



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## COMPARATIVA MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE TRANSPORTE DE VIAJEROS UTILIZANDO UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Autor: Inmaculada Caballero Ruiz

Director: Yolanda González Arechavala

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio de 2019



## **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. Inmaculada Caballero Ruiz DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: COMPARATIVA MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE TRANSPORTE DE VIAJEROS UTILIZANDO UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, 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) Reproducirla 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.

**6°. 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 14 de julio de 2019.

**ACEPTA**

Fdo.....

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

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“**Comparativa medioambiental de diferentes tipos de transporte de viajeros utilizando una perspectiva de análisis de ciclo de vida**”  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico **2018/2019** 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.: **Inmaculada Caballero Ruiz** Fecha: 12 / 07 / 2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: **Yolanda González Arechavala** Fecha: ...12/07/ 2019.....

Autorizada la entrega del proyecto

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo: **Carlos Martín Sastre** Fecha: 12/07/2019





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## COMPARATIVA MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE TRANSPORTE DE VIAJEROS UTILIZANDO UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Autor: Inmaculada Caballero Ruiz

Director: Yolanda González Arechavala

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Julio de 2019



# COMPARATIVA MEDIOAMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE TRANSPORTE DE VIAJEROS UTILIZANDO UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

**Autor: Caballero Ruiz, Inmaculada.**

Directores: González Arechavala, Yolanda. Martín Sastre, Carlos

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### Introducción

El desarrollo económico, la mejora de las infraestructuras y la gran disponibilidad de medios de transporte son realidades que están favoreciendo un aumento del movimiento de las personas que está provocando un alto impacto negativo en el medio ambiente.

Este impacto de los medios de transporte de personas en el cambio climático genera una gran preocupación, llegando a ser uno de los principales objetivos futuros de reducción de emisiones. Uno de los instrumentos para analizar la posible reducción del impacto de este sector es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El ACV permite identificar el impacto generado desde el primer momento en la obtención de la materia prima que se utilizará para la construcción de los componentes del vehículo, pasando por el impacto que origina su uso, hasta el generado en el proceso final de desecho o reciclado del mismo. Estudios anteriores han utilizado esta técnica para el análisis de los tipos de transporte, principalmente para comparar el impacto de todo el ciclo de vida de diferentes tipos de transporte.

El objeto de este proyecto es analizar, desde una perspectiva de ciclo de vida, el impacto actual (2016) del transporte de viajeros en la comunidad de Madrid y estimar el efecto que tendrán las políticas y tendencias que se conocen para este sector sobre los impactos generados en el año 2030. En concreto, se analizarán y compararán los vehículos particulares de carretera de gasolina, diésel y eléctricos, las motocicletas eléctricas y de gasolina, las bicicletas eléctricas, así como, dentro del transporte público, los autobuses, el metro y el cercanías; obteniendo el impacto medioambiental del transporte de viajeros actual y el previsible en el 2030 en el área señalada.

## Metodología

Para la realización del ACV de los diferentes tipos de transporte en la Comunidad de Madrid en el escenario de 2016 y para el escenario futuro de 2030 se han seguido las fases que indica las normas internacionales ISO 14040-2006 (ISO, 2006 a.) y ISO 14044-2006 (ISO, 2006 b.) estas son: definición del objetivo y alcance del análisis, análisis de inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados.

En primer lugar se ha realizado una revisión de los estudios existentes en la literatura sobre ACV del transporte de viajeros. Tras esto, para llevar a cabo en este proyecto el análisis de impacto que el transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid tiene sobre la calidad de su aire se han determinado los distintos tipos de transporte de los que se compone el análisis, así como sus correspondientes ACV que toman en consideración los impactos de las distintas etapas a considerar (extracción de materias primas, producción de los vehículos y combustible, uso y mantenimiento y la de final de vida, que incluye el transporte y desmantelamiento del vehículo). Del mismo modo se han analizado las normativas vigentes aplicables al transporte de viajeros y al efecto de éste sobre la contaminación ambiental, Normativa Europea, Plan Nacional de Calidad del Aire y Transición Energética. Igualmente se han estudiado los objetivos de reducción del impacto producido y las medidas que se han propuesto para cumplir esos objetivos. También se incluye, para situar el estudio, un breve análisis de la situación actual del transporte en España y en la Comunidad de Madrid.

