, NO₂, aunque hay otros gases como el ozono, O₃, que no tienen fijado por ley un valor límite.

En la Figura 3 se muestran los valores medios de NO₂ en distintas estaciones de Madrid, siendo 11 de 24 las que superan el límite anual de 40 µg NO₂/m³.

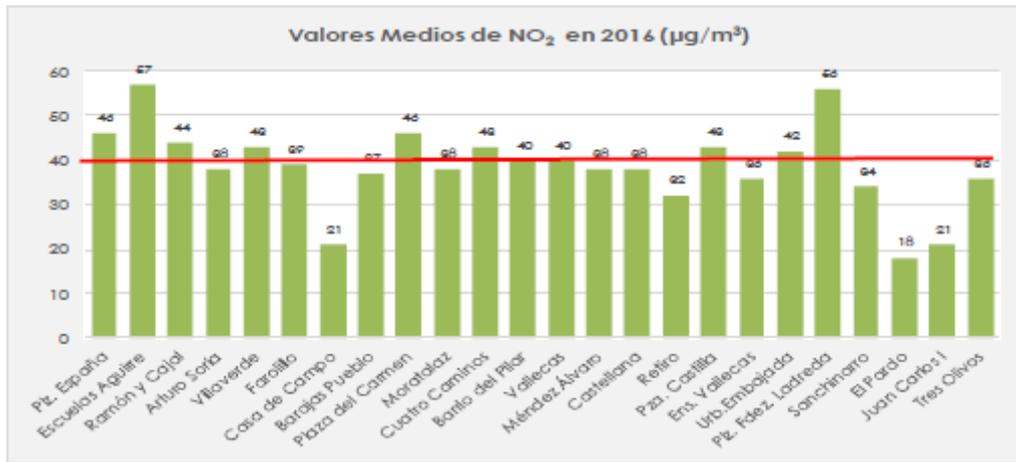


Figura 3: Valores medios de NO₂ en el año 2016 en distintas estaciones de Madrid (Fuente: Plan A [9])

También en 2016, 4 estaciones superaron en más de 18 ocasiones el límite de 200 µg NO₂/m³, y otras 4 quedaron cerca del límite, tal como se puede apreciar en la Figura 4:

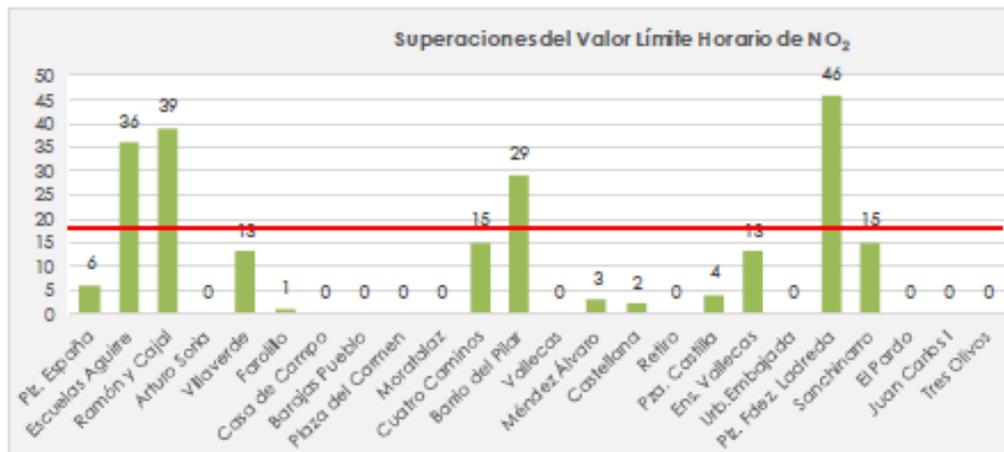


Figura 4: Número de superaciones horarias del valor límite de 200 µg/m³ en el año 2016 (Fuente: Plan A [9])

Los casos más drásticos se dan en su mayoría en el interior de la M-30 (zona 1 en el mapa de la Figura 1), aunque también en otras estaciones, sobre todo en el suroeste (zona 5). La razón principal es que la almendra central es donde se concentra la mayor parte de la población, con mayor actividad y tráfico rodado.

Precisamente, el transporte por carretera supuso cerca de la mitad de las emisiones totales de NO_x en 2014 (no se tienen datos para el año 2016 en el Plan A). También son muy relevantes las emisiones provenientes de otros modos de transporte y de plantas de combustión no industrial (principalmente calderas de los hogares), que aportan un 20% cada uno.



1.3. Objetivos y metodología del proyecto

En el citado Plan A, el Ayuntamiento presenta un total de 30 medidas destinadas a contrarrestar el efecto negativo de la actividad humana en la calidad del aire. El objetivo principal de este trabajo es analizar el impacto y efectividad de las medidas propuestas en el Plan A.

Para ello, en primer lugar, se desarrollará un modelo estadístico que explique la concentración de NO₂ en función de las condiciones meteorológicas y de las emisiones de NO_x. Los datos de concentración de NO₂ se recogen horariamente en cada una de las estaciones de medida del Ayuntamiento de Madrid. Por su parte, los datos relativos a las condiciones meteorológicas, los recoge AEMET, pero de forma diaria y no para cada hora del día.

En cuanto a las emisiones NO_x procedentes del transporte, éstas deben estimarse. El Ministerio de Medio Ambiente publica el documento *“Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2012. Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP”*, que sirve como guía de cálculo para calcular las emisiones NO_x [10]. Este procedimiento se utiliza para calcular las emisiones anuales, considerando el parque de vehículos en toda España y los recorridos habituales. En este proyecto se utilizará el método aplicado en esta guía adaptándolo al caso particular de la ciudad de Madrid, formando el inventario de emisiones diario a lo largo de un año. También se hará lo propio para estimar las emisiones procedentes de las calderas en edificios, al ser otro foco de emisión muy relevante en el caso de Madrid.

Una vez obtenido el modelo a partir de estos datos, se analizarán las propuestas del Plan A concernidas en el ámbito de la Movilidad Sostenible y de la Regeneración Urbana, ya que constituyen el grueso de medidas presentadas.

Algunas de ellas tienen un impacto directo en el nivel de emisiones NO_x que se puede calcular, y con ello calcular el efecto en la calidad del aire. Un ejemplo de esto es la renovación de la flota de autobuses de la EMT hacia una de bajas emisiones, ya que afecta directamente a las características de los vehículos en circulación.

Sin embargo, muchas otras de las propuestas tienen que ver con la reestructuración de la ciudad, priorización de la movilidad peatonal o promoción de medios de transporte



alternativo, cuyo efecto en las emisiones es más difícil de estimar. Estas iniciativas implican también un cambio cultural y su impacto en los niveles de NO₂ no se puede cifrar. Para analizar estas propuestas, se discutirán las posibles ventajas y desventajas de su implantación.

Finalmente, se abordará el tema del vehículo eléctrico; su relevancia dentro del Plan A, la reducción de emisiones y las medidas que favorecen su uso. El objetivo de este apartado es hacer un análisis crítico de la situación actual del vehículo eléctrico y también del cambio de mentalidad hacia la Movilidad Sostenible.

1.4. Recursos a emplear

Para el análisis estadístico se recogerán y ordenarán los datos necesarios de condiciones meteorológicas, emisiones NO_x y concentraciones de NO₂. Se utilizará Excel principalmente para organizar los datos, y Matlab como herramienta de análisis estadístico.

Las fuentes a emplear en este trabajo serán bases de datos de artículos científicos, periodísticos e información pública de las distintas agencias públicas (DGT, AEMET, el Ministerio de Medio Ambiente o el Ayuntamiento de Madrid).



**REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA
PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA**



2. Calidad del aire

Cuando se habla del problema de la contaminación, se suele pensar en el CO₂ (dióxido de carbono) ya que es el principal gas efecto invernadero (GEI) que se emite a la atmósfera, provocando el calentamiento global. Sin embargo, el CO₂ afecta a la contaminación a escala global ya que sus efectos se perciben en lugares alejados de los focos de emisión. Por ejemplo, las centrales de carbón emiten muchas toneladas de CO₂ diariamente para generar electricidad, pero sus efectos se notan no solo en el entorno de las centrales si no en todo el mundo. Los contaminantes que se van a analizar tienen un mayor efecto sobre contaminación urbana y por ello, el problema del CO₂ no es objeto de este trabajo.

En el ámbito urbano se habla frecuentemente de la calidad del aire, que es un tipo de contaminación que afecta a nivel local. Los principales indicadores del índice de calidad del aire en las ciudades son el NO₂, O₃, CO, SO₂ y el material particulado (PM¹ por sus siglas en inglés).

2.1. Índice de Calidad del Aire

Con el fin de informar y fomentar el interés general de la población por las características del aire que respira, instituciones de diferentes países han desarrollado distintos índices de calidad del aire (ICA). Estos índices sirven para agrupar los datos y simplificarlos en torno a un valor que sirva de referencia para evaluar la calidad del aire.

2.1.1. Cálculo del ICA

En Madrid, el Ayuntamiento calcula y publica en su página web [11] el ICA de forma horaria. Se calcula un coeficiente para cada contaminante a partir de los valores límite o umbrales de alerta definidos en el Real Decreto 102/2011 [6]. Al multiplicar la concentración de un agente por su coeficiente correspondiente se obtiene un ICA parcial

¹ Se consideran dos tipos de material particulado; PM₁₀ (partículas en suspensión con diámetro aerodinámico menor de 10 μm) y PM_{2,5} (diámetro aerodinámico menor de 2,5 μm).



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

de dicho agente. El ICA global que resulta es el valor máximo de todos los ICAs parciales. En la Tabla 1 se puede observar cómo se obtienen dichos coeficientes.

Tabla 1: Coeficientes parciales para el cálculo del ICA horario [12]

	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	CO (mg/m ³)
Periodo de observación	Horario	horario	horario ²	horario	Media móvil octohoraria
Límite/umbral utilizado	350	200	100	180	10
Coeficiente [-]	$\frac{100}{350} = 0,29$	$\frac{100}{200} = 0,5$	$\frac{100}{100} = 1$	$\frac{100}{180} = 0,556$	$\frac{100}{10} = 10$

Este ICA varía en una escala de 0 a 150 (y valores por encima), clasificándose la calidad del aire en 4 niveles; buena, admisible, deficiente y mala. Así, un ICA de valor 0 indica que la concentración del contaminante es nula, y un ICA de valor 100 indica que la concentración es igual al límite o umbral de alerta. Los rangos de calidad del aire y su correspondiente clasificación se pueden ver en la Tabla 2:

Tabla 2: Niveles de calidad del aire (Fuente: [12])

Rango de ICA	Calidad del aire
0-50	Buena
51-100	Admisible
101-150	Deficiente
>150	Mala

² Realmente no hay ningún valor límite ni umbral para el PM₁₀ a excepción del límite diario de 50 µg/m³, pero para este contaminante, el Ayuntamiento utiliza un valor de 100 µg/m³ como referencia.

A continuación se va a calcular el ICA a partir de los datos de la estación de Moratalaz a modo de ejemplo. En la Figura 5 se pueden ver las medidas registradas para el día 20 de abril de 2018 a las 11 horas:

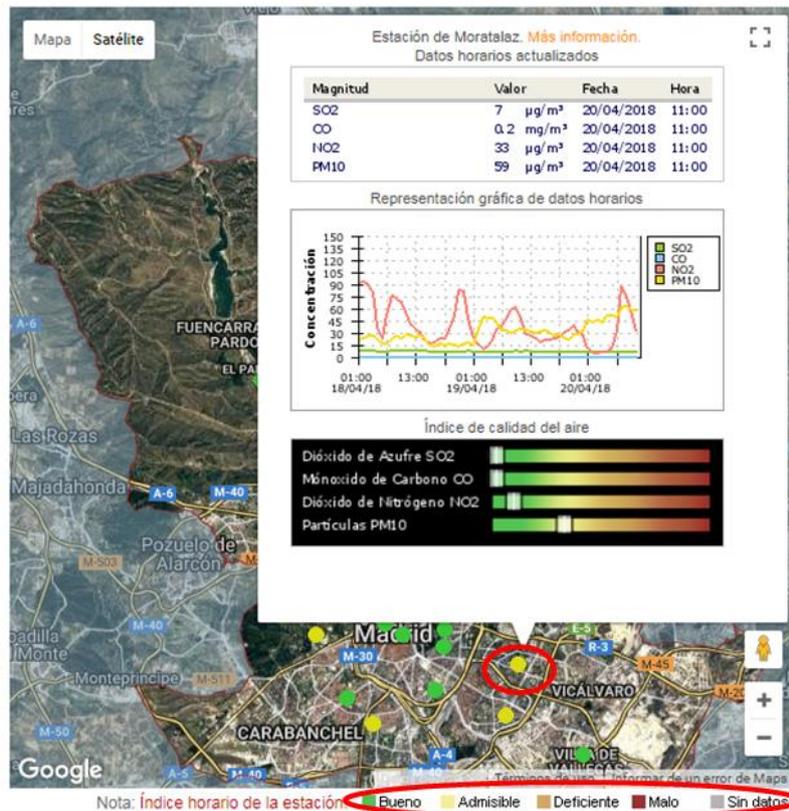


Figura 5: Datos meteorológicos de la estación de Moratalaz (Fuente: [13])

Se calcula el ICA parcial de los agentes de los que se tienen datos:

$$ICA_{SO_2} = 0,29 * 7 = 2,03$$

$$ICA_{CO} = 10 * 0,2 = 2$$

$$ICA_{NO_2} = 0,5 * 33 = 16,5$$

$$ICA_{PM_{10}} = 1 * 59 = 59$$

$$ICA_{global} = \max(ICA_{SO_2}, ICA_{CO}, ICA_{NO_2}, ICA_{PM_{10}}) = ICA_{PM_{10}} = 59$$

De estos resultados, el valor máximo es el ICA correspondiente al PM₁₀, por lo que este valor determina el ICA global, que traducido según la Tabla 2 es admisible.



2.1.2. Limitaciones del ICA

Si bien el Índice de Calidad del Aire es una forma útil de simplificar la información relativa a la contaminación, presenta también dos grandes inconvenientes. El primero es que existen tantos ICAs como asociaciones de distintos países que se dedican a calcularlo y publicarlo. Aunque el método de cálculo empleado es el mismo, se utilizan distintos coeficientes para cada contaminante y se incluyen/excluyen otros contaminantes que se consideran relevantes (en algunos casos no se valoran las concentraciones de SO₂ y de CO, y en otros se incluye la concentración de PM_{2,5}). Las instituciones más relevantes a nivel mundial son; el World Air Quality Index Project (China, [14]), CITEAIR (Europa, [15]) y la Agencia de Protección Ambiental americana (EEUU [16]), que calculan distintos ICAs a nivel horario, diario y/o anual.

El segundo gran problema del ICA es que no es lineal ya que para cada hora, el ICA es un valor máximo y no tiene porqué corresponderse con el mismo contaminante que en la hora anterior. Esto hace que evaluarlo sea más complicado ya que en función de qué contaminante esté dando el ICA máximo, las causas serán unas u otras. Por ejemplo, en verano se tiene un ICA elevado a causa del ozono, al haber mayor radiación solar, mientras que en las estaciones de otoño-invierno, cuando las condiciones meteorológicas lo favorecen, es el NO₂ el que establece el ICA [12].

Por estos motivos, el proyecto se centra en evaluar los niveles de dióxido de nitrógeno, que, de todos los agentes citados anteriormente, es el más preocupante para las autoridades. Además, como ya se comentó en el apartado 1.2, los límites fijados para este agente fueron los únicos que se superaron considerablemente en el año 2014 (y presumiblemente los demás años). En consecuencia, los principales esfuerzos del Plan A [9] van destinados a reducir las emisiones NO_x. Por otro lado, inevitablemente estas medidas también conllevarán también una reducción de los demás gases contaminantes, especialmente de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}), al proceder las emisiones de ambos contaminantes del tráfico principalmente. En los próximos apartados se desarrollarán detalladamente las principales causas que afectan a la concentración del dióxido de nitrógeno en la atmósfera.



2.2. NO₂ en la atmósfera

El dióxido de nitrógeno (NO₂) se mantiene en la atmósfera en un estado de equilibrio químico complejo, reaccionando con los demás gases presentes, dada su alta reactividad. Las distintas reacciones a las que se ve sometido son muy numerosas y además varían en función del día y la noche al depender también de la radiación solar. Los detalles de este equilibrio y su efecto sobre la concentración de NO₂ se pueden consultar en [17].

Dado que estudiar pormenorizadamente el equilibrio descrito anteriormente resulta demasiado complejo e ineficiente, se va a realizar una simplificación para determinar las variables que afectan a los niveles de NO₂. Esta simplificación se basa en el Principio de Le Châtelier, que establece que el equilibrio químico entre distintos compuestos se ve alterado cuando varían:

- La **temperatura**.
- La **presión** (aunque se utilizarán datos de velocidad media del viento en el modelo estadístico posterior, ya está muy relacionada con la presión atmosférica).
- La **concentración** de las especies. Por un lado, las precipitaciones disminuyen la concentración de NO₂ ya que éste se disuelve en agua. Por el otro, las emisiones NO_x la aumentan.

La Figura 6 ilustra como se relacionan estos factores con la contaminación atmosférica. Por un lado, están los focos de emisión de NO_x que reaccionan para producir NO₂ (primario o secundario). Estas reacciones se ven afectadas por la temperatura y la radiación solar (entre otros factores). Por otro lado, la mezcla y transporte de los agentes depende en gran medida del viento (o presión atmosférica), y la lluvia y la deposición seca hacen que el NO₂ salga de la atmósfera.

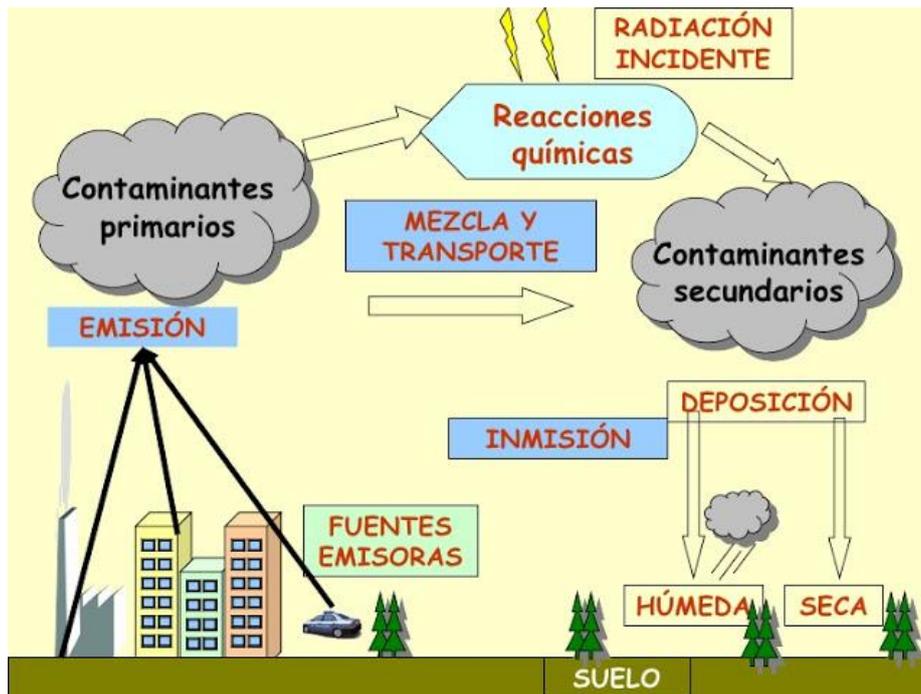


Figura 6: Ciclo de vida del NO₂ en la atmósfera (simplificado) [18]

Estas variables serán las que se emplearán como inputs del modelo de regresión que estime la concentración de NO₂ en la atmósfera. Naturalmente existen muchas otras condiciones meteorológicas que intervienen, como pueden ser la humedad o la velocidad máxima del viento en cada hora. No obstante, estas variables pueden ser redundantes o no están recopilados sus datos. Por ello, se considera que con las variables descritas se puede obtener una buena aproximación de la realidad.

A continuación, en el apartado 2.3 se va a analizar la evolución de la concentración de NO₂ en la ciudad de Madrid a lo largo del año de los años 2016 y 2017. Posteriormente, en el apartado 2.4, se determinará la influencia de los factores meteorológicos ya citados, y en el apartado 3 se calcularán las emisiones NO_x diarias. A partir de estos datos se calculará un modelo de regresión lineal con datos diarios en el apartado 4.

2.3. Análisis de los datos del año 2016

En la página web del Ayuntamiento de Madrid [11] se puede acceder al histórico de datos de concentraciones horarias en cada estación meteorológica. En el Plan A se hace un breve análisis de los datos del año 2016 (ver Figura 3 y Figura 4), pero para poder



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

profundizar más en ello, y para el posterior modelo de regresión, a continuación se va a proceder a un estudio más detallado de estos datos.

En la Tabla 3 se puede ver un resumen de los niveles de contaminación en el año 2016 en las estaciones de la zona 1. Como ya se ha señalado anteriormente, la zona de estudio en este proyecto es la zona 1 (almendra central/interior de la M-30) ya que es donde se concentran los mayores problemas de contaminación en Madrid. Leyendo los datos por columnas se obtiene el promedio mensual de la concentración de NO₂ en cada estación. La última columna indica el promedio mensual en la zona 1, y la última fila muestra el promedio anual en cada estación de medida.

Tabla 3: Concentraciones de NO₂ en las estaciones de la zona 1 a lo largo del año 2016 (elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid [13])

Mes	Pza. de España	Escuelas Aguirre	Av. Ramón y Cajal	Pza. del Carmen	Cuatro Caminos	Barrio del Pilar	Méndez Álvaro	Pº. Castellana	Retiro	Pza. Castilla	Zona 1
Ene	42,9	55,7	44,4	45,9	44,8	43,3	43,8	42,9	38,7	48,4	45,1
Feb	37,3	53,6	37,2	42,5	39,2	36,0	36,7	36,3	31,5	41,8	39,2
Mar	40,2	54,4	39,3	45,7	37,7	34,3	36,0	36,9	32,0	42,6	39,9
Abr	37,7	49,4	36,7	41,6	35,0	32,2	30,5	34,4	25,8	39,9	36,3
May	36,9	49,9	37,3	38,7	32,7	30,3	26,6	31,7	24,3	37,9	34,6
Jun	40,4	52,6	39,0	37,2	33,7	29,3	24,7	31,2	23,2	38,3	35,0
Jul	41,7	52,1	40,7	46,5	35,6	32,2	25,7	30,0	22,2	36,6	36,3
Ago	37,4	46,3	34,2	42,3	28,4	30,1	26,5	24,9	18,0	30,7	31,9
Sep	57,4	64,5	51,9	51,6	46,4	45,3	41,8	42,6	32,7	47,4	48,2
Oct	60,3	69,9	57,1	57,5	55,5	53,2	53,9	45,5	42,9	50,6	54,6
Nov	54,1	65,7	52,3	52,4	54,7	50,8	52,8	45,8	44,1	51,3	52,4
Dic	61,2	71,0	57,9	60,7	66,6	60,9	61,4	50,6	48,5	56,2	59,5
Anual	45,6	57,1	44,0	46,9	42,5	39,8	38,4	37,7	32,0	43,5	42,7

Cada estación tiene sus particularidades; por ejemplo, la estación de Retiro tiene los niveles más bajos gracias al parque y su extensa vegetación. Sin embargo, la estación de Escuelas Aguirre que está justo al lado del mismo parque, pero fuera de él, es la que marca los máximos de contaminación.

Por ello, se ha preferido calcular el promedio de la concentración diaria en todas las estaciones de la zona 1. Con esto se pretende obtener unos datos que indiquen una tendencia general dentro de esta zona, lo cual será más fácil de analizar y comparar con

los datos meteorológicos y de emisiones que también serán generales a la zona 1 completa.

En la Figura 7 se pueden ver los datos correspondientes a la concentración de NO₂ en la zona 1 durante los años 2016 y 2017. La línea roja horizontal representa el límite anual de 40 μgNO₂/m³. La tendencia es que la contaminación es más crítica en los meses de invierno y tiende a disminuir al llegar los meses de verano. En concreto, los meses de noviembre, diciembre y enero, son los de registros más altos, y por ello es en estos meses cuando se producen las ya comentadas restricciones al tráfico.