El ACV del caso de estudio se ha llevado a cabo mediante la herramienta SimaPro, que ofrece un interfaz al usuario para modelar y analizar un producto siguiendo la norma ISO 14040 (ISO, 2006 a.) y ISO 14044 (ISO, 2006 b.) y se ha utilizado la información de la base de datos Ecoinvent 3.3 con datos del año 2016. Los tipos de transporte que se han analizado son: turismos Euro (gasolina, diésel y gas natural), turismos eléctricos, motocicletas de gasolina y eléctricas, autobuses de diésel, gas natural y eléctricos, metro, cercanías y bicicleta eléctrica. Se ha analizado cada uno de dichos tipos de transporte mediante el método CML-IA, del Center of Environmental Science (CML) de Leiden University in The Netherlands, obteniendo resultados de las siguientes categorías de impacto medioambiental: Calentamiento global, Potencial de agotamiento abiótico, Agotamiento de la capa de ozono, Toxicidad en humanos, Ecotoxicidad acuática de agua dulce, Ecotoxicidad acuática marina, Ecotoxicidad

terrestre, Oxidación fotoquímica, Acidificación y Eutrofización. También se ha calculado la Demanda Acumulada de Energía mediante el método de Cumulative Energy Requirements Analysis, CERA (Ecoinvent, 2010).

En la etapa de Análisis de Inventario de este proyecto se han incluido los datos numéricos de entrada del análisis, datos calculados en base a información recogida de diversas fuentes de reconocido prestigio del transporte, con el objetivo de cuantificar la demanda de transporte de viajeros que se da en la Comunidad de Madrid en el año 2016 (pkm) y la demanda de transporte de viajeros normalizada por unidad de población (pkm/habitante) clasificada por tipo de vehículo. También se presenta la demanda estimada de transporte de viajeros para esta comunidad en el año 2030, calculada tomando en consideración las tendencias de fomento del transporte público, la apuesta por nuevas tecnologías como son los vehículos eléctricos y de gas natural, así como la tendencia de uso compartido del vehículo y una mayor movilidad. Esta situación del transporte de viajeros para la previsión futura se ha basado en documentación e informes varios entre los que destaca el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 de IDAE (Ministerio para la Transición Ecológica., 2019).

### Resultados

La etapa de Análisis de Impacto presenta, con anterioridad a los análisis de impacto de la demanda, un análisis del impacto del Calentamiento global comparativo de los turismos y de los transportes públicos según las fases del ciclo de vida, un análisis comparativo del impacto por km (g/km), demanda de energía acumulada (MJ/km) y un análisis de impacto por pasajero (g/pkm) de todos los transportes analizados.

Finalmente, se presentan los resultados del análisis de la demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid en el año 2016 (Figura 1) y en el año 2030 (Figura 2), y una comparación de la evolución de los impactos entre ambos años para los diferentes tipos de transporte analizados.