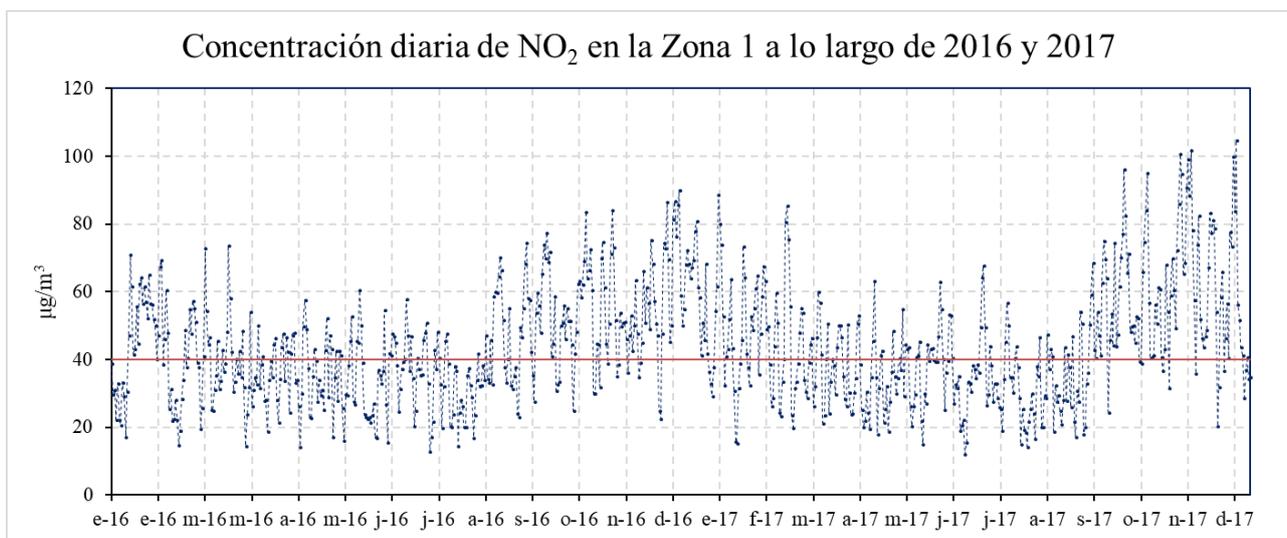


Figura 7: Promedio diario de la concentración de NO₂ en la zona 1 (elaboración propia a partir de datos del Ayuntamiento de Madrid [13])

Además, desde el punto de vista de la calidad del aire, el año 2017 ha sido peor que el anterior. Se observan una mayor cantidad de puntos por encima de la línea horizontal, siendo la concentración promedio en el año 2016 fue de 42,7 μgNO₂/m³, mientras que en 2017 llegó a los 45,1 μg/m³.

2.4. Influencia de las condiciones meteorológicas en los niveles de NO₂

Para la recopilación de datos climatológicos se ha recurrido a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET <https://datosclima.es/>) [19]. De esta web se obtienen datos diarios de AEMET para distintas estaciones de toda España, habiendo seleccionado los de la estación de Retiro. Aunque se ha visto que en el caso de la concentración de NO₂ había



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

diferencias relevantes entre las distintas estaciones de la zona 1 (ver Tabla 3), en el caso de las variables meteorológicas se asume que éstas son constantes dentro de la ciudad.

A partir de los datos diarios de concentración de NO₂, temperatura media, velocidad media del viento y de precipitación acumulada se han calculado en Excel los coeficientes de correlación de estas variables, mostrados en la Tabla 4. Estos coeficientes dan una idea de cómo afecta cada factor meteorológico a la contaminación; cuanto mayor es el coeficiente en valor absoluto, mayor es la dependencia existente entre las dos variables. Por otro lado, un coeficiente de correlación positivo indica una relación directa entre las variables y uno negativo indica relación indirecta.

Tabla 4: Correlación entre las variables meteorológicas y la contaminación de NO₂

	T_med (°C)	Viento (km/h)	Lluvia (L/m ²)
μgNO ₂ /m ³	-0,289	-0,558	-0,101

Se puede observar que todos estos coeficientes son negativos; al aumentar la temperatura, el viento o la lluvia, disminuye la concentración de NO₂. Además, los valores que se han obtenido en la Tabla 4 son muy similares a los que se obtuvieron en [8], donde se puede ver un análisis en profundidad de estas relaciones.

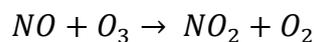


**REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA
PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA**



3. Fuentes de emisiones NO_x

Sobre las emisiones NO_x cabe destacar que están compuestas de dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido de nitrógeno (NO) fundamentalmente [20]. Estas emisiones han contribuido en gran medida a que la presencia de NO₂ en la atmósfera aumente significativamente en los últimos años. En el ámbito urbano proceden principalmente de los vehículos de combustión interna, y presentan una mayor concentración de NO que de NO₂. Sin embargo, el NO con el ozono para formar NO₂ secundario, según la siguiente reacción ([20], [17]):



En muchos artículos se suele distinguir por tanto entre NO₂ directo (emitido directamente a la atmósfera) e indirecto (formado a partir de reacciones secundarias, como por ejemplo, la anterior). No obstante, a efectos del modelo que se desarrollará más adelante, no será necesario profundizar en tanto detalle puesto que se calcularán únicamente las emisiones NO_x, a partir de unos factores expresados en gramos por kilómetro.

La nomenclatura SNAP (Standard Nomenclature for Air Pollution) divide las fuentes de emisiones de NO_x en 11 grupos distintos. Como ya se vio en el apartado 1.2, en el caso de Madrid (y en las ciudades en general), las dos fuentes de emisión más significativas son el transporte (Grupo 7) y las calderas (Grupo 2).

3.1.SNAP 07: Transporte por carretera

En este capítulo se consideran las emisiones procedentes del tráfico rodado, que son las más relevantes en el ámbito urbano. Se consideran no solo turismos, si no todo tipo de vehículos (ligeros, pesados, motocicletas) que participan en la movilidad urbana e interurbana, excluyendo los vehículos de uso agrícola o industrial.

Las emisiones procedentes del transporte se clasifican en 3 grupos, según la Agencia Medioambiental Europea (EEA, por sus siglas en inglés [21]):

- Emisiones de los gases de escape: Son las que resultan de los productos de la combustión de la gasolina, diésel y otros productos derivados del petróleo en el motor de los vehículos. Dado que la combustión se realiza en exceso de aire



(compuesto mayoritariamente por nitrógeno en un 79% y oxígeno en un 21%), a altas temperaturas se forman los gases NO_x. La razón por la que los vehículos diésel son más contaminantes en la ciudad que los de gasolina, es porque su combustión se produce a mayor temperatura y tras comprimir el aire (al tener un mayor poder calorífico), formándose más NO_x como producto.

Además de los NO_x, se generan otros gases contaminantes (CO₂, CO, PMs, SO_x...).

- Emisiones por abrasión: Son las que se producen a raíz de la erosión de distintas partes del vehículo sobre todo en los neumáticos en contacto con el asfalto, pero también en los frenos y el embrague. Fundamentalmente, estas emisiones generan material particulado (PM), pero no NO_x.
- Emisiones por evaporación: Son las que resultan de los vapores que escapan del sistema de combustible (desde el depósito hasta que se inyecta al motor). Los gases que se evaporan son compuestos orgánicos volátiles (COV), tanto si el motor está encendido como si está apagado.

3.1.1. Normativa europea

La Unión Europea ha ido desarrollando distintas normativas y políticas para reducir emisiones de los vehículos desde los años setenta. Una de estas medidas ha sido la creación de los estándares de emisión “Euro”, que limitan las emisiones permitidas en los vehículos.

El primero de estos estándares fue el *Euro 1*, creado en 1992. Desde entonces se han sucedido estándares más estrictos hasta llegar al *Euro 6*, que es el actual de referencia. En la Tabla 5 se pueden ver todos los estándares “Euro” que ha establecido la UE en los últimos años para turismos.

A pesar de que estos estándares se endurecen progresivamente, se puede ver comprobar en la Tabla 5 que los vehículos diésel han gozado de unas restricciones mucho más laxas en emisiones NO_x en comparación con los vehículos de gasolina. El límite ha sido como mínimo 3 veces superior hasta que se ha alcanzado el último estándar *Euro 6*, y a la vista de la hegemonía del diésel sobre la gasolina y los problemas que ello ha acarreado en la



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

contaminación, se puede decir que las restricciones no han sido lo suficientemente fuertes comparadas con las de los vehículos de gasolina.

Tabla 5: Normativa europea sobre emisiones (en g/km) para turismos [21]

Diesel	Date	CO	NMHC	NO _x	HC + NO _x	PM	PN
Euro 1	July 1992	2.72	-	-	0.97	0.14	-
Euro 2	January 1996	1.0	-	-	0.7	0.08	-
Euro 3	January 2000	0.64	-	0.50	0.56	0.05	-
Euro 4	January 2005	0.50	-	0.25	0.30	0.025	-
Euro 5a	September 2009	0.50	-	0.180	0.230	0.005	-
Euro 5b	September 2011	0.50	-	0.180	0.230	0.005	6.0 × 10 ¹¹
Euro 6	September 2014	0.50	-	0.080	0.170	0.005	6.0 × 10 ¹¹
Petrol	Date	CO	NMHC	NO _x	HC + NO _x	PM	PN
Euro 1	July 1992	2.72	-	-	0.97	-	-
Euro 2	January 1996	2.2	-	-	0.5	-	-
Euro 3	January 2000	2.3	-	0.15	-	-	-
Euro 4	January 2005	1.0	-	0.08	-	-	-
Euro 5	September 2009	1.0	0.068	0.060	-	0.005	-
Euro 6	September 2014	1.0	0.068	0.060	-	0.005	6.0 × 10 ¹¹

Actualmente en Europa, solo pueden comercializarse vehículos con esta última etiqueta. Por tanto, los fabricantes de vehículos se ven forzados a cumplir con unos objetivos cada vez más estrictos en lo que a emisiones se refiere. Sin embargo, a raíz de esto también se produjo en septiembre de 2015 el famoso 'Dieselgate' que sacudió a Volkswagen, cuando se descubrió que algunos modelos llevaban instalado un software que les permitía superar los controles a los límites de NO_x cuando en realidad las emisiones estaban muy por encima de estos límites [22].



3.1.2. Etiquetas de la DGT

En España, la DGT estableció un nuevo sistema de clasificación de los vehículos del parque automovilístico en abril de 2014 [23]. Esta clasificación se compone de 4 grupos de vehículos según su nivel de emisiones, en concordancia con los estándares “Euro” de la UE. En la Tabla 6 se resume esta clasificación de los vehículos en cada etiqueta:

Tabla 6: Clasificación de vehículos en España por etiquetas de la DGT según su tecnología [23]

Etiqueta	Turismos, furgonetas ligeras y vehículos > 8 plazas	Otros
Cero Emisiones	<ul style="list-style-type: none">– Eléctricos con batería (BEV)– Eléctricos de autonomía extendida (REEV)– Híbridos enchufables con autonomía > 40km (PHEV)	<ul style="list-style-type: none">– Ciclomotores– Triciclos– Cuadriciclos– Motocicletas
ECO	<ul style="list-style-type: none">– Híbridos no enchufables (HEV)– GNC, GNL y GLP	-
C	<ul style="list-style-type: none">– Gasolina: Euro 4,5,6– Diésel: Euro 6	-
B	<ul style="list-style-type: none">– Gasolina: Euro 3– Diésel: Euro 4,5	-

La DGT ha realizado esta clasificación colaborando con los Ayuntamientos de Madrid y Barcelona y la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), entre otras instituciones. El objetivo es poder clasificar el parque completo y poder ofrecer beneficios e incentivos a los vehículos menos contaminantes. Por ejemplo, los vehículos con etiqueta *Cero Emisiones* ya pueden circular por el carril Bus – VAO.

3.1.3. Parque automovilístico

A pesar de que, como se ha señalado en el apartado 3.1.1, en Europa y por tanto también en España solo se permite la comercialización de vehículos con etiqueta *Euro 6*, la realidad es que el parque de vehículos español es de los más antiguos de Europa con una edad media de aproximadamente 12 años en 2016 [24]. En consecuencia, el problema a corto plazo es que los vehículos en circulación son en algunos casos muy antiguos y con unos niveles de emisiones NO_x muy elevados.

Para poder calcular las emisiones procedentes del tráfico rodado se ha seguido el procedimiento del documento “*Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera*



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

1990-2012. *Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP*” del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) [10]. El primer paso necesario es clasificar los vehículos según sus factores de emisión (g NO_x/km).

Accediendo al portal estadístico de la DGT [25], se han obtenido los datos del parque de vehículos de la **Comunidad de Madrid**, a fecha de diciembre de 2017. Los vehículos están clasificados según:

- Año de matriculación: desde 1993 hasta 2017.
- Tipo de vehículo (6 categorías): Autobuses, Camiones, Ciclomotores, Furgonetas, Motocicletas y Turismos
- Carburante (4 categorías): Diésel, Eléctrico, Gas Natural y Gas Licuado de Petróleo (GNC, GNL y GLP), y Gasolina.

El portal de datos de la DGT no permite añadir a esta categoría los vehículos híbridos eléctricos, y además, se ha decidido omitir los otros carburantes como el hidrógeno, etanol o biometano (que no se considerarán al ser un número despreciable en el parque). En el caso de los coches híbridos, se desconoce si la DGT los ha clasificado como vehículos eléctricos o diésel/gasolina. A efectos de las emisiones NO_x, en escenarios futuros de renovación del parque, se han tratado como equivalentes los coches híbridos y los de gas natural.

En la Figura 8 se resume la distribución del parque según cada tipo de vehículo.

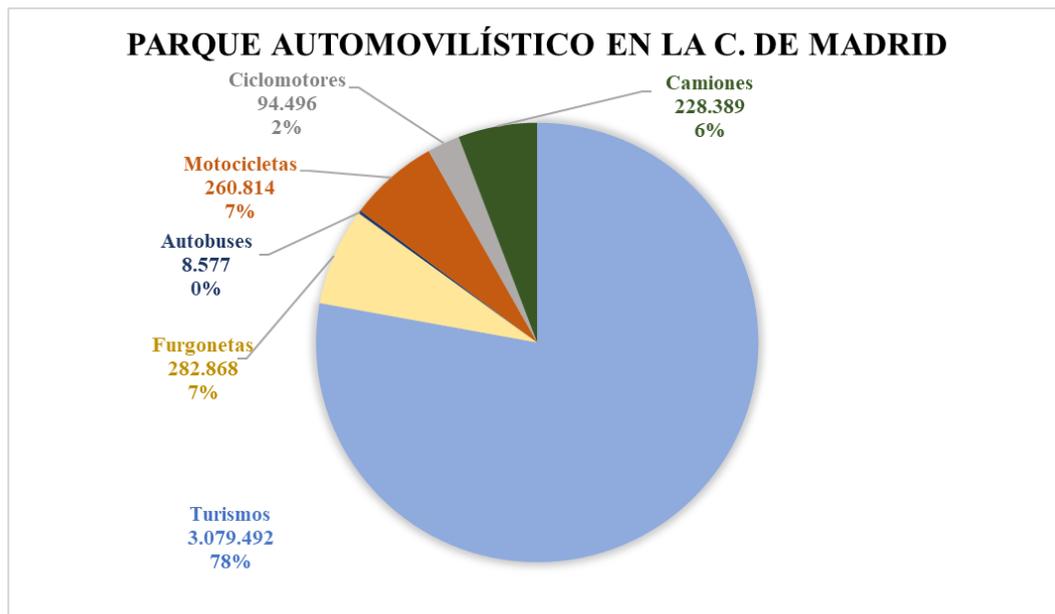


Figura 8: Parque automovilístico de la Comunidad de Madrid según tipo de vehículo

Como era de esperar, los turismos son los predominantes en el parque automovilístico, y el resto de los vehículos tienen cuotas menores en el parque. Sin embargo, a la hora de calcular las emisiones reales de cada vehículo, habrá que determinar el parque circulante real en el interior de la M-30.

Por ejemplo, aunque los autobuses son residuales en el parque, éstos recorren muchos más kilómetros al día. Si a esto se añade que sus emisiones también son mayores que las de los turismos, se prevé una contribución significativa por su parte al inventario de emisiones NO_x.

3.1.4. Factores de emisión NO_x

Como se ha comentado, a cada tipo de vehículo le corresponde, según su antigüedad y carburante, unos factores de emisión NO_x/km distintos en cada caso. La ya citada guía de cálculo del Ministerio, [10], obtiene estos factores de las directivas de la UE que limitan las emisiones máximas de los vehículos (las etiquetas “Euro” en el caso de los turismos).

Los límites que se aprueban en cada normativa deben ser cumplidos por los fabricantes, y por tanto son un indicador de las emisiones máximas de los vehículos.



3.1.4.1. Estándares Euro según la categoría del vehículo

La normativa *Euro* distingue los límites a las emisiones según el tipo de combustión del motor. Por un lado, están los motores de encendido por chispa (los que utilizan gasolina o gas natural como combustible), y por otro los de encendido con aire comprimido (los motores diésel). Para simplificar los datos y también por falta de información, se considera que las emisiones de gas natural son iguales independientemente de que el combustible GLP, GNC o GNL. Por tanto, el combustible denominado Gas Natural de ahora en adelante, engloba a estos tres.

3.1.4.1.1. Turismos y vehículos ligeros

En la Tabla 7 se muestran las emisiones permitidas a los turismos y a vehículos ligeros de clase II (furgonetas) en la UE desde la publicación del primer estándar *Euro* en 1992 para estas dos categorías de vehículos. Los estándares *Euro* de la categoría N1 (furgonetas) se publicaron un año después a cada estándar *Euro* de la categoría M1 (turismos).

Tabla 7: Emisiones de NO_x de turismos (Categoría M1) y vehículos ligeros (Categoría N1, Clase II) según tipo de combustible y antigüedad [26]

Combustible	Antigüedad y normativa	g NO _x /km	
		Turismos (M1)	Furgonetas (N1, Clase II)
Diésel	Euro 1 (1992)	0,97	1,4
	Euro 2 (1996)	0,7	1
	Euro 3 (2000)	0,5	0,65
	Euro 4 (2005)	0,25	0,33
	Euro 5 (2009)	0,18	0,235
	Euro 6 (2014)	0,08	0,105
Gas Natural		0,06	0,075
Eléctricos		0	0



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Gasolina	Euro 1 (1992)	0,97	1,4
	Euro 2 (1996)	0,5	0,65
	Euro 3 (2000)	0,15	0,18
	Euro 4 (2005)	0,08	0,1
	Euro 5 (2009)	0,06	0,075
	Euro 6 (2014)	0,06	0,075

Las emisiones de vehículos eléctricos son nulas al no haber combustión, y a las de gas natural les corresponde el mismo límite que la normativa *Euro 6* de gasolina ya que la combustión es igual. En la práctica, las emisiones reales de los vehículos de gas deberían ser menores que las de un motor de gasolina, pero a falta de más información sobre las emisiones reales y dada la baja penetración del gas natural en el parque de turismos, se han considerado equivalentes.

En la Figura 9 se presenta el desglose del número de turismos y vehículos ligeros según su tipo de combustible para justificar la simplificación anterior:

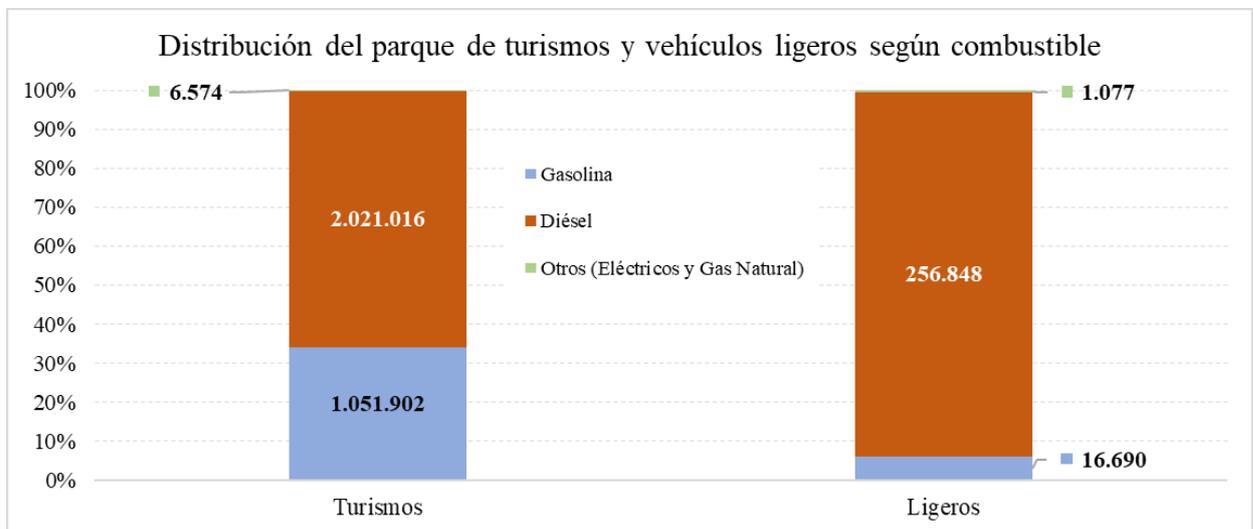


Figura 9: Desglose del número de turismos y vehículos ligeros en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible [25]



3.1.4.1.2. Motocicletas

En la Tabla 8 se presentan las emisiones permitidas en motocicletas de dos ruedas sin sidecar según sus correspondientes estándares Euro.

Tabla 8: Emisiones de NO_x de motocicletas de dos ruedas sin sidecar (Categoría L3e) según tipo de combustible y antigüedad [27]

Combustible	Antigüedad y normativa	g NO_x/km
Gasolina	Euro 1 (1999)	0,5
	Euro 2 (2004)	0,3
	Euro 3 (2006)	0,15
	Euro 4 (2017)	0,07
Gas Natural		0,07
Eléctricas		0

La normativa no establece unos factores de emisión para motos diésel, por lo que no se calcularán sus emisiones. Además, igual que antes, se asume que las emisiones de motores de gas natural son las mismas que las de motores gasolina. Estas dos simplificaciones son válidas ya que se comprueba en la Figura 10 que prácticamente todas las motos del parque son de gasolina.



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

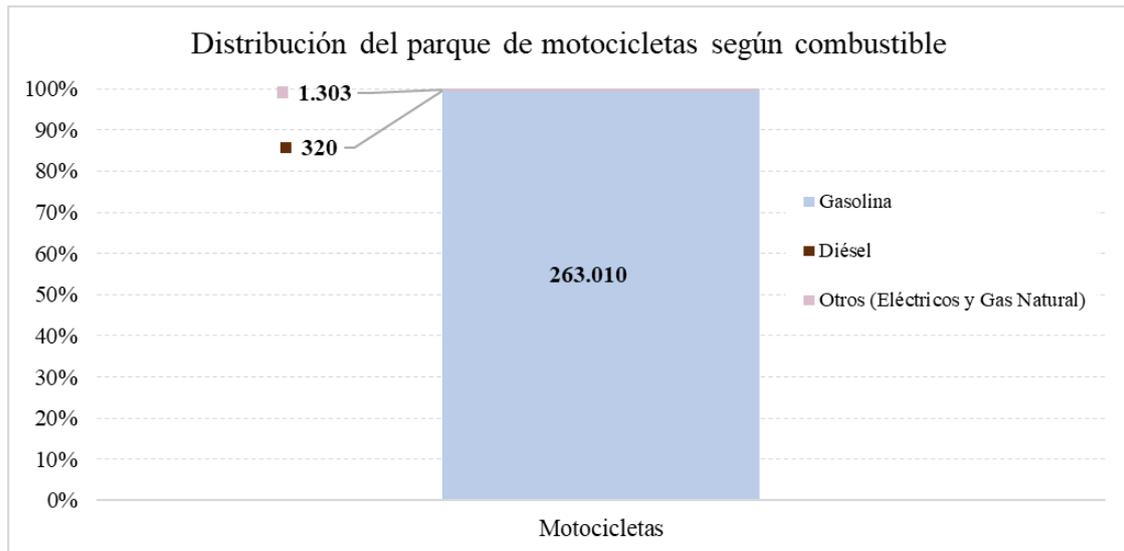


Figura 10: Desglose del número de motocicletas en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible

3.1.4.1.3. Autobuses y camiones pesados

Por último, se muestran en la Tabla 9 las restricciones de emisiones NO_x para vehículos pesados de motor diésel. Dentro de esta categoría se encuentran los autobuses y camiones pesados.