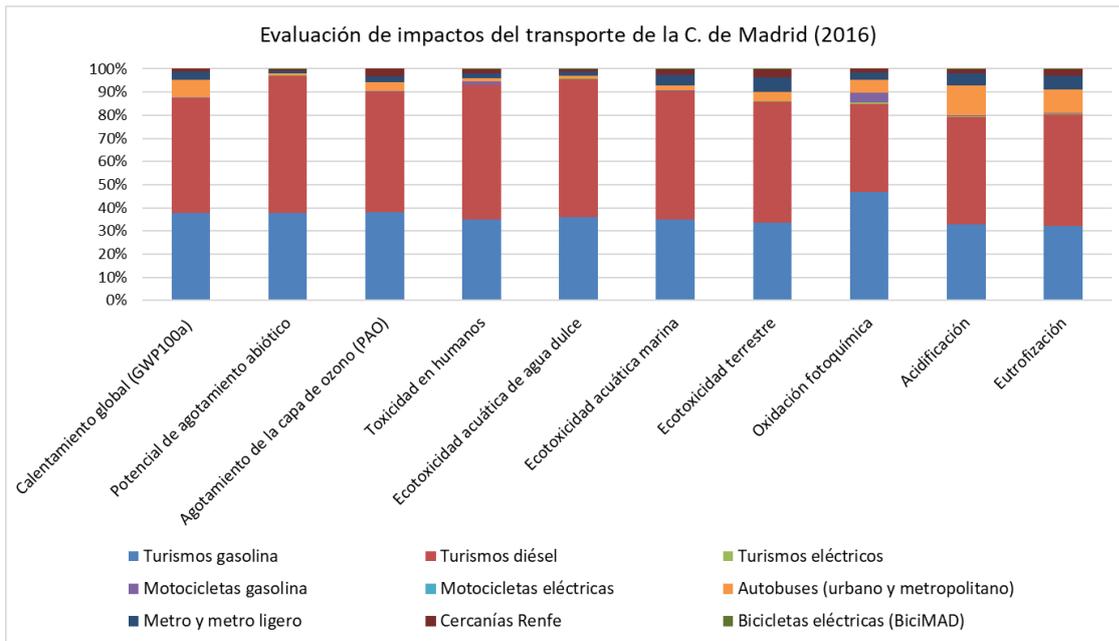


Figura 1. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2016

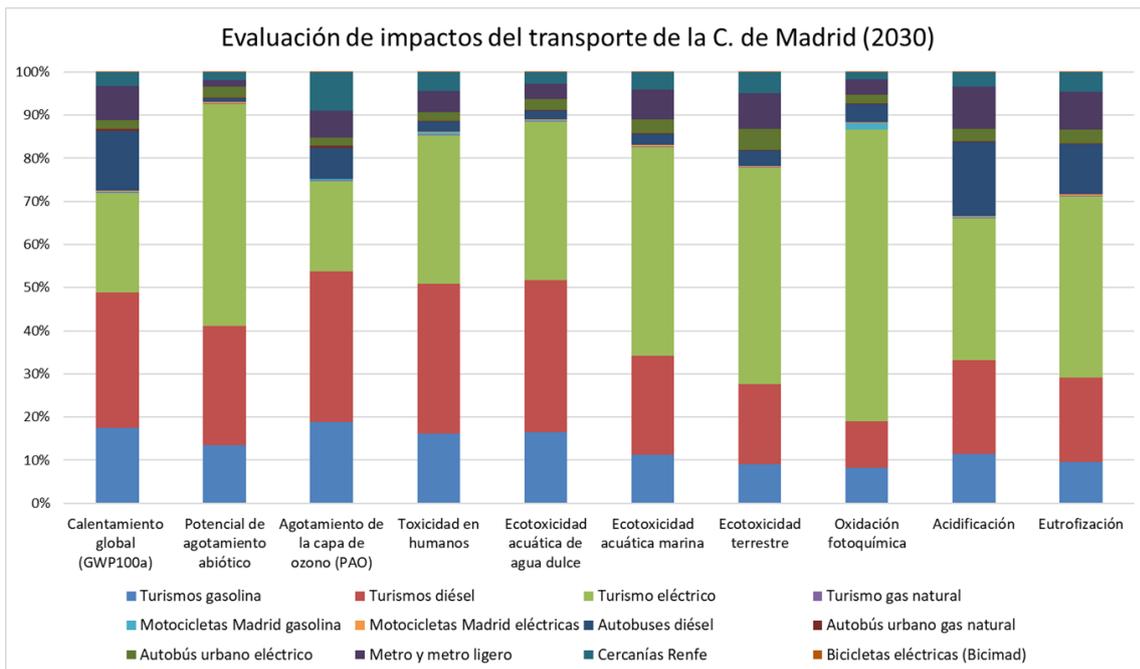


Figura 2. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2030

En los resultados de 2016 (Figura 1) se resalta el impacto que provoca la gran utilización del vehículo privado frente al resto de transportes. A destacar también en los resultados obtenidos del impacto medioambiental de la demanda de transporte de viajeros para el año 2016 el impacto resultante sobre el Calentamiento global en este

año, con un valor de 799,38 kg CO<sub>2</sub> eq/hab, si se compara con el escenario propuesto de demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid para el año 2030, en el que se supone dicho impacto se reducirá en un 30%. En lo referente a otros impactos, el de agotamiento de la capa de ozono disminuye un 34,5%, la toxicidad en humanos un 23,8% y la ecotoxicidad acuática de agua dulce un 20%. Sin embargo, en el escenario futuro propuesto se produce, entre otros impactos que crecen, un aumento de la oxidación fotoquímica en un 58% debido, principalmente, al cambio de tecnología hacia vehículos eléctricos, lo que supone una mayor utilización de materiales no renovables, en su fabricación, y un mayor uso de electricidad, en su uso, lo que provoca mayores impactos sobre el medio ambiente.

La demanda acumulada de energía estimada en el año 2016 por el transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid es de 13.000 MJ/hab que equivale a 84.070,94 TJ, considerando la población de 6.466.996 habitantes (INE. Instituto Nacional de Estadística, 2016), destacando la gran demanda de energía del vehículo privado frente al resto de vehículos. En el escenario propuesto de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid para el año 2030 la demanda total acumulada de energía se reduciría un 14% suponiendo un total de 9.698,09 MJ/hab que equivalen a 72.088,19 TJ, si se considera la población estimada para 2030 por el INE (2018) de 7.433.229 habitantes, esto se debe al cambio de tecnología y al fomento del uso del transporte público, pues en 2016 los turismos representan un 86% de la demanda total de energía y en el 2030 se ha estimado que representarían un 69% del total.

### Conclusiones

Mediante este proyecto se ha estimado el gran impacto medioambiental del transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid en el año 2016. Las principales causas del gran impacto que ejerce este sector del transporte de personas sobre el medio ambiente se deben a la gran demanda existente de turismos con motores de gasolina y diésel en la Comunidad de Madrid que generan gran cantidad de emisiones contaminantes en su ciclo de vida, junto con la baja ocupación media de los vehículos. Una posible solución para la reducción del impacto sobre el calentamiento global y sobre el agotamiento de la capa de ozono podría ser la utilización de motocicletas y turismos eléctricos, aunque se debe tener en cuenta el mayor impacto que estos vehículos producen en el agotamiento de recursos del medio debido a los materiales de

los que están fabricados estos vehículos, sobre todo por el material de las baterías. Otra posible solución sería el aumento del uso del transporte público del que se ha estimado que, pese a tener grandes impactos por unidad por kilómetro, al entrar en consideración su índice de ocupación, el impacto por viajero por kilómetro se ve muy reducido y es bastante menor que el de los turismos.

En la propuesta futura que se ha estimado, basada en la consideración de medidas y tendencias que se espera se produzcan en el sector, destacando el aumento del uso de vehículos eléctricos y del transporte público, se produce una reducción en el impacto total del transporte de viajeros sobre el calentamiento global, principalmente debido a la bajada que se experimentará en este impacto correspondiente a los turismos y a las motocicletas, y todo ello a pesar de que, debido a su mayor volumen, el impacto del transporte público sobre el calentamiento global aumenta.

En el estudio se estima que la reducción de emisiones que supone el escenario futuro propuesto no alcanza el objetivo de reducción de CO<sub>2</sub> del 35% de media para España que plantea el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), aunque se aproximaría, pues en esta estimación se llega a conseguir una reducción del 25%. Esto puede deberse a las limitaciones de este proyecto, pues los resultados serían más favorables si se considerara en el periodo de tiempo analizado: un posible cambio en el mix energético, una mayor eficiencia futura de los tipos de vehículos analizados o de sus baterías o componentes, un aumento en la ocupación o la aparición de nuevos tipos de vehículos con novedosas tecnologías.