Tabla 9: Emisiones de NO_x de vehículos pesados de motor diésel (Categorías N2 y N3) según tipo de combustible y antigüedad [26]

Combustible	Antigüedad y normativa	g NO _x /kWh
Diésel	Euro I (1992)	8
	Euro II (1996)	7
	Euro III (2000)	5
	Euro IV (2005)	3,5
	Euro V (2008)	2
Gas Natural		0,67
Eléctricos		0



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

En este caso particular las emisiones para motores de encendido por chispa (gas natural y gasolina) no están especificadas en las normativas *Euro*. Por tanto, se han estimado como un 33% del límite Euro V [28].

Es importante resaltar que la UE establece los límites de emisiones en función de la potencia del motor y el consumo, en g/kWh. Dado que posteriormente se va a disponer de datos de kilómetros recorridos diariamente para cada tipo de vehículo, es necesario convertir estos factores a g/km.

Un estudio de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EEUU) que data de julio de 2008 [29] calculó un coeficiente de emisiones promedio para autobuses urbanos con motor diésel de 14,793 g NO_x/milla. Para obtener este número, se realizaron simulaciones por ordenador utilizando el parque de autobuses existente en EEUU en esa fecha.

Al no disponer de más información relativa sobre el método de cálculo ni el parque de autobuses de EEUU en 2008, se va a utilizar este factor de emisión como promedio para los autobuses y camiones anteriores a la normativa *Euro V* (2008). Así, la nueva Tabla 10 muestra los factores de emisión en gramos por kilómetro:

Tabla 10: Emisiones NO_x estimadas en g/km para vehículos pesados de motor diésel

Combustible	Antigüedad y normativa	g NO _x /km
Diésel	Euro I (1992)	9,19
	Euro II (1996)	9,19
	Euro III (2000)	9,19
	Euro IV (2005)	9,19
	Euro V (2008)	3,19
Gas Natural		1,04
Eléctricos		0

Las emisiones de vehículos *Euro I a IV* comparten el mismo factor de emisión promedio que calculó la EPA. Para calcular los dos factores de emisión (f.e) correspondientes a

Diésel *Euro V* y Gas Natural se han utilizado las siguientes fórmulas, basadas en una media ponderada de los factores de emisión en g/kWh:

$$f \cdot e_{Euro V} \left(\frac{g}{km} \right) = 9,19 \left(\frac{g}{km} \right) * \frac{f \cdot e_{Euro V} \left(\frac{g}{kWh} \right)}{\text{promedio} \left(f \cdot e_{Euro I,II,III,IV} \left(\frac{g}{kWh} \right) \right)} = 3,19 \left(\frac{g}{km} \right)$$

$$f \cdot e_{Gas Natural} \left(\frac{g}{km} \right) = 33\% * f \cdot e_{Euro V} \left(\frac{g}{km} \right) = 1,04 \left(\frac{g}{km} \right)$$

Por último, se muestra la Figura 11 donde se ve que el diésel es la tecnología predominante y la gasolina es residual en estos vehículos. En los últimos años han aparecido los autobuses de gas natural comprimido y algunos eléctricos

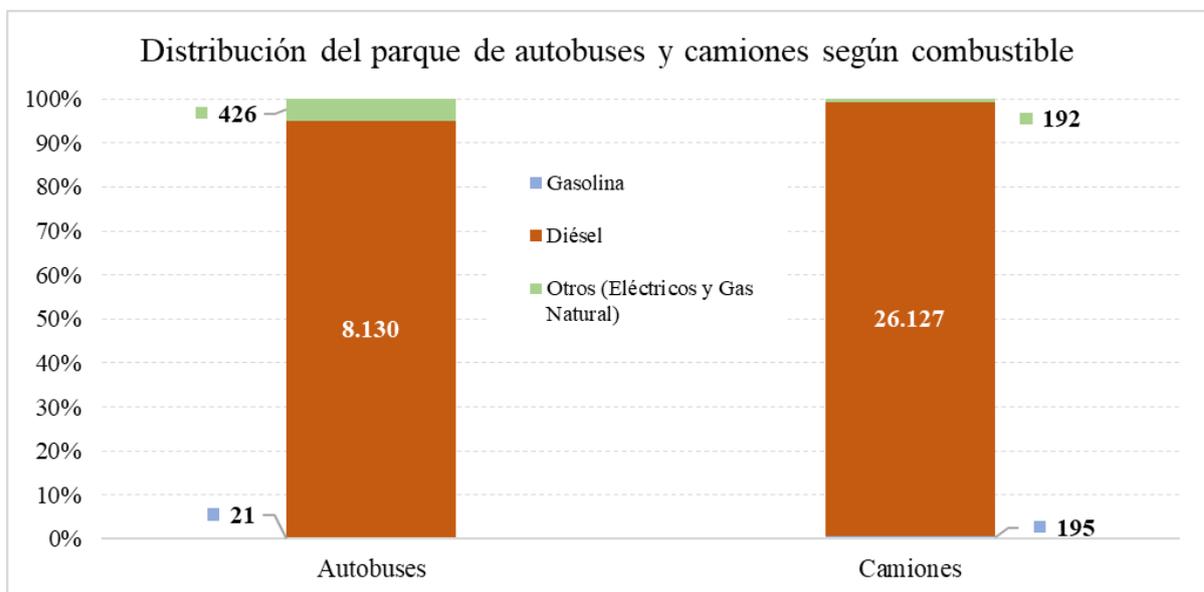


Figura 11: Desglose del número de autobuses y camiones en el parque DGT de la Comunidad de Madrid según el tipo de combustible [25]

3.1.4.2. Pautas de conducción

Los factores de emisión que se han comentado en el apartado anterior son un buen punto de partida para estimar las emisiones reales en circulación. Para poder estimar las emisiones de una forma más real, hay que considerar un estilo de conducción que refleje unos hábitos reales. El ciclo de conducción al que se someten los fabricantes de vehículos para pasar los controles de la UE es el NEDC (New European Driving Cycle), mostrado en la Figura 12:

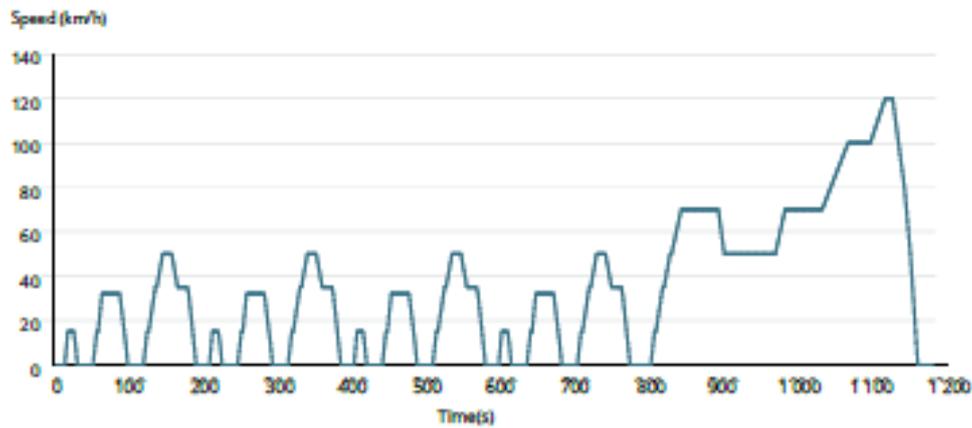


Figura 12: Perfil de velocidad del ciclo de conducción NEDC [21]

El ciclo NEDC consiste en 5 ciclos urbanos que se repiten y luego un trayecto interurbano a mayor velocidad. El ciclo es bastante sencillo, con rampas de aceleración y deceleración muy uniformes, y tramos largos a velocidad constante. Por ello, ha sido objeto de duras críticas al no representar unas pautas de conducción suficientemente reales, y que facilita los fabricantes esconder las emisiones reales de sus automóviles.

Para una estimación más real de las emisiones, se han desarrollado ciclos de conducción basados en patrones reales, entre los que se encuentra el CADC (Common Arthemis Driving Cycle). Este ciclo se basa en un análisis estadístico de distintas formas de conducción registradas en bases de datos europeas [21]. El resultado es un modelo más dinámico que el NEDC, tal como se puede ver en la Figura 13, que muestra el ciclo CADC completo:

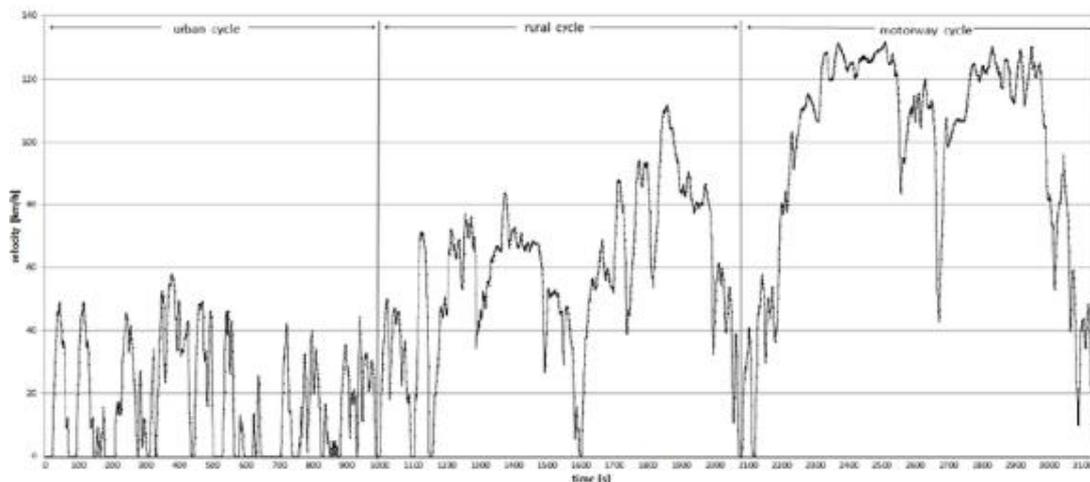


Figura 13: Perfil de velocidad del ciclo de conducción CADC [30]

En su artículo sobre emisiones del tráfico rodado [21], la EEA señala que las emisiones de NO_x aumentan significativamente al calcularlas empleando al ciclo CADC, especialmente en los vehículos que tienen que cumplir los estándares “Euro” más recientes y estrictos. En la Tabla 11 se observa como aumentan las emisiones NO_x al utilizar el ciclo CADC sobre las emisiones originales, con el ciclo NEDC.

Tabla 11: Coeficiente de aumento de emisiones NO_x utilizando el ciclo CADC respecto al NEDC [30]

Ratio CADC/NEDC	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
PETROL 	1.07	1.38	1.88	1.62	1.96	1.50	n.a.
DIESEL 	1.22	1.13	1.64	1.88	3.16	3.52	4.80

De esta tabla se desprende que los fabricantes se han especializado en superar un test concreto y así cumplir con la normativa europea. Sin embargo, las emisiones reales cada vez se alejan más de las que marcan los estándares europeos, y, por tanto estos coeficientes se tendrán en cuenta en la estimación de las mismas, en el caso de turismos y de vehículos ligeros, que son los vehículos en los que se utiliza el test NEDC. Es especialmente llamativo que las emisiones de los diésel *Euro 6* son cerca de 5 veces superiores a las teóricas.

En la Figura 14 se puede ver de forma gráfica la diferencia entre las emisiones teóricas que fijan las normas *Euro* y las reales, teniendo en cuenta el *Cycle Beating*.

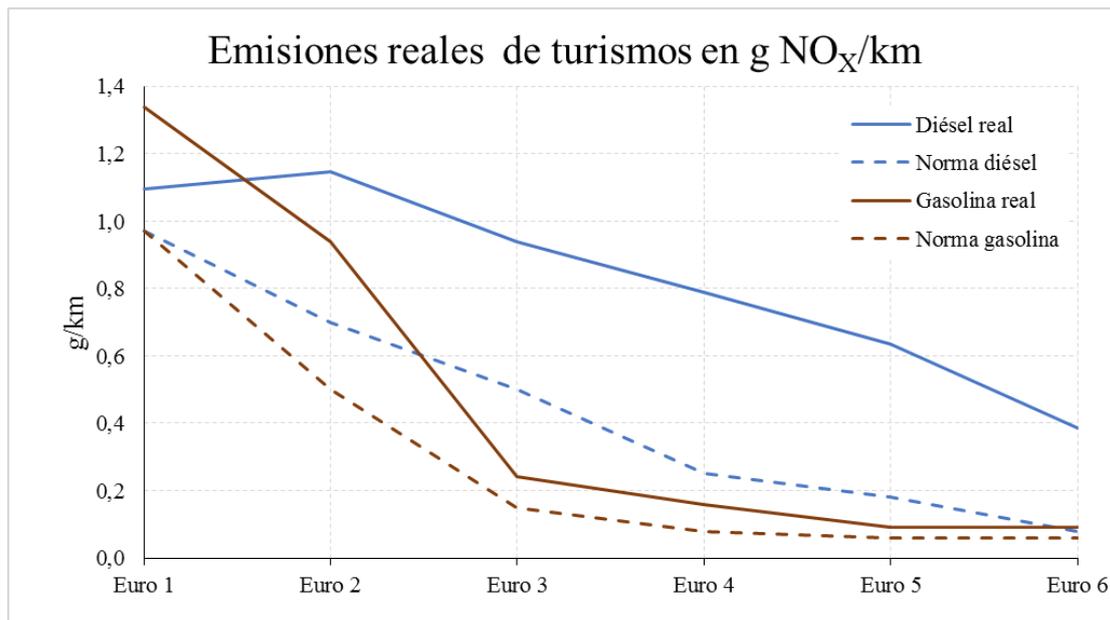


Figura 14: Factores de emisión reales, considerando las penalizaciones al Test NEDC de la Tabla 11

3.1.5. Parque circulante

Una vez caracterizado el parque automovilístico y las emisiones correspondientes a sus vehículos, queda conocer el parque circulante real en la ciudad de Madrid. En su guía de cálculo de emisiones del transporte [10], el Ministerio de Medio Ambiente utiliza datos anuales del tráfico en la red de carreteras de toda España, calculando las emisiones asociadas según los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo y el consumo de combustible.

En este trabajo se necesita enfocar más el cálculo a un área mucho más local como es la ciudad de Madrid y concretamente el interior de la M-30. Para ello, se ha recurrido a un estudio sobre el parque circulante llevado a cabo por la Universidad Politécnica de Madrid y la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial [12].

En dicho estudio se recogieron datos desde el lunes 27/03/2017 hasta el jueves 06/04/2017 (ambos incluidos), contando con la colaboración del Ayuntamiento de Madrid y la DGT. Los principales datos sobre el método y resultados del estudio son los siguientes:

- Se dividió el término municipal de Madrid en 5 zonas, distintas de las que define el Ayuntamiento para evaluar la contaminación NO₂, según la Figura 15:

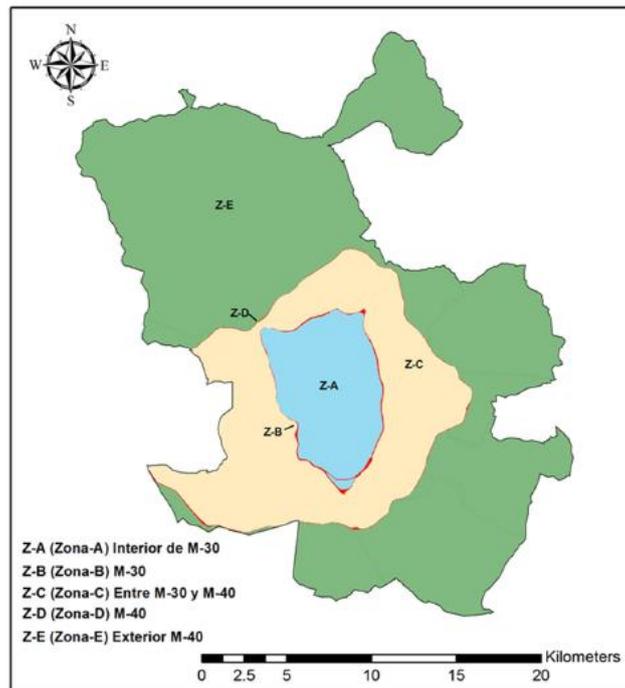


Figura 15: Zonas de estudio del tráfico en Madrid [31]

- Se registraron un total de 8.560.383 vehículos, correspondientes a 1.777.065 matrículas, en los 10 días que duró la recogida de datos.
- La captura de matrículas se hizo con cámaras de tráfico y cámaras foto-rojo (de los semáforos) en el caso de la zona A (interior de la M-30), en zonas representativas.

Finalmente, los resultados obtenidos de este estudio se presentan en la Tabla 12, donde se puede ver la distribución en porcentaje de cada tipo de vehículo en la zona de interés para este trabajo; el interior de la M-30 (zona A en azul en el mapa anterior).

Tabla 12: Parque circulante de Madrid y distribución según tipo de vehículo y combustible [31]

TIPO DE VEHÍCULO	ZONA A (interior M-30)	
	Muestreo	Matrículas/día
Turismos	72,13%	77.559
Gasolina	21,77%	23.409
Diésel	48,02%	51.634
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	2,33%	2.505
Vehículos ligeros (N1) Furgonetas	5,01%	5.387



Gasolina	0,09%	97
Diésel	4,88%	5.247
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,04%	43
Vehículos pesados (N2 y N3)	1,60%	1.720
Diésel	1,57%	1.688
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,03%	32
Autobuses	2,20%	2.366
Autobuses EMT	1,86%	2.000
Diésel	0,87%	1.043
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	1,00%	939
Autobuses no EMT	0,33%	355
Diésel	0,27%	290
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,07%	39
Ciclomotores	0,34%	366
Gasolina	0,34%	366
Motocicletas	8,25%	8.871
Gasolina	8,18%	8.796
Eléctricas	0,07%	75
Taxis	10,47%	11.258
Diésel	6,62%	7.118
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	3,85%	4.140
TOTAL	100,00%	107.527
Gasolina	30,39%	32.677
Diésel	62,22%	66.903
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	7,39%	7.946

A falta de información precisa sobre el número total de vehículos en circulación que se registraron cada día en cada zona (en azul), se ha estimado este número suponiendo que los 2000 autobuses que componen la flota de la EMT [32] circulan diariamente por Madrid. Esto hace un total de 107.527 matrículas distintas circulando cada día.

Para contrastar el número, se pueden comprobar las intensidades medias diarias de tráfico en día laborables, en el banco de datos del Ayuntamiento [33]. En el año 2016, la media de intensidad de tráfico diaria fue de aproximadamente 300.000 vehículos. No obstante, se ha descartado este dato al ser incompatible con los datos de muestreo de la Tabla 12 (se tendrían 6.000 autobuses EMT circulando diariamente cuando realmente solo hay 2.000 en la flota). Posteriormente, en el apartado 3.1.6.2 se discuten las implicaciones de esta decisión.

En la



Tabla 20 del Anexo I se puede ver la tabla completa con el desglose adicional del parque circulante según la antigüedad y los kg de NO_x emitidos diariamente. Este desglose adicional de los vehículos según su antigüedad (para clasificarlos según el estándar de emisiones Euro que les corresponde), se ha realizado prorrateando en función la antigüedad del parque de la DGT.

3.1.5.1. Recorridos diarios según tipo de vehículo

Finalmente, solo queda conocer los kilómetros diarios que recorre cada tipo de vehículo. En algunos casos, se ha podido extraer un número de fuentes fiables, y en otros ha habido que realizar suposiciones por la falta de información:

- **Turismos:** Se ha estimado una media de 70 km diarios realizados en coche. El dato procede de un estudio de la Comisión Europea en el que se recogieron datos de encuestas realizadas a conductores españoles y de otros países europeos [34].
- **Vehículos ligeros (Furgonetas):** Al no disponer de datos de circulación para esta categoría se han estimado también 70 km/día. Son vehículos de similar tamaño a los turismos y se ven con asiduidad en el centro la ciudad transportando bienes y mercancías.
- **Vehículos pesados (Camiones):** También por falta de información se han estimado 10 km al día para esta categoría. Aunque los camiones hacen largos recorridos en su función de transporte de mercancías, en el interior de la ciudad son poco frecuentes ya que se sustituyen por furgonetas más pequeñas. Al ser muy residuales dentro del parque circulante, el error cometido por esta estimación será pequeño en cualquier caso.
- **Autobuses EMT:** En la página web de la EMT [32] se dan los siguientes datos:
 - Flota: 2000 autobuses
 - Kilómetros recorridos al año: 90 millones

Por tanto, operando 365 días al año, sale un total de 123,3 km al día recorridos por cada autobús.



- **Autobuses no EMT:** No se dispone de información relevante, pero sabiendo que estos autobuses son generalmente autobuses interurbanos o de compañías privadas que transportan pasajeros a otras ciudades de España, su recorrido en el interior de la ciudad será muy corto en cualquier caso. Por tanto, se han estimado también 10 km al día.
- **Motocicletas:** Tampoco se dispone de suficiente información para estos vehículos, pero se estima que, de media las motos recorren un total de 5000 kilómetros al año, que equivalen a aproximadamente 15 km/día.
- **Taxis:** Aquí sí se dispone de información sobre sus recorridos, procedente de un estudio del servicio de taxi del Ayuntamiento de Madrid [35]. En él se recogen los siguientes datos sobre las carreras medias diarias de los taxis, que se resumen en la Tabla 13:

Tabla 13: Datos de las carreras de los taxis en Madrid [35]

Licencias explotadas a un turno	94,69%
Laborable (km)	207,96
Festivo (km)	214,91
Licencias explotadas a doble turno	5,31%
Laborable (km)	302,23
Festivo (km)	305,02

Para simplificar se ha hecho una media ponderada de estos datos, que arrojan un promedio de 214,9 km diarios recorridos por los taxis.

3.1.6. Modelo de Emisiones NO_x del parque circulante

Una vez reunidos todos los datos necesarios, se han calculado las emisiones totales del parque circulante en el interior de la M-30:

- Emisiones diarias: **5.833 kg de NO_x**
- Emisiones anuales: **2.129 ton de NO_x**

Para tener una idea de lo razonable que pueda ser esta estimación, se ha comparado el resultado de emisiones anuales con las del municipio entero de Madrid (las 5 zonas de tráfico de la Figura 1). En el Plan A [9], se estima que en el año 2014, las emisiones

totales NO_x fueron 7.012 toneladas. Esto implica que la zona interior de la M-30 contribuye aproximadamente con un 30% al total, lo cual puede ser aceptable teniendo en cuenta que hay otras 4 zonas que no se han considerado en este trabajo.

Finalmente, se muestra en la Figura 16 el peso relativo de cada tipo de vehículo en las emisiones totales:

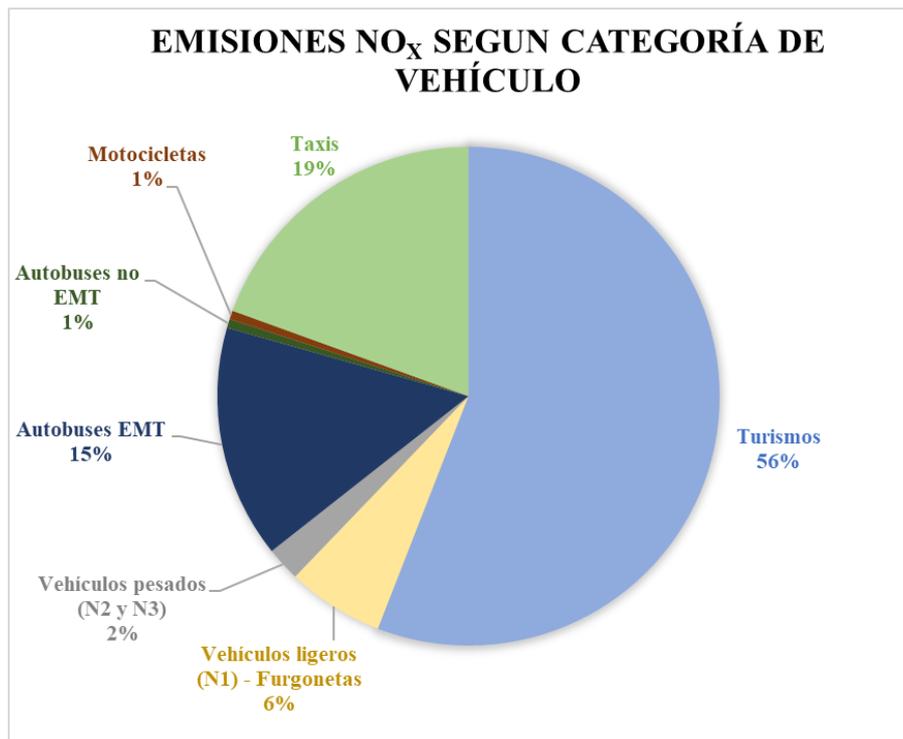


Figura 16: Emisiones según el tipo de vehículo

Como ya se comentó al ver la distribución del parque completo de la DGT, los autobuses acaparan una gran proporción de las emisiones al hacer más trayectos al día que el resto de los vehículos, igual que los taxis. Aun así, los turismos siguen siendo el principal problema por el gran volumen de coches, sobre todo con motores diésel que transitan. Muchas de las medidas que se proponen en el Plan A tienen a estos 3 grupos (taxis, flota EMT y turismos) como principal objetivo para reducir las emisiones.

3.1.6.1. Modelo de emisiones diarias

Con el dato promedio de 5.833 kg NO_x emitidos diariamente por los vehículos en circulación, se han estimado unos valores diarios de emisiones que puedan reflejar la aleatoriedad del tráfico de un día para otro. Dado que son muchísimos los factores que



intervienen en las emisiones diarias del tráfico (estilo de conducción personal, meteorología, accidentes y otras circunstancias singulares), se ha recurrido a la distribución normal para modelar todos estos factores sobre los que no se tiene control alguno.

Utilizando la función *aleatorio* de Excel y asignando una desviación típica del 5% al valor de referencia de las emisiones, se ha construido una nube de puntos para predecir las emisiones del tráfico cada día durante dos años enteros (2016 y 2017). Los resultados se presentan en la Figura 17:

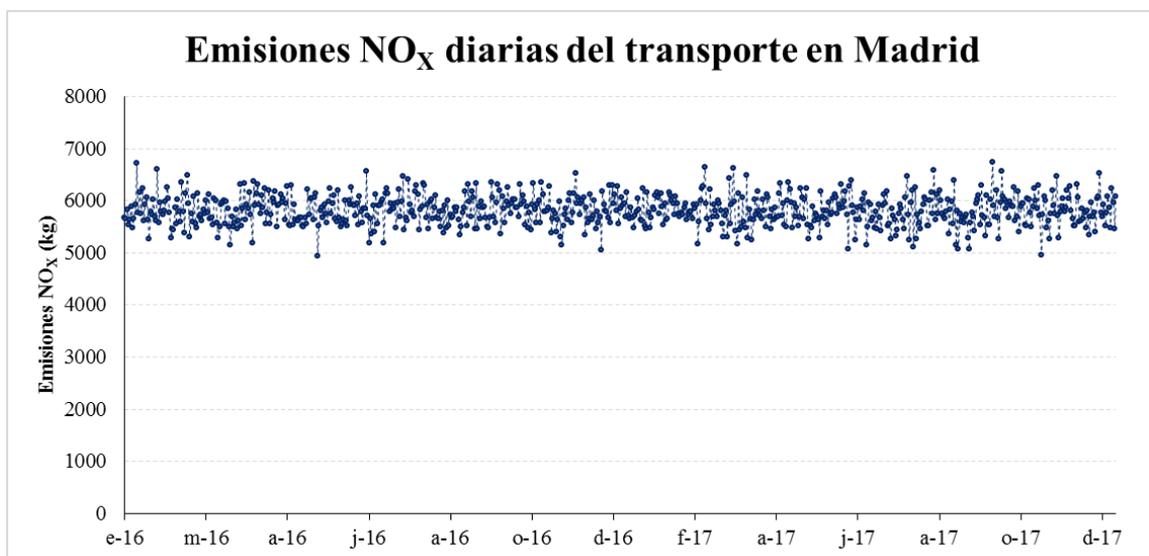


Figura 17: Emisiones NO_x diarias del Grupo SNAP 07: Transporte por carretera

Estos datos se utilizarán más adelante para calcular la influencia de las emisiones del tráfico en los niveles de NO₂ en la atmósfera, como ya se comentó en el apartado 0.

3.1.6.2. Limitaciones

Para llegar al resultado final que se muestra en la Figura 17 se han realizado distintas simplificaciones. Algunas se han ido comentando a medida que se avanzaba, pero a continuación se van a exponer las principales limitaciones de este modelo.

En lo relativo al parque circulante, se han tenido que hacer estimaciones gruesas de los kilómetros diarios recorridos por cada vehículo. Esto se ha señalado individualmente en cada caso (ver apartado 3.1.5.1). Para saber el número de kilómetros exactos que recorre cada día un vehículo habría que hacer un seguimiento individual.



Otra simplificación tiene que ver con los datos que aportaba el estudio del parque circulante de Madrid [31], que son muestreos de vehículos (matrículas individuales) que pasaron por un punto donde había una cámara que lo registraba, en los 10 días que duró el estudio. Por tanto, se conoce la proporción (los porcentajes de la Tabla 12) de vehículos que circularon de media en ese periodo. A partir de estos porcentajes se ha estimado el número aproximado de vehículos que circulan cada día porque se conocen los datos de la flota EMT.

También se ha asumido que los coches en circulación realizan sus recorridos únicamente dentro de la zona 1, lo cual no tiene porqué ser cierto siempre. Si se tuvieran en cuenta únicamente los kilómetros desplazados dentro de la M-30, el resultado sería menores emisiones de las que se han calculado.

Por otro lado, también es cierto que el número real de vehículos que transitan por la zona 1 es mucho mayor. Según los datos del propio Ayuntamiento de Madrid [33], la intensidad media diaria del tráfico es de aproximadamente 300.000 vehículos en el interior de la M-30. En consecuencia, esto haría aumentar las emisiones calculadas aumentarían al haber más automóviles en circulación.

En conclusión; este modelo de emisiones del tráfico tiene limitaciones que conviene señalar y tener presentes cuando se evalúen los resultados posteriores. Sin embargo, aunque es imposible calcular las emisiones con total precisión (con la información disponible), sí se ha podido obtener un valor razonable de emisiones del tráfico, desglosadas según los distintos tipos de vehículos del parque circulante. **A partir de esta estimación se puede evaluar el impacto de las medidas que propone el Plan A en la composición del parque circulante y en la calidad del aire en Madrid.**

3.2.SNAP 02: Sistemas de combustión no industriales

El grupo SNAP 02 es otra gran fuente de emisiones NO_x, especialmente en las ciudades. En esta categoría la guía de cálculo del Ministerio de Medio Ambiente [10] considera tres sectores:

- Sector comercial e institucional
- Sector residencial



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

- Sector agricultura, selvicultura y acuicultura

De éste último no se van a considerar sus emisiones, al estar enfocado el trabajo en la contaminación del área interior a la M-30. Para los otros dos, el Ministerio de Medio Ambiente calcula las emisiones NO_x anuales en base a la energía consumida según el tipo de combustible empleado. Los datos de consumo para el año 2012 en el sector institucional y comercial y el residencial se muestran en la Tabla 14:

Tabla 14: Consumo energético total de España del año 2012 en miles de GJ del grupo SNAP 02 [10]

Combustible	Sector comercial e institucional (miles de GJ)			Sector residencial (miles de GJ)
	Calderas	Turbinas de gas	Motores estacionarios	Calderas
Hulla	2.882	-	-	5.310
Lignito negro	-	-	-	-
Aglomerados de hulla	-	-	-	-
Coque	564	-	-	-
Coque de petróleo	33	-	-	-
Madera	2.902	-	-	102.943
Carbón vegetal	-	-	-	1.130
Fuelóleo	2.163	69	36	4.259
Gasóleo	42.303	7	4	59.784
Gas Natural	67.130	31.672	16.316	147.461
GLP	7.165	-	-	48.855
Biogás	-	-	-	-
Gas Manufacturado	60	-	-	6

Además de las calderas, en el sector comercial e institucional se utilizan turbinas de gas y motores estacionarios para cogeneración. Destaca el uso del gas natural en ambos sectores y de la madera (pellets) en las calderas de calefacción residenciales.

Con estos datos de consumo, el MAPAMA calcula el inventario de emisiones utilizando unos factores de emisión NO_x expresados en gramos por GJ de energía, que se presentan en la Tabla 15:

Tabla 15: Factores de emisión de los distintos combustibles para sistemas de combustión no industriales [10]

Combustible	g NO _x /GJ
Hulla	50



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Lignito negro	50
Aglomerados de hulla	50
Coque	50
Coque de petróleo	50
Madera	75
Carbón vegetal	50
Fuelóleo	50
Gasóleo	50
Gas Natural	38
GLP	57
Biogás	60
Gas Manufacturado	50

Estos factores de emisión no son tan precisos como los de los automóviles, ya que las emisiones reales de las calderas dependen entre otros de la antigüedad de éstas y de su sobredimensionamiento; cuanto más bajo es el grado de carga al que trabajan, peor rendimiento tienen. Los números de esta tabla son los valores medios dentro de un intervalo de emisiones posibles. También cabe señalar que la fuente a la que el MAPAMA ha recurrido para obtener estos datos es una edición del año 2007 del *Libro Guía EMEP/CORINAIR*, por lo que no se consideran las tecnologías más recientes, cuyas emisiones serán menores.

Sin embargo, a falta de más y mejor información, se han prorrateado los resultados de emisiones del año 2012 en España para el centro de la ciudad de Madrid utilizando los datos de población como factor de escala. Con esto se pretende un análisis más bien cualitativo que cuantitativo a la vista de que las incertidumbres en el cálculo de estas emisiones son ciertamente altas.

Los resultados se presentan en la Tabla 16, igual que los datos de población para el año 2012 [36]:



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Tabla 16: Emisiones NO_x de los sectores comercial e institucional y residencial estimadas en el centro de Madrid

	Población en 2012 (millones)	Emisiones Sector comercial e institucional (ton NO _x)	Emisiones Sector residencial (ton NO _x)
España	47,27	7.406,6	19.633,4
Madrid centro	0,985	154,4	409,2

Según un informe del IDAE sobre el consumo energético, procedente de la quema de combustibles³, del sector residencial en España [37], las actividades a las que se destina la energía del consumo de combustibles a lo largo del año son las siguientes:

- **Calefacción:** Es la principal fuente de consumo de los hogares con un 68,4% de la energía anual.
- **Agua Caliente Sanitaria:** Es la segunda fuente de consumo con un 25,1% del consumo anual.
- **Cocina:** Representa un 6,4% del consumo anual.
- **Refrigeración:** Su consumo es despreciable frente a los otros 3 (menos del 0,03%)

Con estos datos, tanto para el sector residencial como para el institucional y comercial (por falta de datos desagregados para este sector), se han desglosado las emisiones totales en diarias considerando lo siguiente:

- En los meses de frío/invierno (noviembre, diciembre, enero, febrero y las quincenas primera y última de marzo y octubre respectivamente), el consumo de energía incluye todas las actividades citadas anteriormente.
- El resto de los meses del año, no hay consumo de calefacción.

Como resultado, las emisiones NO_x procedentes de este grupo SNAP 02, tienen una clara estacionalidad, y su distribución estimada a lo largo de dos años se muestra en la Figura 18:

³ No se consideran por tanto los hogares que abastecen estas necesidades con electricidad

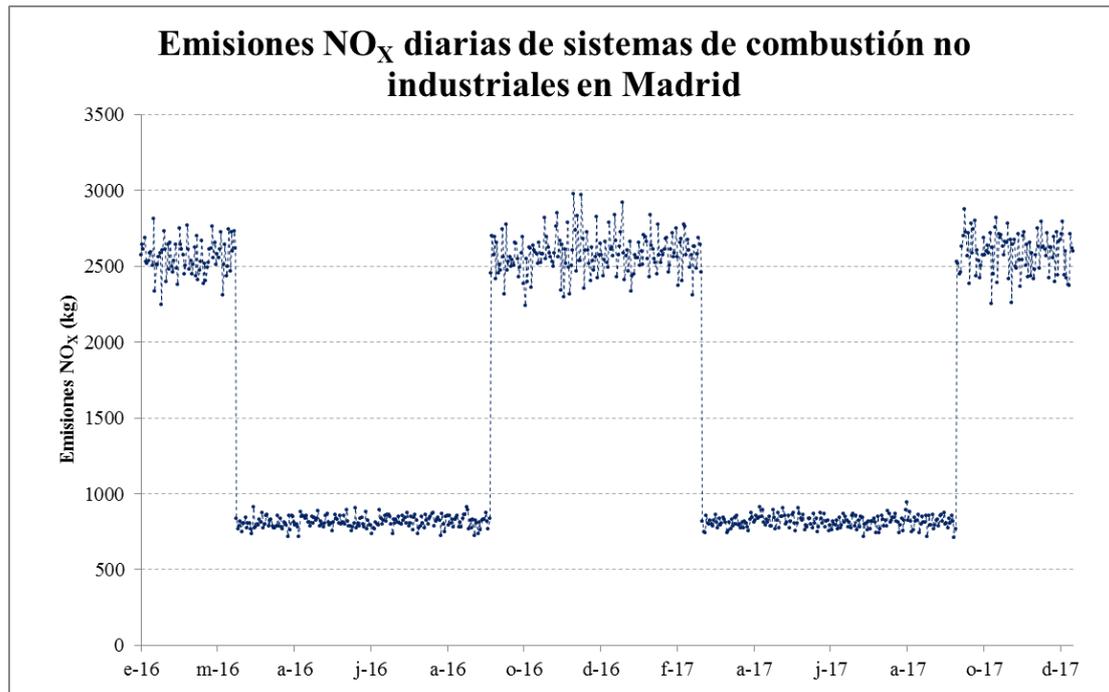


Figura 18: Emisiones NO_x diarias del Grupo SNAP 02: Sistemas de combustión no industriales

El procedimiento para crear esta curva ha sido el mismo que en el apartado 3.1.6.1 con las emisiones del transporte, utilizando la función “aleatorio” de Excel. Se ha asumido que el consumo tiene una distribución normal con valor medio de 2.578 kg NO_x/día en los meses de frío y 814 kg NO_x/día en los de calor, y con desviación típica del 5% en ambos casos para que la aleatoriedad no sea demasiado extrema.

El tránsito entre los meses de invierno y verano es muy abrupto y además se han extrapolado los datos del año 2012 del MAPAMA a los años 2016 y 2017 sin aplicar ningún factor de reducción. Esto se hace sobre todo por falta de más información sobre las emisiones en años más recientes, ya que dependen no solo de lo modernas que son las nuevas calderas, sino también de otras variables macroeconómicas que afectan al consumo energético y escapan del alcance de este trabajo.

Se asume que el error cometido en esta estimación al no tener mejores datos para calcular estas emisiones. Sin embargo, el objetivo final de calcular estas emisiones es sumarlas a las del transporte, con lo que su peso se diluirá, y ver el efecto combinado sobre la calidad del aire de forma cualitativa, añadiendo el componente estacional que tienen las emisiones de las calderas.

4. Modelo de regresión lineal

Finalmente, se ha calculado una regresión lineal utilizando Matlab, para determinar si se puede predecir la concentración de NO₂ en función de las emisiones NO_x y las condiciones meteorológicas citadas en el apartado 2.4. La muestra de datos comienza el 01/01/2016 y termina el 31/12/2017 (en total 731 días). Se ha empezado con una regresión lineal simple y después se han añadido coeficientes de segundo grado a la primera regresión para ver la mejora del modelo.

4.1. Regresión lineal simple

Para calcular el modelo de regresión se ha utilizado el programa de cálculo Matlab, dividiendo los datos en 2 Sets; *Training* y *Testing*. En el primero, de entrenamiento, se encuentra el 50% de los datos (correspondientes al año 2016). Con los datos de esta “sub-muestra”, el programa ajusta el modelo de regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. Los resultados se muestran en la Figura 19.

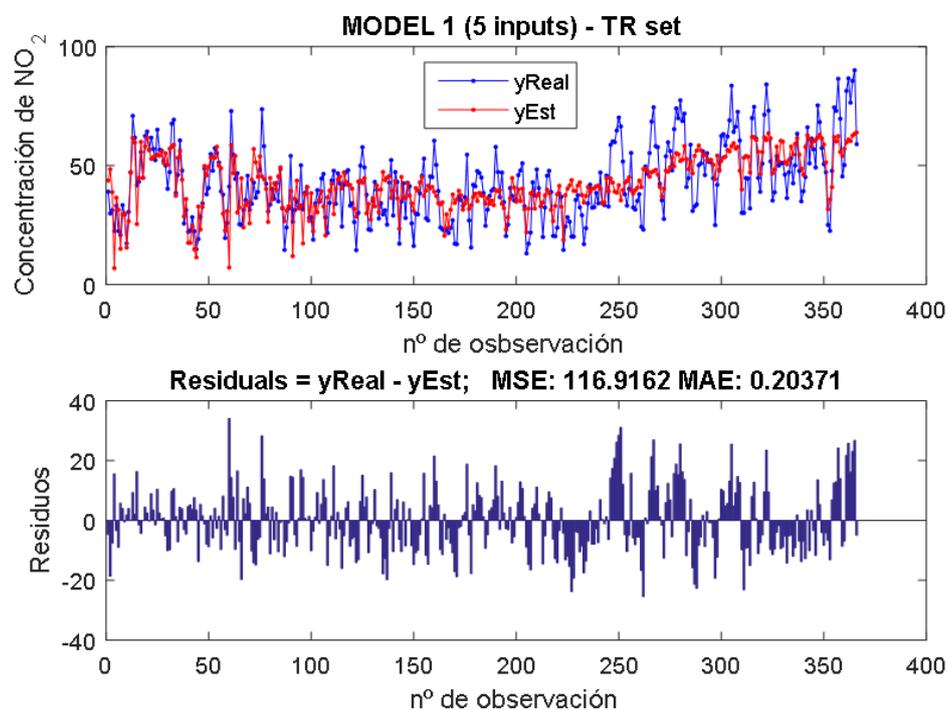


Figura 19: Representación del modelo de regresión en el set de entrenamiento

En el Set de Test están los datos del año 2017, que el programa no considera para calcular la ecuación de la regresión, sino que son utilizados para probar el rendimiento del modelo para predecir la variable de salida (concentración de NO₂) con datos desconocidos. Este desempeño del modelo se puede ver en la Figura 20:

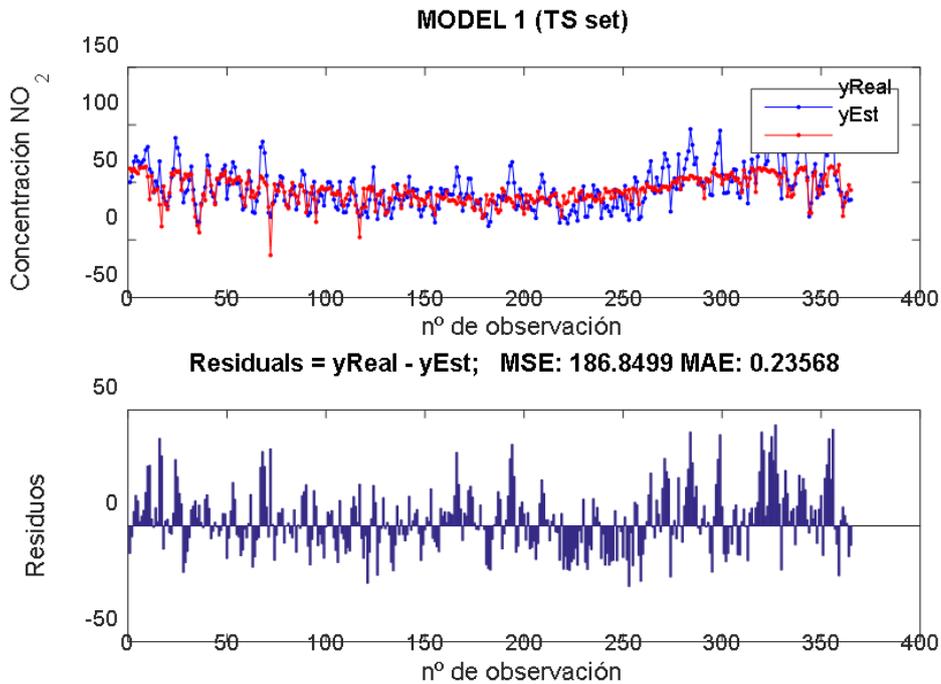


Figura 20: Representación del modelo de regresión en el set de test

El rendimiento del modelo de regresión es siempre peor en el segundo escenario con datos desconocidos. Esto se puede comprobar por simple inspección visual de las gráficas superiores de las dos figuras mostradas anteriormente, y queda evidenciado cuando se compara el error cuadrático medio (ECM o MSE, por sus siglas en inglés) de ambos escenarios (en los gráficos de barras inferiores). Con el set de entrenamiento, el MSE es 116,9 mientras que con el de test es 186,8.

Para poder afirmar que el modelo ajustado es bueno, el error cuadrático medio tiene que ser lo más parecido posible en ambas “sub-muestras”. Cuando esto ocurre, indica que la recta de regresión es útil para estimar valores futuros desconocidos. Cambiando los tamaños relativos de los sets de training y test, o aumentando el número de datos de las muestras se puede reducir esta diferencia entre los dos sets. Aun así, con el ratio de 50/50 es con el que mejores resultados se ha obtenido.



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Pero para entender en detalle como de apropiada es la regresión que se ha realizado, hay que analizar otros parámetros importantes. Éstos se muestran en la Figura 21, donde se puede ver una captura de los resultados de la simulación en Matlab:

```
Linear regression model:
Concentracion_NO2 ~ 1 + Condicion_TEMP + Condicion_VIENTO + Condicion_LLUVIA + Condicion_EMISIONES

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	38.934	7.2036	5.4049	1.1809e-07
Condicion_TEMP	-0.59721	0.10433	-5.7243	2.1859e-08
Condicion_VIENTO	-9.6912	0.57396	-16.885	1.4818e-47
Condicion_LLUVIA	-0.54204	0.1681	-3.2244	0.0013774
Condicion_EMISIONES	0.0037724	0.00080004	4.7152	3.455e-06

```

Number of observations: 366, Error degrees of freedom: 361
Root Mean Squared Error: 10.9
R-squared: 0.525, Adjusted R-Squared 0.52
F-statistic vs. Constant model: 99.7, p-value = 4.38e-57
MODEL 1 (5 inputs) - TR set ->> MSE: 116.9162 MAE: 0.20371
MODEL 1 (TS set) ->> MSE: 186.8499 MAE: 0.23568

```

Figura 21: Principales parámetros del modelo de regresión lineal simple, calculada utilizando los datos del Training Set

4.1.1. Relevancia del modelo

Se han resaltado los parámetros más importantes para explicar el modelo obtenido. En primer lugar, hay que fijarse en el Test de significatividad global F (*F-Statistic vs. Constant model*), resaltado en rojo. Este test comprueba el contraste de hipótesis de si el modelo de regresión con los inputs propuestos es significativo o no (comparado con la concentración promedio de NO₂). Al ser el p-valor asociado al test F mucho menor que cualquier nivel de significación comúnmente utilizados (1% o 5%), se puede decir que el modelo es válido. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula que indicaría que todos los coeficientes asociados a las variables de entrada no son significativos, esto es, debían ser cero, porque al menos uno de ellos es significativo para el modelo. De verificarse la hipótesis nula, el modelo de regresión no tendría relevancia alguna y habría que comenzar de nuevo, escogiendo nuevas variables de entrada.

4.1.2. Coeficientes de regresión

En segundo lugar, se pone el foco en los coeficientes de regresión que ha calculado Matlab, y su p-valor asociado (resaltados en azul). Como antes, el programa hace otro



test de significatividad individual (test-t) para cada coeficiente de regresión por separado. En cada contraste de hipótesis, si el p-valor asociado es suficientemente bajo (menor de 1% o 5%, según el nivel de significación que se requiera), se rechazará la hipótesis nula, por lo que la variable de entrada será considerada en el modelo y su coeficiente es distinto de cero. En este caso, el nivel de significación no importa porque todos los p-valores son menores de 0,01.

Así, el modelo de regresión obtenido es la siguiente ecuación de primer grado:

$$\widehat{NO_2} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = 38,934 - 0,597 * T_{med}(^{\circ}C) - 9,691 * v_{viento} \left(\frac{km}{h} \right) - 0,542 * Lluvia \left(\frac{L}{m^2} \right) + 0,0038 * NO_x(kg)$$

Los coeficientes de regresión de la ecuación reflejan el comportamiento esperado que se vio al analizar los coeficientes de correlación en el apartado 2.4; al aumentar la temperatura, el viento o la lluvia, disminuye la concentración de NO₂. En el caso de las emisiones, también se comprueba que, como es lógico, al aumentarlas aumenta la contaminación.

Sin embargo, estos coeficientes no son comparables entre sí ya que cada uno está expresado según las unidades de su variable de entrada asociada. Para evaluarlos entre sí, se han calculado los coeficientes de regresión estandarizados, según se especifica en [38]. Así, siendo β el coeficiente de regresión y σ la desviación típica en valores absolutos asociados a la variable de entrada i y la de salida j , los coeficientes de regresión estandarizados se calculan de la siguiente forma:

$$\beta_{estandarizado}^i = \beta_{absoluto}^i * \frac{\sigma^i}{\sigma^j}$$

En la Tabla 17 se pueden ver los coeficientes de regresión estandarizados, donde también se han incluido los coeficientes de correlación calculados en el apartado 2.4, comprobándose que son muy parecidos. Esto es así porque están relacionados y en el caso de una regresión con una variable de entrada y otra de salida, el coeficiente de correlación coincide con el de la pendiente de la recta. Cuando entran más variables en juego, los coeficientes de correlación cambian.



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Tabla 17: Coeficientes de regresión estandarizados

Input del modelo	Temperatura	Veloc. viento	Lluvia	Emisiones
Coeficiente de regresión estándar	-0,268	-0,555	-0,100	0,202
Coeficiente de correlación	-0,289	-0,558	-0,101	-

En el caso de las emisiones, el coeficiente obtenido es del orden de los demás factores, parecido en valor absoluto al de temperatura porque al incluir las emisiones de las calderas (que aumentan en invierno), la tendencia durante el año es inversa a la temperatura media (mayores emisiones y menor temperatura en invierno).

4.1.3. Coeficiente de determinación lineal (R^2)

Por último, queda evaluar la calidad del modelo; es decir, cuánto se explica con esta ecuación de primer grado la variabilidad que tiene la concentración de NO₂. El coeficiente de determinación R^2 es un buen primer indicador y además muy utilizado, que se define de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{S_R^2}{S_Y^2} = \frac{S_E^2}{S_Y^2}$$

Donde S_Y^2 es la varianza total de la variable de salida (la contaminación de NO₂ en este caso), S_R^2 es la varianza de los residuos (o varianza no explicada por el modelo), y S_E^2 es la varianza explicada por el modelo (estas dos últimas sumadas son igual a la primera). En [39] se puede encontrar un desarrollo más profundo sobre estas varianzas, su significado y cómo se calculan.

En el mejor de los casos, un R^2 igual a 1 en valor absoluto indica que la correlación es perfecta, y si es igual a cero, no hay correlación. En este caso, se ha obtenido un R^2 de 0,525, y en la Figura 22 se puede ver una representación gráfica de un modelo con un R^2 similar comparado con otro de 0,8.

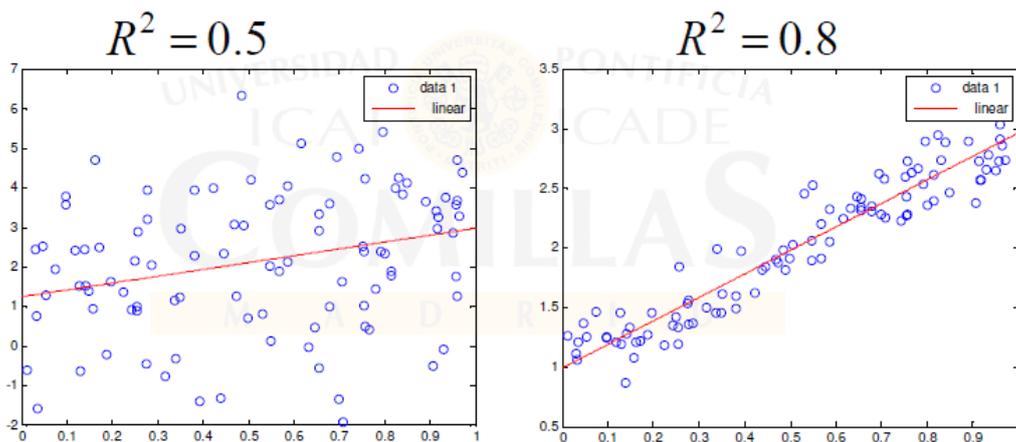


Figura 22: Calidad de un modelo de regresión lineal con una variable de entrada y otra de salida, para distintos valores de R^2 [40]

Aunque la situación mostrada en la Figura 22 no es exactamente equivalente a un modelo con más variables de entrada, permite dar una idea de que este modelo es muy mejorable todavía, pues la mitad de la varianza total es residual (no explicada por el modelo). Una forma habitual de aumentar el R^2 es añadir más variables explicativas de entrada al modelo.

4.1.4. Distribución de los residuos

Como se ha visto, los residuos tienen un peso muy grande en el modelo y por ello el valor del R^2 no es muy alto. Pero además de minimizar los residuos, se debe comprobar que éstos siguen una distribución normal, de media cero y desviación típica (σ) igual a 1 \sim N(0,1), ya que son una variable aleatoria [41].

En la Figura 23 se puede observar la distribución de los residuos con el modelo propuesto comparados con la distribución normal tipificada que deben tener, con los datos del set de test, que es el que utiliza datos desconocidos.

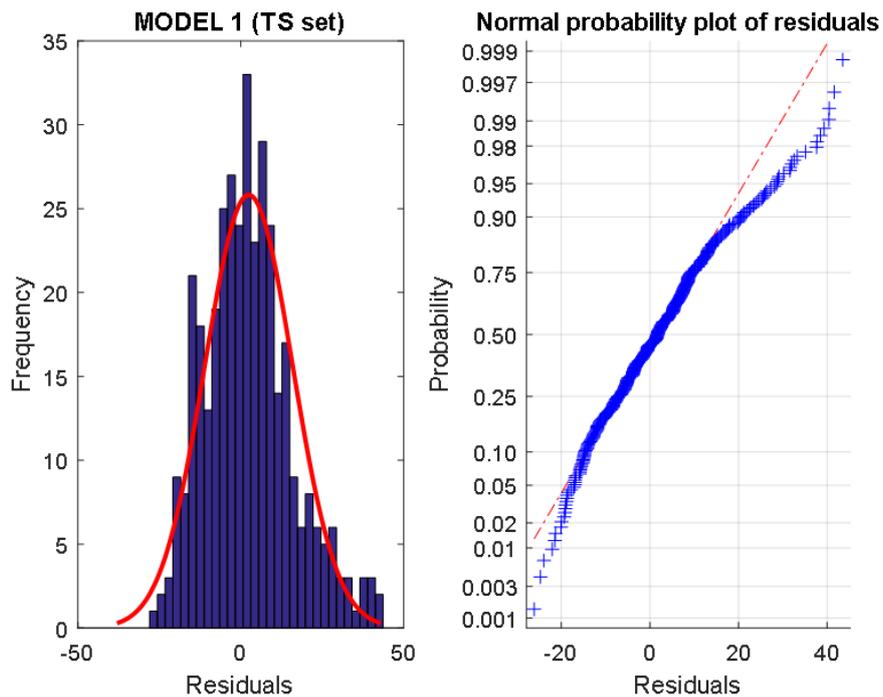


Figura 23: Distribución de los residuos con modelo de regresión lineal simple

En el histograma se ve que no hay simetría; las barras se salen de la curva roja de la distribución normal y aparecen residuos de mayor valor por la cola de la curva. Esto se traduce en que el gráfico de probabilidad normal se desvía de la línea de referencia al final también.

4.2. Regresión lineal con términos cuadráticos

Tras haber visto las limitaciones que tiene el modelo lineal simple (bajo R^2 y distribución anormal de los residuos), se ha ajustado un modelo de regresión más complejo, con términos cuadráticos. En la Figura 24 se muestran los coeficientes de regresión calculados para este segundo modelo:



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

```

Linear regression model:
  Concentracion_NO2 ~ [Linear formula with 9 terms in 4 predictors]

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	42.748	53.123	0.80469	0.42153
Condicion_TEMP	-1.7897	0.37036	-4.8324	2.0071e-06
Condicion_VIENTO	-22.119	1.9599	-11.286	1.8129e-25
Condicion_LLUVIA	-0.80136	0.43729	-1.8326	0.0677
Condicion_EMISIONES	0.0096229	0.014199	0.67772	0.49839
Condicion_TEMP^2	0.034516	0.011343	3.0428	0.0025173
Condicion_VIENTO^2	2.6091	0.38763	6.731	6.734e-11
Condicion_LLUVIA^2	0.0243	0.026235	0.92626	0.35494
Condicion_EMISIONES^2	-5.1486e-07	9.417e-07	-0.54673	0.5849

```

Number of observations: 366, Error degrees of freedom: 357
Root Mean Squared Error: 10.2
R-squared: 0.589, Adjusted R-Squared 0.58
F-statistic vs. constant model: 64.1, p-value = 1.97e-64
MODEL 3 (9 inputs) - TR set ->> MSE: 101.0303 MAE: 0.18787
MODEL 3 (TS set) ->> MSE: 177.3848 MAE: 0.22731

```

Figura 24: Principales parámetros del modelo de regresión lineal con términos cuadráticos

Las emisiones dejan de ser relevantes cuando se incluyen los términos cuadráticos al ser los p-valores asociados a los dos coeficientes (uno de primer grado y otro de segundo) mayores que cualquier nivel de significación comúnmente aceptado (1% o 5%). Por tanto, las emisiones NO_x ya no influyen en el modelo con términos cuadráticos. Exactamente lo mismo le ocurre a la lluvia. Tras eliminar las variables no relevantes en este nuevo modelo, se presenta la Figura 25 con los coeficientes relevantes:

```

Estimated Coefficients:

```

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	89.389	2.8207	31.691	3.4736e-106
Condicion_TEMP	-2.0503	0.35569	-5.7642	1.7649e-08
Condicion_VIENTO	-23.584	1.8608	-12.674	1.0803e-30
Condicion_LLUVIA	-0.44419	0.16034	-2.7704	0.00589
Condicion_TEMP^2	0.03806	0.011274	3.3758	0.00081627
Condicion_VIENTO^2	2.8826	0.36816	7.8298	5.5226e-14

```

Number of observations: 366, Error degrees of freedom: 360
Root Mean Squared Error: 10.2
R-squared: 0.582, Adjusted R-Squared 0.577
F-statistic vs. constant model: 100, p-value = 4.62e-66
MODEL 4 (6 inputs) - TR set ->> MSE: 102.7834 MAE: 0.18827
MODEL 4 (TS set) ->> MSE: 188.2468 MAE: 0.23432

```

Figura 25: Coeficientes y parámetros del modelo de regresión cuadrático simplificado

Con estos cambios se consigue mejorar el R² hasta un 0,58, lo cual no es un gran cambio respecto a la regresión inicial que se hizo. El error residual cuadrático en el set de test ha

empeorado (MSE = 188,24, mientras que era 186,9 en la regresión simple) y su distribución sigue sin adaptarse a la de una normal de media cero, como se ve en la Figura 26:

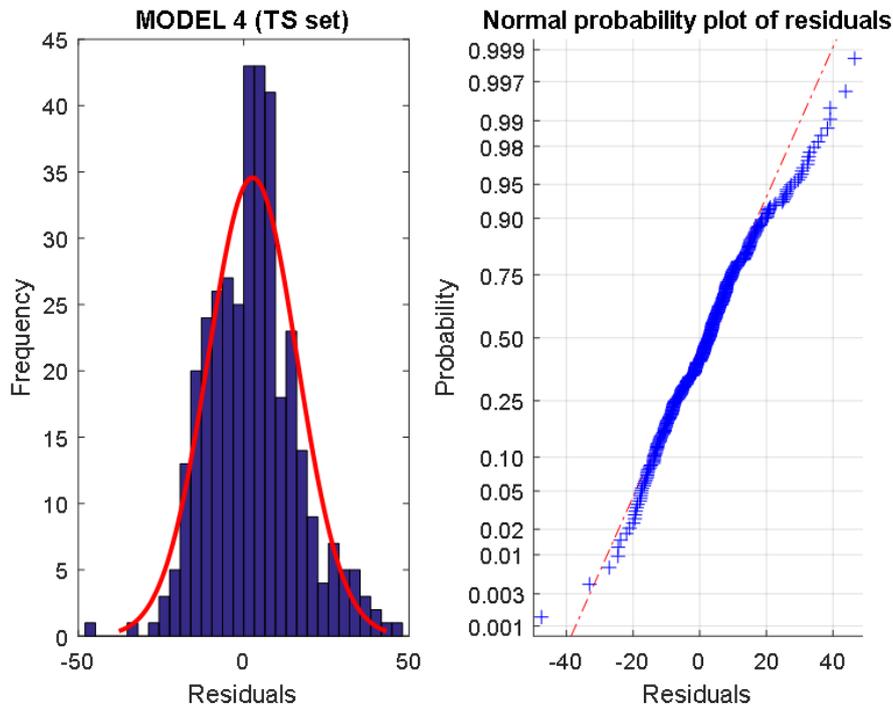


Figura 26: Distribución de los residuos en el set de test con el modelo de regresión cuadrática

4.3. Resumen del modelo de regresión

Los resultados obtenidos en ambos modelos (con coeficientes de primer grado y con cuadráticos) no son muy determinantes de cara a poder estimar el impacto de las emisiones NO_x en la calidad del aire (concentración de NO₂). Por ello, para analizar el efecto de las medidas propuestas por el Ayuntamiento en el Plan A, se ha medido únicamente el impacto de éstas en las emisiones anuales equivalentes del parque automovilístico.

Para poder predecir la calidad del aire utilizando modelos estadísticos, habría que plantearse lo siguiente:

- Añadir más variables meteorológicas como inputs del modelo. Por ejemplo, se podría utilizar la humedad relativa, que podría aportar información que no da la variable de precipitaciones ya que la mayoría de días del año no llueve en Madrid.



Esto hace difícil de predecir cómo será la concentración de NO₂ los días que no llueve porque la contaminación es muy variable esos días. No obstante, aunque esto aumentará el coeficiente de determinación R² del modelo, ello no implica que se mejore la calidad de ajuste del modelo. Por este motivo la ciencia econométrica recomienda utilizar el R² ajustado para medir la bondad del ajuste, cuya definición es [42]:

$$\overline{R^2} = 1 - (1 - R^2) * \frac{n - 1}{n - k - 1}$$

Donde n refleja el tamaño muestral y k el número de variables explicativas.

- Obtener una curva de emisiones NO_x diaria más precisa, porque el haber hecho una transición tan abrupta con las calderas hace que sea irrelevante en el modelo con términos cuadráticos.
- Aumentar la complejidad del modelo; bien aumentando el grado del polinomio, utilizando una regresión dinámica (con valores temporales) o empleando redes neuronales (que son modelos no lineales y más complejos).



5. Plan A: Reducción de emisiones

Las 30 medidas propuestas por el Ayuntamiento de Madrid en el Plan A se dividen en 4 bloques:

- **Movilidad Sostenible:** 21 medidas en total que afectan al tráfico urbano, y por tanto a las emisiones del Grupo SNAP 07.
- **Regeneración Urbana:** 7 medidas en total que afectan a la eficiencia energética de los edificios, y por tanto a las emisiones del Grupo SNAP 02.
- **Adaptación al cambio climático:** 1 medida en la que se proponen soluciones basadas en la naturaleza desde la escala de los edificios hasta la de la ciudad. A nivel de edificios se propone por ejemplo, plantar vegetación en las cubiertas de los edificios para luchar contra la contaminación.
- **Sensibilización ciudadana y Colaboración con otras administraciones:** 1 medida que tiene como objetivo la concienciación de la población respecto al cambio climático y la contaminación, desarrollando módulos, campañas de información y programas educativos.

Muchas de las medidas del Plan A son difíciles de evaluar desde un punto de vista empírico. Medir el efecto de los programas educativos, la peatonalización de muchas calles o la sustitución de estacionamientos en zona azul por verde es difícil porque no tienen un impacto directo (pero sí indirecto) en las emisiones globales. Estas medidas que tienen más que ver con un cambio de hábitos por parte de la ciudadanía se discutirán en el apartado 6.

Tampoco se van a evaluar las medidas relativas a las emisiones de calderas en edificios. Aunque se estima que aún quedan unas 400 calderas de carbón en Madrid por sustituir, los factores de emisión de las distintas tecnologías (Tabla 15) no son suficientemente fiables para evaluar esta medida (la número 23 del Plan A).

Lo que sí se va a valorar en este apartado son las medidas que tienen un impacto directo estimable en las emisiones del tráfico rodado (Grupo SNAP 07). Dentro de este grupo, se han seleccionado las tres más significativas, por afectar a los 3 tipos de vehículos que más contaminan: autobuses EMT, taxis y turismos particulares.

5.1. Medida 11: Ampliación y renovación de la flota de la EMT: hacia una flota de bajas emisiones

La renovación de la flota de EMT sustituyendo los vehículos más antiguos y contaminantes por nuevos autobuses más eficientes es algo que se viene haciendo en los últimos años.

A fecha de agosto de 2017, la flota de los 2000 autobuses de la EMT se compone de las siguientes tecnologías [32]:

- Eléctricos: 18 autobuses (0,89%).
- Gas Natural Comprimido: 939 autobuses (46,95%). Algunos de ellos son híbridos (motor GNC y eléctrico).
- Diésel Euro V: 560 autobuses (26,99%). Algunos de ellos son híbridos (motor diésel y eléctrico).
- Diésel Euro III y IV: 483 autobuses (24,17%).

5.1.1. Actuaciones y objetivos

El objetivo que se propone el Ayuntamiento es conseguir una flota con autobuses de etiqueta *CERO* (eléctricos) y *ECO* (GNC e híbridos) únicamente. Para ello, se plantean los siguientes hitos, descritos en la Figura 27:

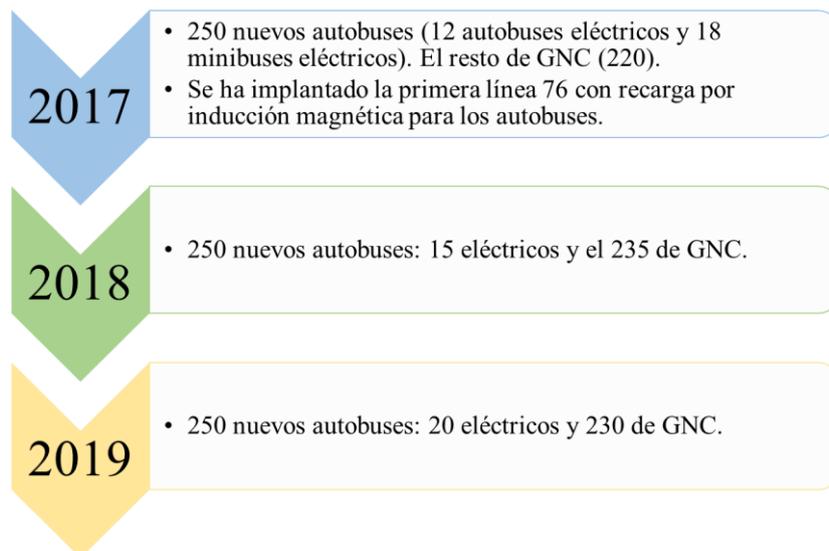


Figura 27: Horizonte temporal de actuación para implementar la Medida 11: Ampliación y renovación de la flota de autobuses [9]

5.1.2. Impacto en las emisiones

Dado que para calcular el modelo de emisiones se ha partido de la información de la flota EMT del año 2017, en el modelo de emisiones, se han introducido los cambios correspondientes a los años 2018 y 2019 en la flota EMT. Así, en 2018 se sustituyen todos los autobuses Diésel III y los que faltan de Diésel IV hasta llegar a 250 autobuses. En 2019, los que aún quedan en el parque de Diésel IV y los que falten de Diésel V hasta llegar a 250 otra vez.

Los resultados muestran que se pueden llegar a reducir las emisiones de la flota EMT en un 56% y las totales en un 9%, con cambiar solo 500 autobuses de un parque circulante de 100.000 vehículos. Esto se debe a que, de partida, los autobuses EMT contribuían con una gran porción de las emisiones totales (ver Figura 16). En la Figura 28 se puede ver la reducción paulatina de las emisiones a lo largo de los años 2017 a 2019:

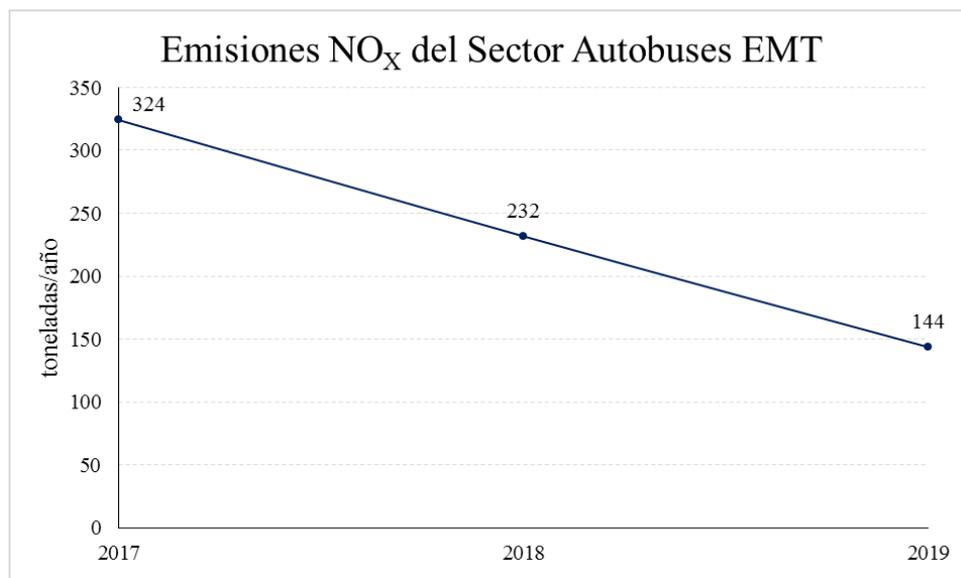


Figura 28: Impacto de la Medida 11 en la reducción de las emisiones NO_x de la flota EMT

5.1.3. Análisis de los resultados

En este caso, la renovación de 250 autobuses cada año es un objetivo claramente definido por el Ayuntamiento, y su cumplimiento es responsabilidad suya (ya que es dueño de la EMT). Por tanto, las hipótesis hechas en cada año sobre la flota EMT no dan lugar a otras posibilidades, a menos que los objetivos no se cumplan o se superen (porque se decida renovar más autobuses cada año), lo cual no se puede prever.



5.2. Medida 12: Taxi. Incentivos para transformación a vehículos de bajas emisiones

Esta medida también trata de atacar las emisiones de un sector que contribuye con un 20% del total en la Zona A de Madrid. Según lo que se indica en el texto de esta medida, en Madrid hay unas 15.000 licencias de taxis, habiéndose calculado un total de 11.000 en circulación cada día por el centro de la ciudad en el apartado 3.1.5.

El número de taxis desglosados según su etiqueta *Euro* se presenta en la Tabla 18. Los valores de muestreo y número de vehículos en azul son estimados, y en negro los datos del estudio del Parque Circulante [31].

Tabla 18: Desglose estimado de los taxis en el parque circulante de Madrid (Zona A)

	Muestreo	Número de vehículos	Parque DGT de turismos
Taxis	10,47%	11.258	2.027.590
Diésel	6,62%	7.118	2.021.016
Euro 1 (1992)	0,08%	88	24.927
Euro 2 (1996)	0,50%	539	153.020
Euro 3 (2000)	1,65%	1.776	504.342
Euro 4 (2005)	1,59%	1.708	484.963
Euro 5 (2009)	1,61%	1.729	490.982
Euro 6 (2014)	1,19%	1.278	362.782
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	3,85%	4.140	6.574
Eléctricos	2,03%	2.182	3.465
Gas Natural	1,82%	1.958	3.109

5.2.1. Actuaciones y objetivos

El objetivo que se persigue en esta medida es, como con los autobuses de la EMT, tener una flota de taxis con etiquetas *CERO* y *ECO* exclusivamente. Para implantar esta iniciativa, el Ayuntamiento incentivará esta transición mediante subvenciones anuales para adquirir vehículos con estas etiquetas y la supresión de la cuota tributaria de autorización de uso.



En 2017 se puso en marcha la subvención *Taxifree* [43], con un importe total de 1.500.000 €. Los vehículos *CERO* podían recibir 3.000 € de ayuda mientras que los *ECO* un 5% del valor del vehículo hasta 1.200 €. En total, hubo 4 solicitantes que obtuvieron ayuda para un taxi *CERO* mientras que 962 obtuvieron ayuda para el taxi *ECO*. Además, hubo otros 39 solicitantes que no recibieron la subvención.

Pero la mayor limitación de esta medida es que, a partir de 2025, los taxis con motor diésel no podrán prestar servicio en la ciudad.

5.2.2. Impacto en las emisiones

Para estimar el impacto de esta medida en las emisiones del transporte, se han tomado las siguientes consideraciones:

- Que, en 2017, los taxis que recibieron subvención (de menos de 10 años de antigüedad) fueron sustituidos por otros taxis *ECO* y *CERO*, haciendo un total de **966 taxis renovados**. Este dato se mantiene para los años posteriores.
- Que, el ratio de taxis nuevos con etiqueta *CERO:ECO* es **4:962** y se mantiene constante para los años posteriores también.
- Que los taxis *CERO* son eléctricos y los *ECO* son de gas natural (de cara a calcular las emisiones), a pesar de que en esta última categoría también entran los híbridos eléctricos. Sin embargo, al desconocerse las emisiones de los coches híbridos, se van a calcular como si fueran de gas natural. En ambos casos, son menores que las de un diésel convencional, por lo que a falta de información en el parque DGT de los coches híbridos eléctricos, esta simplificación es necesaria.
- Que, además, cada año se sustituyen los 500 taxis diésel más antiguos (desde *Euro 1* a *Euro 4*) por taxis con etiqueta *Euro 6* aun sin subvención. Esto se hace para que al llegar al año 2025 no queden taxis sin etiqueta, que tendrán prohibido circular.

Estas hipótesis se han mantenido iguales para el resto de años hasta 2025, y en la Figura 29 se puede ver la evolución de las emisiones del sector de taxis desde 2017 hasta 2025, en un escenario con taxis “ecológicos”.

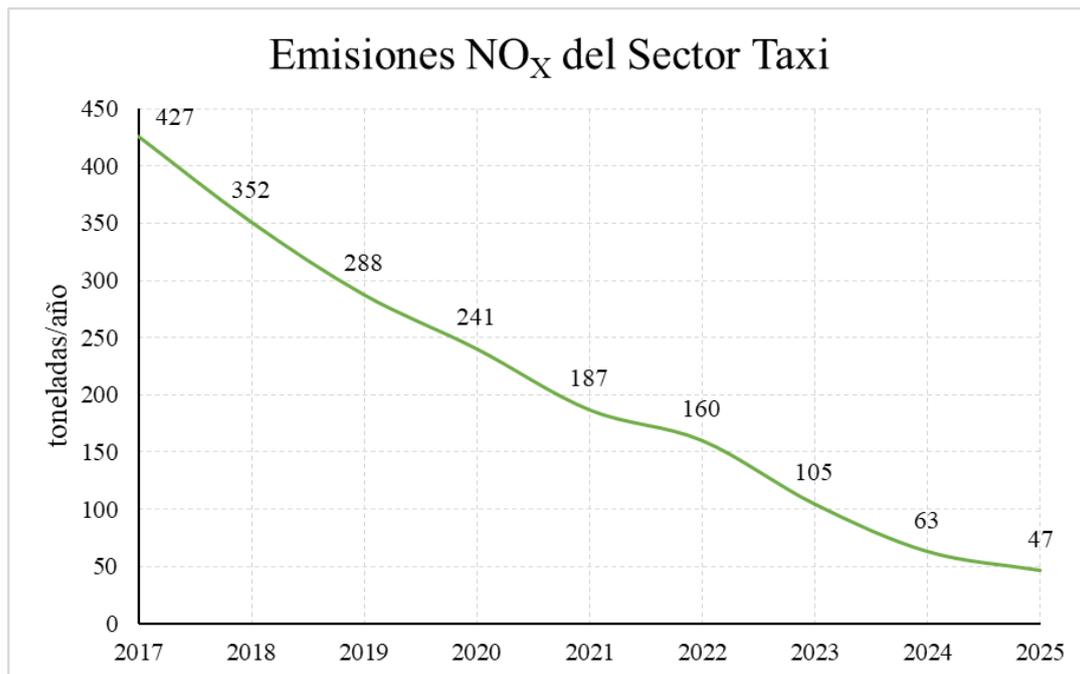


Figura 29: Evolución estimada de las emisiones NO_x de los taxis con la aplicación de la Medida 12 del Plan A

La curva obtenida tiene una pendiente bastante constante a pesar de que los primeros años se sustituyen los taxis diésel más antiguos y por tanto más contaminantes de la flota. Esto se debe a los factores de corrección que se aplicaron a las emisiones (en g NO_x/km) de los coches que superan el test NEDC (ver apartado 3.1.4.2, Tabla 11). Estos factores penalizan la contaminación de los taxis nuevos sobre los antiguos al considerar el *Cycle Beating*.

Sin embargo, independientemente del camino para llegar a una flota de taxis ecológica (que dependerá del estado de las tecnologías en los años futuros), implantar esta medida con éxito, supondría una reducción de emisiones muy drástica para el año 2025; un 90% de las emisiones de los taxis, un 18% menos de emisiones totales (del tráfico).

5.2.3. Análisis de los resultados

Aunque los resultados obtenidos son muy positivos, es importante recordar que se han hecho varias hipótesis fuertes. En primer lugar, el que pueda haber una renovación de casi 1.000 taxis al año por taxis ecológicos dependerá en gran medida de que el Ayuntamiento mantenga las subvenciones. Por tanto, esto depende del contexto económico y político en



cada momento, pudiendo darse incluso un escenario futuro en el que no sea necesaria la subvención.

En segundo lugar, se mantuvo constante la proporción de taxis eléctricos y de gas natural que se compraban cada año. A día de hoy la autonomía del coche eléctrico y su infraestructura de recarga sigue siendo el principal obstáculo para su despunte en el mercado. Estos problemas se agravan para los taxistas, que recorren muchos más kilómetros al año que un conductor particular.

Sin embargo, aunque es previsible que la proporción aumente progresivamente en favor de más taxis eléctricos en el futuro, estimar cuánto aumentará la cuota de mercado de los coches eléctricos está fuera del alcance del proyecto. Además, manteniendo bajo el número de taxis eléctricos se tiene un escenario de emisiones más conservador.

Por último, se decidió también sustituir cada año los 500 taxis diésel más antiguos por taxis diésel *Euro 6*. Esto se hace porque los taxis más antiguos no pueden acceder a la subvención, por lo que se ha decidido renovarlos por los taxis diésel más modernos hasta la fecha.

Ante la falta de datos sobre el número real de taxis antiguos que se renuevan cada año por taxis diésel más modernos, es necesario que sean 500 al año para mantener la flota constante y que en 2025 no haya taxis diésel que estarán prohibidos.

5.3. Medida 17: Renovación del parque circulante

La renovación del parque circulante es una medida muy ambiciosa y también clave si se pretende dar un paso importante en la lucha contra la contaminación. Como se vio en la Figura 16, los turismos son responsables de más de la mitad de las emisiones del tráfico en Madrid. Pero renovar el parque de turismos es algo muy difícil de llevar a cabo, dada su antigüedad; que supera los 12 años en España [24].

5.3.1. Actuaciones y objetivos

En el Plan A se describen las siguientes actuaciones con respecto a esta medida:

- Impulsar ayudas para la renovación de vehículos con criterios de calidad del aire a escala nacional. Para ello, se insta al Gobierno de España a implementar el Plan

PIVE 9 aumentando las ayudas económicas prestadas y dando mayores ayudas a la sustitución de vehículos sin distintivo ambiental por vehículos *CERO* y *ECO*.

- Establecer beneficios tributarios para los conductores que sustituyan los vehículos sin distintivo ambiental por vehículos con etiqueta *C* (excepto diésel).
- Monitorizar el parque circulante, realizando estudios (como el que se comentó en el apartado 3.1.5, [31]) cada dos años. Se considera esta actuación como clave para poder tomar decisiones efectivas en la lucha contra la contaminación.
- Realizar proyectos para conocer las emisiones reales de los coches, en las inspecciones técnicas de vehículos (ITV), por ejemplo.

Aunque no concretan cifras respecto a este objetivo, se menciona el siguiente calendario de implantación, anunciando limitaciones a la circulación de vehículos sin distintivo ambiental a partir de 2025. En la Figura 30 se puede ver el horizonte de aplicación de esta medida:

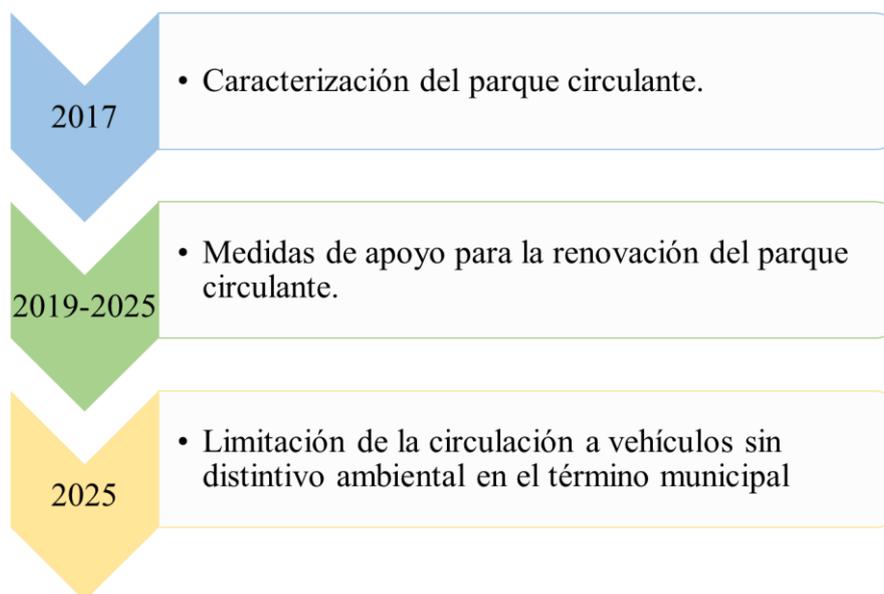


Figura 30: Horizonte temporal para implementar la Medida 17: Renovación del Parque Circulante [9]

5.3.2. Impacto en las emisiones

Para estimar como podría ser la renovación del parque circulante se va a tomar como referencia el objetivo de 2025, suponiendo que las limitaciones a vehículos sin distintivo ambiental serán absolutas y que por tanto no podrán circular en ningún caso en ese año.

Dado que las motocicletas y ciclomotores tienen etiqueta *CERO* por defecto y que las emisiones de furgonetas, camiones y autobuses no EMT son casi residuales en el parque, sólo se estudiará la renovación del parque de turismos, aunque la medida afecta a todos los vehículos del parque.

5.3.2.1. *Matriculaciones de turismos*

A fecha de diciembre de 2017 hay un total de 909.622 turismos sin distintivo ambiental de la DGT. Eso hace un total de 129.946 sustituciones al año (desde 2019) por vehículos con etiqueta DGT necesarias para llegar a 2025 sin vehículos con restricciones para circular. Para comprobar si este ritmo de sustituciones al año es asumible, se ha analizado en la Figura 31 las matriculaciones anuales de turismos en la Comunidad de Madrid desde el año 2002, a partir de los datos del parque de la DGT [25]:



Figura 31: Turismos matriculados cada año desde 2002 en la Comunidad de Madrid [25]

Solo en los peores años de crisis el número de matriculaciones rozó el mínimo de 100.000 turismos, y en los últimos años han aumentado considerablemente, llegando a 370.000 coches nuevos dados de alta en 2017.

A pesar de este dato de crecimiento del parque, de cara a la simulación, solo se han sustituido los (casi) 130.000 vehículos anuales. No se ha considerado el crecimiento/decrecimiento anual del parque porque depende de variables

macroeconómicas que no se pueden predecir para un horizonte de tiempo tan grande. Además, el parque circulante por el centro de Madrid es mucho menor que el de la DGT por lo que de cara a las emisiones, no es relevante conocer si se matricularán más o menos vehículos en toda la Comunidad.

Lo que sí es ineludible es saber si los nuevos vehículos que circulen por el centro de la ciudad serán en su mayoría diésel como hasta ahora, o si ganarán más peso el resto de combustibles. Para determinar cómo son los vehículos nuevos que entran en circulación, se ha analizado su distribución en función del tipo de combustible en la Figura 32:

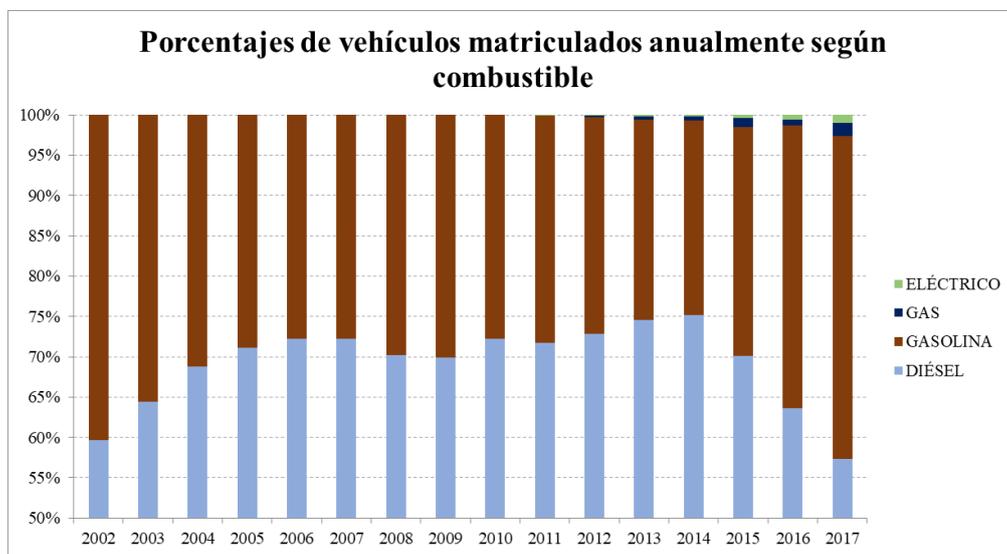


Figura 32: Matriculaciones al año según tipo de combustible en la Comunidad de Madrid [25]

Desde el punto de vista de las emisiones, la tendencia es positiva al estar cayendo la cuota de los coches diésel en los últimos 3 años (que el año pasado bajo por primera vez del 60%), mientras que la gasolina recupera el terreno perdido desde 2002. Los coches eléctricos y de gas natural aún son muy residuales, pero crecen en el mercado a un ritmo elevado.

5.3.2.2. Penetración de coches ecológicos en el parque

A partir de los datos anteriores, se han considerado dos escenarios distintos, manteniendo en ambos **constante** el número de turismos totales del parque DGT y del parque circulante:

5.3.2.2.1. Escenario conservador

Se plantea un horizonte en el que los turismos que entran a sustituir a los coches sin etiqueta ambiental seguirán siendo en su mayoría diésel y gasolina. Los coches eléctricos y de gas van aumentando progresivamente su proporción cada año, pero siguen siendo minoritarios.

En la Figura 33 se puede ver como se ha simulado la evolución de los turismos que entran cada año (casi 130.000) para sustituir a los vehículos sin etiqueta DGT:

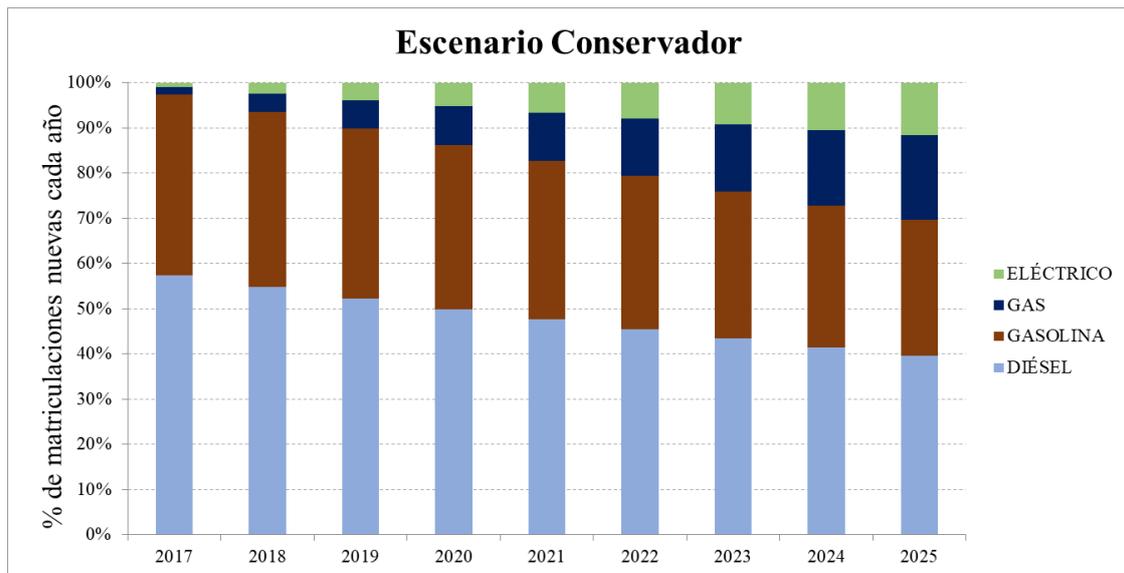


Figura 33: Escenario conservador de penetración de vehículos ecológicos en el parque DGT

Con este escenario, las emisiones de los turismos en el año 2025 se han reducido un 35% respecto a 2017. Estos resultados, incluso con una penetración baja de vehículos eléctricos y de gas son bastante significativos. La evolución de las emisiones de los turismos desde 2017 hasta 2025, se muestra en la Figura 34:

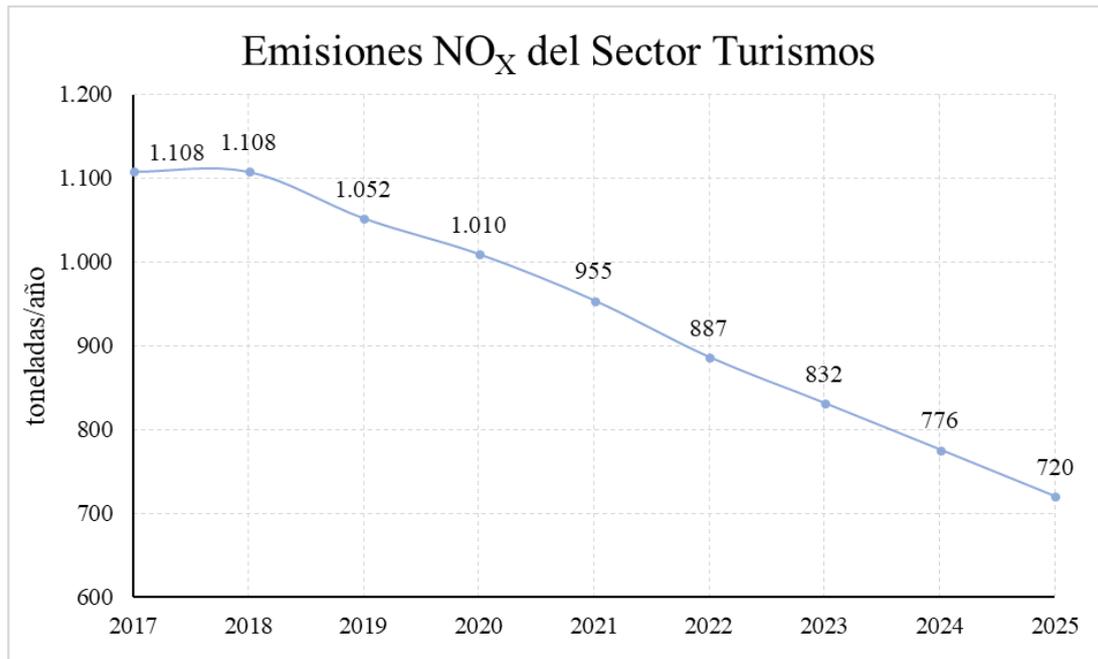


Figura 34: Emisiones NO_x de turismos tras la aplicación de la Medida 17 del Plan A: Escenario conservador

5.3.2.2.2. Escenario optimista

Para contrastar con el escenario anterior, se ha planteado uno alternativo en el que el vehículo eléctrico consigue acaparar en poco tiempo la mayoría de nuevas matriculaciones. El gas natural tiene una cuota relevante, y el diésel y la gasolina caen rápidamente hasta ser residuales entre los nuevos vehículos que entran a sustituir a los que no tienen etiqueta DGT.

En la Figura 35 se ve cómo se termina por revertir la situación inicial de 2017, en la que los ecológicos pasan de ser despreciables a ser mayoritarios.

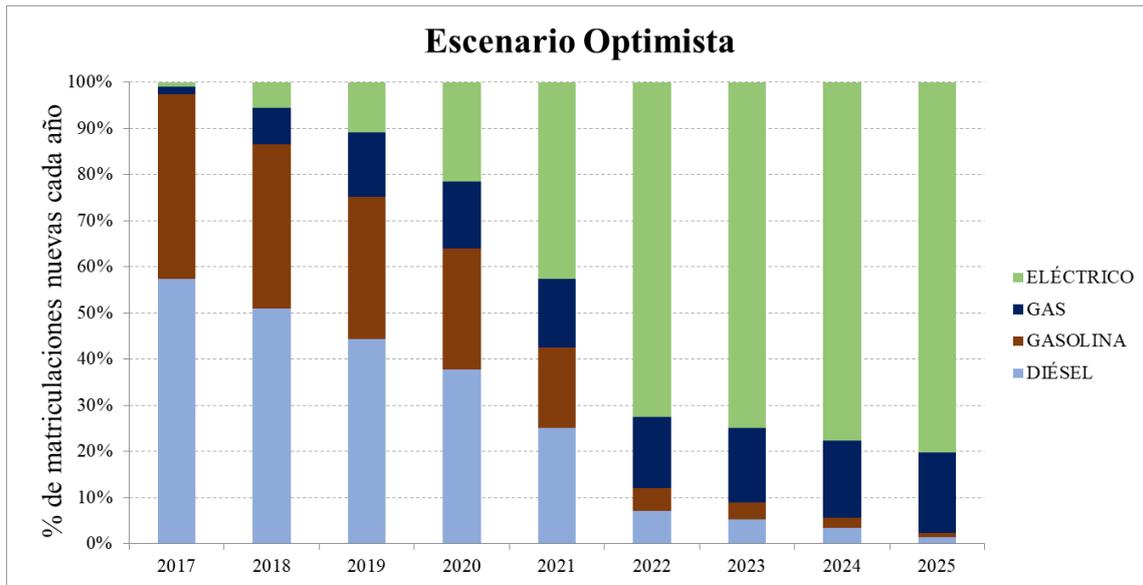


Figura 35: Escenario optimista de penetración de vehículos ecológicos en el parque DGT

A pesar de que se ha aumentado en gran medida la cantidad de vehículos eléctricos y de gas que entran a sustituir a los que no tienen distintivo ambiental, la diferencia respecto al escenario conservador no es todo lo grande que cabría esperar. En la Figura 36 se puede ver la evolución de las emisiones NO_x del sector *Turismos* en este escenario, donde en 2025 se han disminuido un 41% respecto a 2017 (en el escenario anterior se redujeron un 35%).

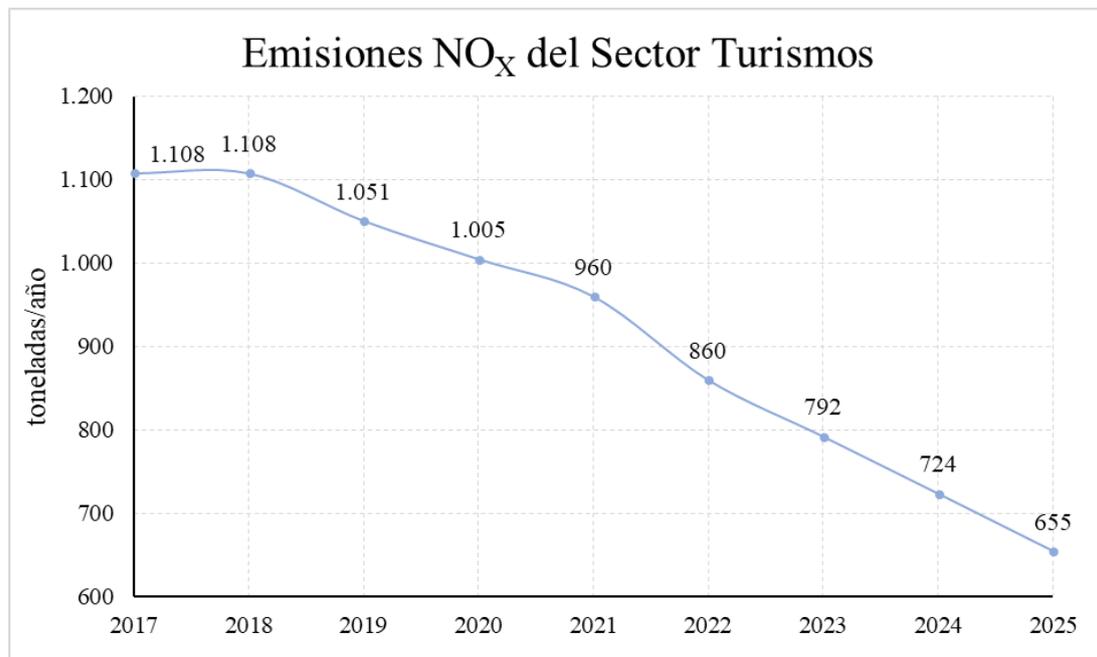


Figura 36: Emisiones NO_x de turismos tras la aplicación de la Medida 17 del Plan A: Escenario optimista



5.3.3. *Análisis de los resultados*

Tras la comparativa entre los dos escenarios anteriores se puede concluir que esta medida reduce en gran medida las emisiones fundamentalmente porque se eliminan de la circulación los vehículos más contaminantes. En cambio, entre el escenario conservador y el optimista, hay una menor diferencia a pesar de que en el segundo aparecen muchos más vehículos *Cero* que en el primero.

Hay que recordar que los distintos escenarios de penetración de vehículos ecológicos que se han propuesto afectan únicamente a los nuevos turismos que entran cada año a sustituir a los coches sin etiqueta DGT. A estos hay que sumarles los demás turismos ya existentes en el parque. La mayoría de ellos siguen siendo diésel, que aun teniendo etiqueta ambiental de la DGT, siguen aportando la mayor parte de las emisiones. En la Tabla 19 se pueden ver el impacto real sobre el parque circulante de los dos escenarios propuestos para la Medida 17:

Tabla 19: Porcentajes de turismos en el parque circulante según su combustible en distintos años y escenarios

Combustible	2017	2025 (conservador)	2025 (optimista)
Diésel	68%	57%	50%
Gasolina	32%	37%	32%
Gas Natural	0%	3%	4%
Eléctrico	0%	2%	15%

En el año 2025, las emisiones de los turismos en el escenario conservador fueron 712 toneladas al año, por 655 en el optimista. Se puede decir por tanto, que desde el punto de vista de las emisiones NO_x, lo más efectivo es eliminar los vehículos antiguos de la circulación aunque sea por coches gasolina/diésel y no necesariamente eléctricos.

En cuanto a las limitaciones de estos resultados, es importante resaltar que en todos los escenarios se ha mantenido constante el tamaño del parque circulante. Esto se ha hecho para analizar únicamente el efecto de sustituir vehículos más contaminantes por otros más eficientes, sin combinarlo con el efecto de añadir más o menos vehículos a la circulación.

No obstante, las emisiones NO_x reales que se puedan tener en el futuro dependen también del número de coches circulando cada día. Este número podría aumentar si se atiende a que el número de matriculaciones de turismos va en aumento cada año en la Comunidad de Madrid (como se puede ver en la Figura 32). Pero, por otro lado, el Ayuntamiento también ha presentado una batería de medidas disuasorias para la circulación de vehículos, que se discutirán en el apartado 6 (restricciones en distintas áreas del centro, menos plazas de aparcamiento, etc).

5.4. Efecto global del Plan A en la reducción de emisiones

Finalmente, se ha analizado el efecto combinado del Plan A en la Figura 37, en la que se puede ver la evolución de las emisiones NO_x, únicamente para el escenario conservador de penetración de turismos *CERO* y *ECO*.

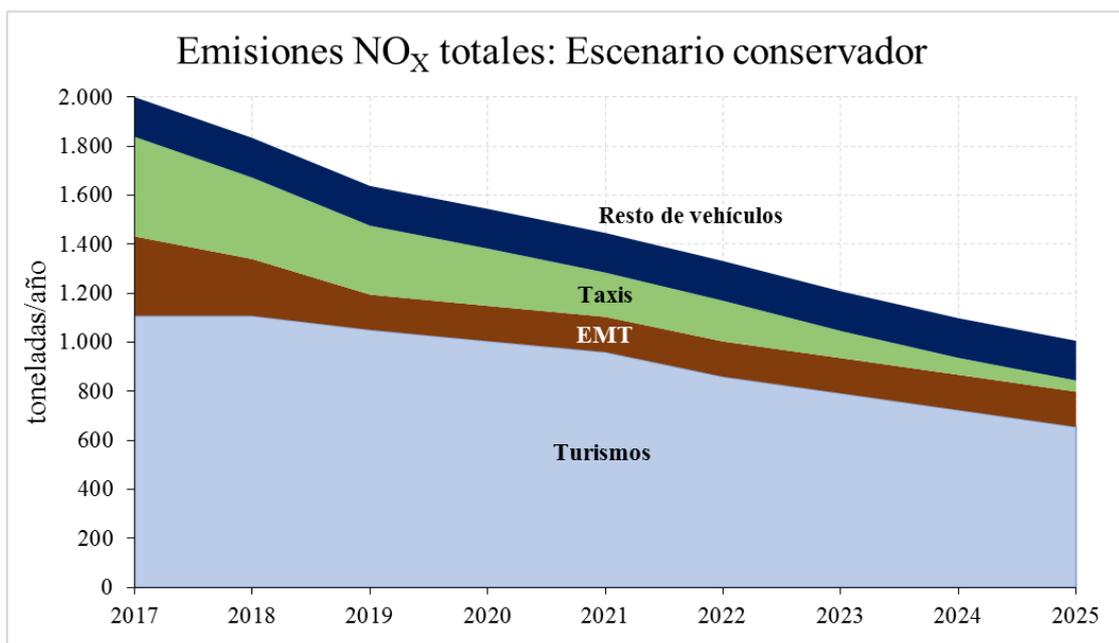


Figura 37: Efecto global del Plan A en las emisiones de NO_x en el área interior de la M-30 de Madrid

El resultado final es que las emisiones pueden llegar a reducirse a la mitad, aunque la renovación de taxis y, fundamentalmente, de turismos no está bajo el control directo del Ayuntamiento. Depende sobre todo de factores macroeconómicos, que ya se ha resaltado que no entran en el alcance de este proyecto.



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Las hipótesis que se han hecho sobre el número de sustituciones de taxis y turismos no están respaldadas en el propio Plan A, a diferencia de las sustituciones de autobuses EMT. Pero se han tomado como referencia los objetivos a largo plazo que sí que concreta el Ayuntamiento en su documento.

En ambos casos, se especifican distintas restricciones a partir de 2025 por el centro de la ciudad. En el caso de los taxis, el Ayuntamiento ha puesto en marcha un programa de subvenciones en el que se renovaron cerca de 1000 taxis el año pasado (por taxis *ECO* o *CERO*). En cuanto a los turismos y a los taxis muy antiguos que no tienen acceso a la subvención (los de más de 10 años de antigüedad), entra dentro de lo esperable que para 2025, éstos no estén en condiciones de circular independientemente de que sus dueños puedan comprar un coche ecológico o recurran a uno de segunda mano.

Por tanto, en estas condiciones, la solución al problema de las emisiones NO_x en Madrid puede ser simplemente una cuestión de tiempo. En cambio, queda saber cuánto mejorarían la calidad del aire y los niveles de NO₂ en el camino hasta 2025, y el nivel de emisiones con el que esta calidad de aire sería aceptable. Sin embargo, aunque la relación entre emisiones NO_x y concentración de NO₂ es directa, la interacción entre ambas se ha visto que es compleja al no haberse podido obtener un modelo de predicción suficientemente bueno en el apartado 4.

6. Plan A: Movilidad Sostenible y cambio de hábitos

A continuación, se van a discutir otras medidas del Plan A, que no tienen un efecto directo sobre las características del parque de vehículos, pero sí pretenden inducir un cambio de hábitos en cuanto a la movilidad. Dentro de este paquete de medidas para favorecer la Movilidad Sostenible, hay dos grandes bloques; las de restricción del tráfico (sobre todo de turismos), y los incentivos a formas de transporte alternativas.

6.1. Restricciones de tráfico

En este bloque, destacan las Medidas 1 y 2 del Plan A, en las que se hace una clara apuesta por limitar el uso del coche como forma de transporte habitual, prohibiendo su circulación en algunas zonas o eliminando carriles.

6.1.1. Medida 1: Área Central Cero Emisiones

El objetivo es reducir al máximo el tráfico en el área delimitada en la Figura 38, y con ello las emisiones.



Figura 38: Área Central Cero Emisiones (Medida 1 del Plan A [9])

Las actuaciones propuestas se dividen en tres bloques principales:



- Prioridad para modos de transporte alternativos; peatones, bicicletas y el transporte público. Para llevar esto a cabo se proponen; la creación vías con preferencia para el los autobuses y bicicletas (como la que ya hay en Alberto Aguilera), y el ensanchamiento de las aceras y limitación de la velocidad a 30 km/h en calles del interior del *Área Cero Emisiones* (como Gran Vía, Princesa, Arenal, Alcalá y otras). Además, se establecerá un sistema de coordinación de taxis definiendo una red de paradas para reducir el número de taxis circulando vacíos en esta zona.
- Nueva red de aparcamientos. Por un lado, se definirán accesos al *Área Cero Emisiones* con un sistema de reserva de plazas de aparcamiento de modo que se evite la entrada de vehículos en esa zona cuando no haya plazas libres. Por otro, se sustituirán las plazas azules por verdes, y se aumentarán las plazas para residentes frente a las de los aparcamientos subterráneos.
- Restricciones de acceso. Éstas afectan fundamentalmente a los turismos particulares (excepto residentes o con plaza de aparcamiento pública o privada). Sólo los coches eléctricos podrán circular por esta zona.

6.1.2. Medida 2: Rediseño de las vías principales de distribución del tráfico

En esta iniciativa se hace una apuesta por rediseñar las principales vías de distribución del tráfico de Madrid, eliminando carriles por los que circulan coches particulares para ensanchar aceras y dar prioridad a bicis y al transporte público. Las principales calles sobre las que se actuará se muestran en la Figura 39 (como Paseo de la Castellana o Santa Engracia entre otras).

La justificación que se hace respecto a esta medida es que el coche, al colapsar estas vías en las horas puntas de tráfico, dificulta y causa ineficiencias en la red de autobuses. Por tanto, el beneficio buscado es doble; reducir el número de coches en circulación y sus emisiones, y mejorar la eficacia del transporte público, aumentando su uso.

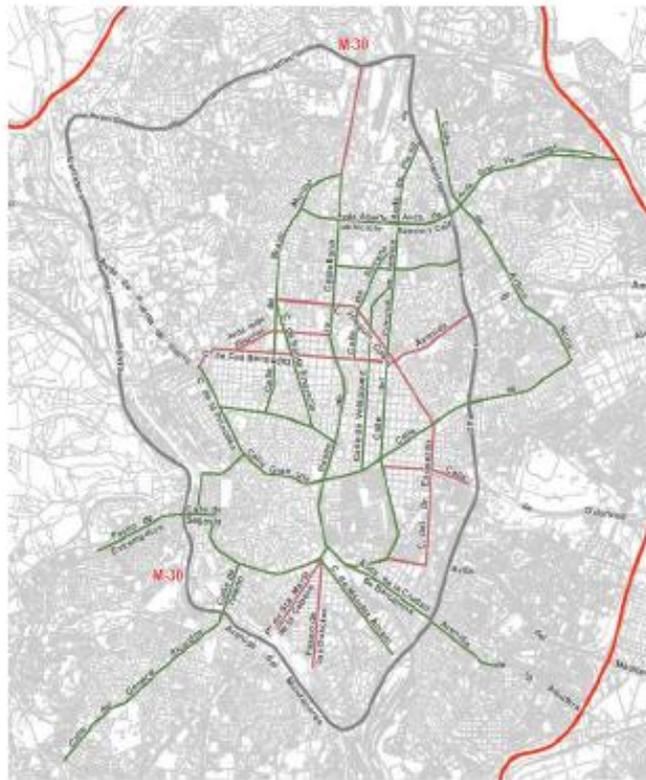


Figura 39: Vías de distribución del tráfico sobre las que actúa la Medida 2 del Plan A [9]

Además, siguiendo el razonamiento inicial de que la densidad de tráfico de coches entorpece la circulación de los autobuses, a esta medida se suma la Medida 9. Apoyándose en la disminución de la velocidad a la que circulan los autobuses de la EMT como indicador de su competitividad, se propone en la medida 9 el desarrollo de vías preferentes y priorización semafórica para los autobuses EMT.

6.2. Formas de transporte alternativas

Como contrapunto a las restricciones que se prevén para limitar el uso coches particulares en Madrid, se pretende fomentar el uso de otras formas de transporte. Las medidas más importantes que se van a comentar se centran fundamentalmente en optimizar el servicio de los autobuses EMT y de movilidad compartida. Aunque también hay otras medidas que buscan favorecer la peatonalización de algunas zonas (Medida 3) o el uso de las bicicletas (Medidas 4 y 5).

6.2.1. Medida 8: Red de aparcamientos intermodales en la corona metropolitana

Los aparcamientos intermodales, también conocidos como disuasorios, son otra gran apuesta del Plan A para sustituir coches por transporte público dentro de la ciudad. En total, se prevé la construcción de 12 nuevos aparcamientos situados en las afueras de la ciudad, y a una distancia máxima de 200 metros de una parada de transporte público.

El uso de estos aparcamientos será gratis para el titular de una tarjeta de transporte público o con un coste de aproximadamente de 1€/día. En total, contando los aparcamientos ya existentes y los 12 nuevos, se podría llegar a evitar la circulación de 14.500 coches por la almendra central.

En la Figura 40 se pueden ver los 12 aparcamientos disuasorios que planea el Ayuntamiento.

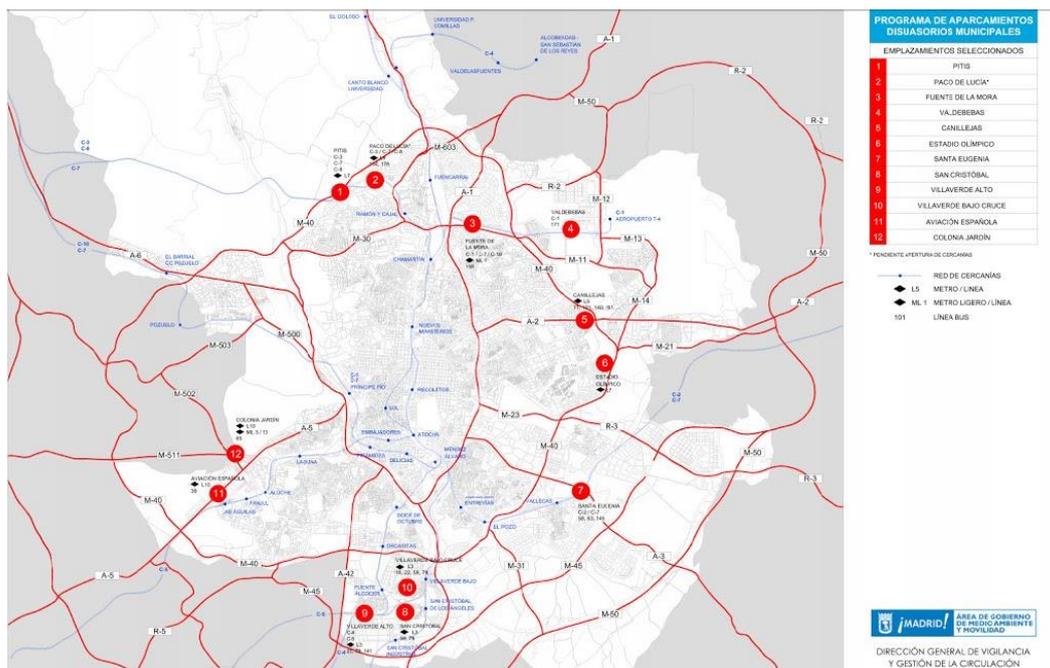


Figura 40: Aparcamientos disuasorios en las afueras de Madrid de la Medida 8 del Plan A [9]

6.2.2. Medida 21: Impulso a las iniciativas de movilidad compartida

La otra gran medida positiva en favor de transportes alternativos es la del uso de plataformas de “car-sharing”. El Ayuntamiento pretende que estos coches sean más numerosos en el parque circulante ya que estima que cada uno de ellos sustituye a 8



coches privados, y además reducen las emisiones ya que la mayoría de estas empresas (como Car2go, Emov o Zity) utilizan flotas de coches eléctricos.

Por ello, anuncian en esta medida ayudas para impulsar aún más esta la movilidad compartida. Por ejemplo, dando ayudas e incentivos, prestando apoyo institucional para difundir estas iniciativas, y creando un nuevo distintivo ambiental para estos vehículos.

6.3. Impacto de las medidas

Evaluar el efecto final de estas medidas en el tráfico y en las emisiones posteriores es complicado porque en algunos casos, las consecuencias de las medidas que se han comentado en este apartado son ambiguas.

En el caso de las medidas 8 y 21, el impacto en las emisiones solo puede ser positivo; la construcción de parkings disuasorios y el uso de coches eléctricos compartidos contribuye claramente a reducir el uso del coche dando una alternativa útil a sus usuarios.

Por el contrario, las consecuencias de las medidas 1 y 2 no son predecibles y ni si quiera se puede saber si disminuirán o aumentarán las emisiones NO_x del tráfico. En ambos casos se pretende disuadir a los conductores de circular por la zona cero emisiones y algunas de las principales arterias de la capital, lo que sobre el papel es positivo.

No obstante, hay que considerar también que cuando se restringe y embotella el tráfico en determinadas zonas se corre el riesgo de que éste aumente en las calles colindantes, con menos carriles, congestionando la ciudad aún más. Además, la fluidez del tráfico también influye en las emisiones, pues cuantos más arranques y paradas hacen los coches más aumentan su consumo y sus emisiones.

Finalmente, hay otras medidas que no se han analizado en detalle en este apartado porque su efectividad es dudosa al ser difíciles de implementar. Ejemplos de estos casos son la propuesta de limitar la velocidad a 70 km/h en la M-30 y los accesos al centro desde la M-40 (medida 7), o dar prioridad a la movilidad peatonal (medida 3). Para que esto de ocurra es necesario un cambio de hábitos en la población que sin duda necesita tiempo y una mayor concienciación de la población.

6.4. Cooperación con otras administraciones



REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA

Por último, se habla en el Plan A de que es necesaria la cooperación con otras administraciones (medida 30). Esto es sumamente necesario si se quiere progresar de verdad en la reducción de emisiones, porque las actuaciones al alcance del Ayuntamiento son muy limitadas para actuar sobre el parque de turismos, que es el más contaminante en las ciudades.

Aunque efectivamente se cumpla la prohibición de circular por Madrid a los coches sin distintivo ambiental en 2025, es necesario también que el Gobierno de España y la UE colaboren en el asunto de la contaminación urbana y no se cometan errores del pasado.

El primero de estos errores han sido las subvenciones que se han dado a los coches diésel en toda la UE y también en España. En el último plan PIVE 8, del año 2015 (Programa de Incentivos al Vehículo Eficiente) todavía recibían subvención los vehículos diésel [44]. Esto viene ocurriendo de esta forma porque se han entendido en Europa como vehículos eficientes aquellos con menores tasas de emisión de CO₂, pero no de NO_x. Por tanto, es necesario que los objetivos de los Ayuntamientos estén alineados con los del Estado, y que esto se refleje en el siguiente Plan PIVE 9, para el que ya se reclama que los coches diésel y de gasolina queden sin subvención [45].

El segundo gran error que se viene cometiendo en Europa y España tiene que ver con el impuesto de especial de hidrocarburos, particularmente con el hecho de que el diésel (300€ por cada 1.000 litros aproximadamente) paga una cantidad menor que la gasolina (400€ por cada 1.000 litros, aprox.) [46]. Esta diferencia de precio artificial ha contribuido también a que en la década de los 2000 se haya disparado la venta de coches de gasóleo. Como consecuencia, también en este aspecto, los problemas de contaminación NO_x contra los que se pretende luchar no están respaldados por las instituciones superiores.

Por último, como se ha comentado en el apartado 3.1.4.2, la UE es consciente de que los estándares que otorga a los fabricantes de vehículos no reflejan sus emisiones reales. Mientras se siga utilizando el ciclo NEDC para calcular las tasas de emisión, los esfuerzos realizados serán insuficientes y superficiales.



7. Conclusiones y evaluación

7.1. Sobre la influencia de las emisiones NO_x en la calidad del aire

Finalmente, se puede afirmar que se ha conseguido hacer una estimación de las emisiones reales del tráfico. Este método de cálculo es extrapolable a otros contaminantes como podrían ser las partículas (PM), aunque hay que recordar que éstas también se producen por abrasión (el desgaste de los neumáticos por ejemplo), por lo que los coches eléctricos también las emiten.

No obstante, el cálculo de estas emisiones NO_x todavía se podría mejorar, aunque para ello es necesario tener acceso a más información. Por ejemplo, para caracterizar el parque circulante y el número de coches que circulan al día, se han utilizado los datos del estudio de 2017 [31] que duró 10 días, suponiendo que son extrapolables a todo el año.

Como se ha visto, estas emisiones calculadas en el apartado 3.1 sirven para poder analizar el impacto del Plan A en la contaminación, pero no en la calidad del aire y los niveles de NO₂. Aunque está claro que existe una dependencia entre las emisiones NO_x y la concentración de NO₂ (porque los NO_x contienen NO₂), esta relación no se recogió en el modelo de regresión con términos cuadráticos.

Por tanto, para mejorar el modelo de regresión habría que empezar por afinar el cálculo de las emisiones, de modo que éstas no sean únicamente un número aleatorio que oscila alrededor del promedio calculado. Es necesario incluir variaciones a lo largo del año como la diferencia entre días laborables y festivos y la estacionalidad; hay meses con mayor o menor tráfico en función de los días de vacaciones y el periodo del año.

En segundo lugar, también sería recomendable introducir más variables de entrada al modelo. Como se comentó en el apartado 4, el R² de una regresión mejora cuando se incluyen más inputs, como podría ser la humedad relativa, al aportar información que no se quizás no se tiene con las precipitaciones.

Sin embargo, en última instancia habría que plantearse evolucionar el modelo hacia algo más complicado que una regresión. Probablemente la variable tiempo sea muy influyente para explicar los niveles de contaminación, ya que no afecta del mismo modo que llueva un día D si también llovió el día D-1 que si hizo sol y poco viento el día D-1, por ejemplo.



Para llevar a cabo esta mejora en el modelo estadístico, sería recomendable empezar por una regresión dinámica utilizando un modelo ARIMA (simple, ya que utiliza los valores de la serie temporal de concentración de NO₂ únicamente) y luego tratar de mejorarlo con un ARIMAX (que utiliza también variables exógenas; las meteorológicas y las emisiones).

7.2. Sobre el Plan A

En cuanto a las medidas presentadas en el Plan A, se han analizado las más significativas. Se puede concluir que hay medidas muy positivas para la reducción de emisiones, pero otras poco útiles; ya que limitan/restringen las posibilidades de movimiento por Madrid sin que esté claro que el resultado final sean menores emisiones.

Sobre el primer grupo de medidas, se ha visto en el apartado 5 que son un acierto porque atacan a las 3 mayores fuentes de emisión del tráfico; autobuses EMT, taxis y coches particulares. Bajo la hipótesis de que el número de total de vehículos circulando siga siendo el mismo para el horizonte temporal considerado (2025), se ha visto que incluso en un escenario de baja penetración del vehículo eléctrico, las emisiones podrían reducirse un 46%.

Este resultado indica que se puede mejorar sustancialmente el problema de la contaminación en Madrid sin que sea necesaria una revolución en el parque de vehículos hacia una flota 100% eléctrica. Es más efectivo retirar de la circulación los coches (sobre todo los diésel) más antiguos y, dado el parque de vehículos tan antiguo que hay en España, esta sustitución ocurrirá necesariamente.

Pero además de estas iniciativas que están al alcance del Ayuntamiento, es necesario que desde el Estado y la UE se actúe también en consecuencia. Esto implica que el Estado no puede seguir incentivando el diésel (vía subvenciones en el Plan PIVE o con un coste artificialmente menor vía impuesto especial de hidrocarburos) cuando es la tecnología más contaminante. Tampoco tiene sentido que la UE siga utilizando un test como el NEDC para los controles de emisiones a los coches cuando desde la Agencia Medioambiental Europea se sabe que no refleja unas pautas de conducción reales.



En lo que se refiere al segundo grupo de medidas del Plan A (comentadas en el apartado 6), se ha visto que algunas de ellas son de dudosa efectividad, tanto para reducir emisiones como para mejorar la situación del tráfico en Madrid. Los aparcamientos disuasorios y los incentivos al *carsharing* y al transporte público ayudan a mejorar estos dos problemas. Pero en cambio, las restricciones al tráfico y cierre de carriles en determinadas calles y arterias de la capital complican el problema, ya que se corre el riesgo de que se congestionen las calles y zonas colindantes, que además tienen menos carriles.

7.3. Futuros desarrollos

Por último, de cara a una mejora del trabajo actual en el futuro, sería bueno enfocar los esfuerzos en un cálculo más preciso de las emisiones. Esto pasaría por obtener un número más preciso de vehículos circulando diariamente y las características de sus recorridos exclusivamente por la zona centro, añadiendo datos de estacionalidad a lo largo del año (al ser el tráfico distinto en agosto que en marzo, por ejemplo). La estimación que se ha realizado es un primer paso, para evaluar las distintas medidas que afectan al tráfico. Sin embargo, se ha visto que no se ha podido valorar el efecto en la calidad del aire, que es lo que afecta a la salud de las personas.

Independientemente de lo anterior, sería interesante ver si se puede mejorar el modelo estadístico para predecir la calidad del aire, incluyendo más variables de entrada. En las bases de datos de AEMET se pueden encontrar otras condiciones meteorológicas como la radiación solar diaria o la humedad relativa, que podrían mejorar la información que aportan las otras variables que sí se han considerado en este trabajo (viento, temperatura y lluvia).

Por último, de cara a superar las limitaciones que tiene el modelo de regresión lineal, podría ser útil aumentar la complejidad del modelo estadístico. Por ejemplo, un suavizado exponencial o una regresión dinámica, son modelos que tienen en consideración la variable tiempo, que como se comentó en el apartado 4, también es relevante para predecir la contaminación del día siguiente. En última instancia, se puede desarrollar un modelo que utilice redes neuronales, que pueden combinar la información recogida en los dos modelos anteriores (regresión lineal y temporal), aunque con un grado de complejidad muy superior.



**REDUCCIÓN DE EMISIONES NO_x POR LA
PENETRACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA MOVILIDAD URBANA**



8. Bibliografía

- [1] A. Calvo Hornero, *Economía Internacional y Organismos Económicos Internacionales*, Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2016.
- [2] Banco Mundial, «Datos Banco Mundial,» [En línea]. Available: https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=ES&name_desc=false. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [3] Naciones Unidas, «Lima-Paris Action Agenda,» [En línea]. Available: <http://newsroom.unfccc.int/lpaa/lpaa/massive-mobilization-by-non-state-stakeholders-summarized-at-cop21/>. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [4] OMS, «OMS - Centro de Prensa,» [En línea]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-estimates/es/>. [Último acceso: 6 Noviembre 2017].
- [5] Ayuntamiento de Madrid, «Protocolo de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación por dióxido de nitrógeno,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Protocolo-de-medidas-a-adoptar-durante-episodios-de-alta-contaminacion-por-dioxido-de-nitrogeno?vnextfmt=default&vnextoid=fd8718cea863c410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vnextchannel=3edd31d3b2>. [Último acceso: 9 Noviembre 2017].
- [6] Real Decreto 102/2011, «BOE,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-1645>. [Último acceso: 22 Enero 2018].
- [7] El Mundo, «Comienza la 'temporada alta' de polución en Madrid,» [En línea]. Available:



<http://www.elmundo.es/madrid/2017/09/30/59ce96e2268e3e87418b46ee.html>.

[Último acceso: 4 Diciembre 2017].

- [8] I. de Olazabal, «Análisis del impacto del vehículo eléctrico en la calidad del aire y la demanda eléctrica de las grandes ciudades. Aplicación en Madrid.» ICAI, Madrid, 2017.
- [9] Ayuntamiento de Madrid, «Plan A,» Madrid, 2017.
- [10] Ministerio de Medio Ambiente, «Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2012. Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP.» [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/volumen2.aspx>. [Último acceso: 1 Febrero 2018].
- [11] Ayuntamiento de Madrid, «Servicio de Calidad del Aire,» [En línea]. Available: <http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calaire>. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [12] Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad, «Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad (Ayuntamiento de Madrid),» 2014. [En línea]. Available: http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/export/sites/default/calaire/Anexos/Memoria_2014.pdf. [Último acceso: 3 Abril 2018].
- [13] Ayuntamiento de Madrid, «Mapa de la red de vigilancia,» [En línea]. Available: <http://www.mambiente.munimadrid.es/sica/scripts/index.php>. [Último acceso: 20 Abril 2018].
- [14] World Air Quality Index Project, «AQI,» [En línea]. Available: <http://aqicn.org/city/madrid/>. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].



- [15] CITEAIR, «Air Quality in Europe,» [En línea]. Available: https://www.airqualitynow.eu/comparing_home.php. [Último acceso: 4 Abril 2018].
- [16] Environmental Protection Agency, «Air Quality Now,» [En línea]. Available: <https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.main>. [Último acceso: 4 Abril 2018].
- [17] D. Galán Madruga y R. Fernández Patier, «Implicación de los NO_x en la química atmosférica,» Revista electrónica de medioambiente. UCM, Madrid, 2006.
- [18] Aulabiogeotoni, «Contaminación del aire,» [En línea]. Available: <http://biogeotesttoni.blogspot.com.es/2015/06/2-ctm-la-contaminacion-del-aire.html>. [Último acceso: 27 Mayo 2018].
- [19] Datos Clima (AEMET), «Base de datos meteorológica,» [En línea]. Available: <https://datosclima.es/>. [Último acceso: 2 Marzo 2018].
- [20] Environmental Protection Agency, «Report on the environment: Nitrogen Dioxide concentrations,» [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/roe/>. [Último acceso: 7 Abril 2018].
- [21] European Environmental Agency, «Explaining Road Transport Emissions,» [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/explaining-road-transport-emissions/file>. [Último acceso: 30 Mayo 2018].
- [22] El País, «Volkswagen trucó sus coches para evitar los límites a las emisiones,» [En línea]. Available: https://elpais.com/economia/2015/09/18/actualidad/1442597112_006058.html. [Último acceso: 30 Mayo 2018].
- [23] Dirección General de Tráfico, «La DGT clasifica el parque de vehículos en función de su potencial contaminante,» [En línea]. Available: <http://www.dgt.es/es/prensa/notas-de-prensa/2016/20160414-dgt-clasifica>
-



parque-vehiculos-funcion-potencial-contaminante.shtml. [Último acceso: 30 Mayo 2018].

- [24] Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones, «Estadísticas,» [En línea]. Available: http://www.anfac.com/estadisticas.action?accion=estad_parque. [Último acceso: 30 Mayo 2018].
- [25] Dirección General de Tráfico, «Portal Estadístico,» [En línea]. Available: https://sedeapl.dgt.gob.es/WEB_IEST_CONSULTA/subcategoria.faces. [Último acceso: 2 Enero 2018].
- [26] Diesel Net, «European Union Emission Standards,» [En línea]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>. [Último acceso: 1 Junio 2018].
- [27] MAPAMA, «Normativas europeas de emisiones en vehículos de dos ruedas,» [En línea]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/vehiculos_2_o_3_ruedas.aspx. [Último acceso: 2 Junio 2018].
- [28] Expansión, «Cuánto consumiría su coche si fuera de gas natural en vez de gasolina,» [En línea]. Available: <http://www.expansion.com/empresas/motor/2017/06/09/593a80e522601d17558b45b3.html>. [Último acceso: 3 Junio 2018].
- [29] EPA, «Average emissions for urban buses,» [En línea]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100EVY1.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006%20Thru%202010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField>. [Último acceso: 29 Mayo 2018].



- [30] F. Kleiner, D. Ö. Enver, S. Schmid y H. E. Friedrich, «Electrification of transport logistic vehicles: A techno-economic assessment of battery and fuel cell electric transporter,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Common-Artemis-Driving-Cycles-CADC-9_fig1_278675536. [Último acceso: 30 Mayo 2018].
- [31] Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental, «Estudio del Parque Circulante de la ciudad de Madrid 2017,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspeInf/Energia yCC/03Energia/3bMovilidad/ParqueCirculante/Ficheros/EstudioPCMad2017.PDF>. [Último acceso: 5 Marzo 2018].
- [32] EMT, «Principales cifras,» [En línea]. Available: [http://www.emtmadrid.es/Elementos-Cabecera/Enlaces-Vertical/EMPRESA/Somos/Principales-cifras-\(1\)](http://www.emtmadrid.es/Elementos-Cabecera/Enlaces-Vertical/EMPRESA/Somos/Principales-cifras-(1)). [Último acceso: 30 Mayo 2018].
- [33] Ayto de Madrid, «Banco de Datos,» [En línea]. Available: <http://www-2.munimadrid.es/CSE6/jsps/menuBancoDatos.jsp>. [Último acceso: 24 Mayo 2018].
- [34] European Commission, «Driving patterns of european car drivers - A mobility survey,» [En línea]. Available: https://setis.ec.europa.eu/system/files/Driving_and_parking_patterns_of_European_car_drivers-a_mobility_survey.pdf. [Último acceso: 31 Mayo 2018].
- [35] Dirección General de Gestión y Vigilancia de la Circulación, «Estudio del servicio de taxi,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMovilidadTransportes/TAXI/Ficheros/Otros/Ayto%20Madrid%20%20C2%B7%20Estudio%20del%20Servicio%20del%20Taxi.pdf>. [Último acceso: 31 Mayo 2018].



- [36] Google, «Población España y Madrid en el año 2012,» [En línea]. Available: <https://www.google.es/search?q=poblaci%C3%B3n+espa%C3%B1a+2012&aq=chrome..69i57.6749j0j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. [Último acceso: 7 Junio 2018].
- [37] IDAE, «Análisis del consumo energético del sector residencial en España,» [En línea]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf. [Último acceso: 4 Junio 2018].
- [38] A. C. Kikut V., «Estimación de los coeficientes de regresión estandarizados,» [En línea]. Available: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Estimacion-De-Coefficientes-Estandarizados/1481885.html>. [Último acceso: 2 Julio 2018].
- [39] E. Martínez Rodríguez, «Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal,» [En línea]. Available: https://www.rcumariacristina.com/wp-content/uploads/2010/12/11-Elena-Martinez_1.pdf. [Último acceso: 3 Julio 2018].
- [40] Departamento de Organización Industrial - ICAI, «Métodos Cuantitativos para la Decisión,» [En línea]. Available: www.sifo.upcomilla.es. [Último acceso: 5 Mayo 2018].
- [41] J. Villar, «Modelos Estadísticos Aplicados,» [En línea]. Available: http://dm.udc.es/asignaturas/estadistica2/sec9_3.html. [Último acceso: 4 Julio 2018].
- [42] D. N. Gujarati y D. C. Porter, *Econometría (5ª Edición en Español)*, México D.F.: Mc Graw Hill, 2010.
- [43] Sede Electrónica del Ayuntamiento de Madrid, «Subvención Taxifree,» [En línea]. Available: <https://sede.madrid.es/sites/v/index.jsp?vgnextoid=aa43f22d9286c510VgnVCM1>
-



000001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=23a99c5ffb020310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&rm=%2C9888724493f3c510VgnVCM2000001f4a900aRCRD%2Cf6ae786992112210VgnVCM1000000b205a0aRCRD. [Último acceso: 3 Junio 2018].

- [44] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «Real Decreto 380/2015, de 14 de mayo, por el que se regula la concesión directa de subvenciones del "Programa de Incentivos al Vehículo Eficiente (Pive-8)",» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-5377. [Último acceso: 2 Julio 2018].
- [45] Movele, «Planes PIVE,» [En línea]. Available: <https://www.movele.es/planes-pive-incentivos-vehiculo-eficiente>. [Último acceso: 2 Julio 2018].
- [46] Boletín Oficial del Estado, «Impuestos Especiales,» [En línea]. Available: www.boe.es/legislacion/codigos/abrir_pdf.php?fich=063_Impuestos_especiales.pdf. [Último acceso: 2 Julio 2018].
- [47] K. A. Baumert, T. Herzog y P. Jonathan, «World Resources Institute,» Diciembre 2005. [En línea]. Available: http://pdf.wri.org/navigating_numbers.pdf. [Último acceso: 26 Octubre 2017].
- [48] El Mundo, «Sólo el 0,08% del parque móvil es cero emisiones,» [En línea]. Available: <http://www.elmundo.es/motor/2017/12/04/5a251403268e3e2d308b4570.html>. [Último acceso: 4 Diciembre 2017].
- [49] Ministerio de Medio Ambiente, «SIAR: Portal de datos,» [En línea]. Available: <http://eportal.mapama.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>. [Último acceso: 25 marzo 2018].



- [50] European Environmental Agency, «Air Pollution Maps,» [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/find/global#c12=air+quality>. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [51] Área de Gobierno y Medio Ambiente, «Relación vigente de modelos de vehículos para servicio de taxi,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMovilidadTransportes/TAXI/Ficheros/Vehiculos/velautauto.pdf>. [Último acceso: 5 Junio 2018].



***ANEXO I: CÁLCULO DE
EMISIONES NO_x DEL
TRANSPORTE POR
CARRETERA***



ANEXO I: CÁLCULO DE EMISIONES NO_x
DEL TRANSPORTE POR CARRETERA



ANEXO I: CÁLCULO DE EMISIONES NO_x

DEL TRANSPORTE POR CARRETERA

Tabla 20: Emisiones diarias de NO_x según tipo de vehículo, combustible y antigüedad [31]

Tipo de vehículo	Muestreo	Matrículas /día	km/ día	g NO _x / km	Δ _{CADC} /NEDC	kg NO _x / día	Parque DGT
Turismos	72,13%	77.559				2.348	3.079.492
Gasolina	21,77%	23.409	50,0			415	1.051.902
Euro 1 (1992)	1,53%	1.649	50,0	0,97	1,38	110,40	74.121
Euro 2 (1996)	3,17%	3.410	50,0	0,50	1,88	160,25	153.212
Euro 3 (2000)	5,76%	6.194	50,0	0,15	1,62	75,25	278.319
Euro 4 (2005)	4,03%	4.332	50,0	0,08	1,96	33,97	194.678
Euro 5 (2009)	3,62%	3.893	50,0	0,06	1,50	17,52	174.959
Euro 6 (2014)	3,66%	3.930	50,0	0,06	1,50	17,69	176.613
Diésel	48,02%	51.634	50,0			1.930	2.021.016
Euro 1 (1992)	0,59%	637	50,0	0,97	1,13	34,90	24.927
Euro 2 (1996)	3,64%	3.909	50,0	0,70	1,64	224,40	153.020
Euro 3 (2000)	11,98%	12.885	50,0	0,50	1,88	605,61	504.342
Euro 4 (2005)	11,52%	12.390	50,0	0,25	3,16	489,41	484.963
Euro 5 (2009)	11,67%	12.544	50,0	0,18	3,52	397,39	490.982
Euro 6 (2014)	8,62%	9.269	50,0	0,08	4,80	177,96	362.782
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	2,33%	2.505	50,0			4	6.574
Eléctricos	1,23%	1.321	50,0	0,00	1,00	0,00	3.465
Gas Natural	1,10%	1.185	50,0	0,06	1,00	3,55	3.109
Vehículos ligeros (N1)	5,01%	5.387				262	274.615
Gasolina	0,09%	97	50,0			3	16.690
Euro 1 (1994)	0,02%	16	50,0	1,40	1,38	1,56	2.792
Euro 2 (1998)	0,02%	17	50,0	0,65	1,88	1,04	2.943
Euro 3 (2001)	0,03%	33	50,0	0,18	1,62	0,47	5.612
Euro 4 (2006)	0,01%	16	50,0	0,10	1,96	0,16	2.744
Euro 5 (2010)	0,01%	10	50,0	0,075	1,50	0,06	1.791
Euro 6 (2015)	0,00%	5	50,0	0,075	1,50	0,03	808
Diésel	4,88%	5.247	50,0			259	256.848
Euro 1 (1994)	0,27%	285	50,0	1,40	1,13	22,56	13.963
Euro 2 (1998)	0,30%	325	50,0	1,00	1,64	26,61	15.886
Euro 3 (2001)	0,99%	1.060	50,0	0,65	1,88	64,74	51.867



ANEXO I: CÁLCULO DE EMISIONES NO_x

DEL TRANSPORTE POR CARRETERA

Euro 4 (2006)	0,80%	856	50,0	0,330	3,16	44,65	41.915
Euro 5 (2010)	1,82%	1.961	50,0	0,235	3,52	81,10	95.983
Euro 6 (2015)	0,71%	761	50,0	0,105	4,80	19,17	37.234
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,04%	43	50,0			0	1.077
Eléctricos	0,02%	24	50,0	0,00	1,00	0,00	592
Gas Natural	0,02%	19	50,0	0,075	1,00	0,07	485
Vehículos pesados (N2 y N3)	1,60%	1.720	10,0			130	26.319
Diésel	1,57%	1.688	10,0			129	26.127
Euro I (1992)	0,08%	88	10,0	9,19	1,00	8,09	1.363
Euro II (1996)	0,21%	229	10,0	9,19	1,00	21,04	3.543
Euro III (2000)	0,51%	545	10,0	9,19	1,00	50,04	8.427
Euro IV (2005)	0,37%	399	10,0	9,19	1,00	36,68	6.177
Euro V (2008)	0,40%	428	10,0	3,19	1,00	13,64	6.617
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,03%	32	10,0			0	192
Eléctricos	0,00%	1	10,0	0,00	1,00	0,00	6
Gas Natural	0,03%	31	10,0	1,04	1,00	0,33	186
Autobuses	2,20%	2.366				922	9.126
Autobuses EMT	1,86%	2.000	123,3			888	2.000
Diésel	0,87%	1.043	123,3			767	1.043
Euro I (1992)	0,00%	0	123,3	9,19	1,00	0,00	0
Euro II (1996)	0,00%	0	123,3	9,19	1,00	0,00	0
Euro III (2000)	0,20%	241	123,3	9,19	1,00	273,06	241
Euro IV (2005)	0,20%	242	123,3	9,19	1,00	274,19	242
Euro V (2008)	0,47%	560	123,3	3,19	1,00	220,24	560
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	1,00%	1.075	123,3			120	957
Eléctricos	0,02%	18	123,3	0,00	1,00	0,00	18
Gas Natural	0,98%	939	123,3	1,04	1,00	120,40	939
Autobuses no EMT	0,33%	355	10,0			34	7.126
Diésel	0,27%	290	10,0			34	7.087
Euro I (1992)	0,01%	8	10,0	26,46	1,00	2,24	207
Euro II (1996)	0,02%	17	10,0	23,16	1,00	4,03	425
Euro III (2000)	0,07%	73	10,0	16,54	1,00	12,07	1.782



ANEXO I: CÁLCULO DE EMISIONES NO_x

DEL TRANSPORTE POR CARRETERA

Euro IV (2005)	0,06%	63	10,0	11,58	1,00	7,31	1.541
Euro V (2008)	0,12%	128	10,0	6,62	1,00	8,49	3.132
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	0,07%	39	10,0			0	39
Eléctricos	0,07%	39	10,0	0,00	1,00	0,00	39
Gas Natural	0,00%	0	10,0	1,04	1,00	0,00	0
Ciclomotores	0,34%	366				0	96.510
Gasolina	0,34%	366	10,0			0	96.510
Euro 1 (1999)	0,23%	247	10,0	0,00	1,00	0,00	65.190
Euro 2 (2004)	0,04%	41	10,0	0,00	1,00	0,00	10.936
Euro 3 (2006)	0,07%	77	10,0	0,00	1,00	0,00	20.384
Motocicletas	8,25%	8.871	15,0			33	264.311
Gasolina	8,18%	8.796	15,0			33	263.010
Euro 1 (1999)	1,77%	1.907	15,0	0,50	1,00	14,31	57.035
Euro 2 (2004)	1,37%	1.469	15,0	0,30	1,00	6,61	43.925
Euro 3 (2006)	5,04%	5.419	15,0	0,15	1,00	12,19	162.050
Eléctricas	0,07%	75	15,0			0	1.301
Taxis	10,47%	11.258				1.143	2.027.590
Diésel	6,62%	7.118	214,9			1.143	2.021.016
Euro 1 (1992)	0,08%	88	214,9	0,97	1,13	20,68	24.927
Euro 2 (1996)	0,50%	539	214,9	0,70	1,64	132,96	153.020
Euro 3 (2000)	1,65%	1.776	214,9	0,50	1,88	358,82	504.342
Euro 4 (2005)	1,59%	1.708	214,9	0,25	3,16	289,97	484.963
Euro 5 (2009)	1,61%	1.729	214,9	0,18	3,52	235,45	490.982
Euro 6 (2014)	1,19%	1.278	214,9	0,08	4,80	105,44	362.782
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	3,85%	4.140	214,9				6.574
Eléctricos	2,03%	2.182	214,9	0,00	1,00	0,00	3.465
Gas Natural	1,82%	1.958	214,9	0,06	1,00	25,24	3.109
TOTAL	100,00%	107.527				5.833	3.750.373
Gasolina	30,39%	32.677				618,86	
Diésel	62,22%	66.903				5.138,36	
Otros (Eléctricos y Gas Natural)	7,39%	7.946				125,80	