### Referencias

Ecoinvent (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Disponible en [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)

INE. Instituto Nacional de Estadística (2016). Población Comunidad de Madrid 2016

INE. Instituto Nacional de Estadística (2018). Proyecciones de población Comunidad de Madrid

ISO (2006 a). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006).

ISO (2006 b). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006).

Ministerio para la Transición Ecológica (2019). Borrador del Plan Nacional Integrado De Energía y Clima 2021-2030. Disponible en [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)



# ENVIRONMENTAL COMPARISON OF DIFFERENT TYPES OF PASSENGER TRANSPORT USING A LIFE CYCLE ANALYSIS PERSPECTIVE

**Author: Caballero Ruiz, Inmaculada.**

Directors: González Arechavala, Yolanda. Martín Sastre, Carlos

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## PROJECT SUMMARY

### Introduction

The economic development, the improvement of infrastructures and the great availability of means of transport are realities that are favoring an increase in the movement of people that is causing a high negative impact on the environment.

This impact of passenger transport in climate change generates a great concern, becoming a priority in the future emission reduction targets. One of the instruments to analyze the possible reduction of the impact of this sector is the Life Cycle Analysis (LCA). The LCA allows to identify the impact generated from the first step of obtaining the raw material that will be used for the construction of the components of the vehicle, passing through the impact that originates its use, until the one generated in the final process of waste or recycling of it. Previous studies have used this technique for the analysis of types of transport, mainly to compare the impact of the entire life cycle of different types of transport.

The aim of this project is to analyze, from a life cycle perspective, the current impact (2016) of passenger transport in the Community of Madrid and to estimate the effect that the policies and trends known for this sector will have on the impacts generated in 2030. In particular the following types of transport will be analyzed and compared: petrol, diesel and electric passenger cars, electric and petrol motorcycles, electric bicycles, as well as, within public transport, buses, metro and suburban trains; obtaining the environmental impact of current passenger transport and the foreseeable one in 2030 in the indicated area.

## Methodology

In order to carry out the LCA of the different types of transport in the Community of Madrid in the 2016 scenario and for the future 2030 scenario, the phases indicated by the international standards ISO 14040-2006 (ISO, 2006 a.) and ISO 14044 -2006 (ISO, 2006 b.) have been followed. The phases are: definition of the objective and scope of the analysis, inventory analysis, evaluation of impacts and interpretation of results.

First, a review of existing studies in the LCA literature of passenger transport has been carried out. Then, to carry out in this project the analysis of the impact of passenger transport in the Community of Madrid has on the quality of its air, in the definition of the case study have been determined the types of transport of which the analysis is composed, as well as the stages of the life cycle that it contains, which are the extraction of raw materials, production of vehicles and fuel, the use and maintenance stage and the end of life stage, including the transportation and dismantling of the vehicle. In the same way, the current regulations applicable to passenger transport and its effect on environmental pollution, European Regulations, National Air Quality Plan and Energy Transition have been analyzed. The objectives for reducing the impact produced and the measures that have been proposed to meet these objectives have been studied, as well as the current transport situation in Spain and the Community of Madrid.

The ACV of the case study was made using the SimaPro tool, which provides a user interface for modelling and analyzing a product following ISO 14040 (ISO, 2006 a.) and ISO 14044 (ISO, 2006 b.) and information from the Ecoinvent 3.3 database has been used with data from 2016. The types of transport analyzed are: Euro passenger cars (petrol, diesel and natural gas), electric cars, petrol and electric motorcycles, diesel, natural gas and electric buses, metro, suburban trains and electric bicycle. Through the software, each of these types of transport has been analyzed using the CML-IA method, from the Center of Environmental Science (CML) of Leiden University in The Netherlands, obtaining results from the following categories of environmental impact: Global Warming, Abiotic Depletion Potential, Ozone Depletion, Human Toxicity, Freshwater Aquatic Ecotoxicity, Marine Aquatic Ecotoxicity, Terrestrial Ecotoxicity, Photochemical Oxidation, Acidification and Eutrophication. Accumulated Energy Demand has also been calculated using the Cumulative Energy Requirements Analysis (CERA) method, (Ecoinvent, 2010).

In the Inventory Analysis stage of this project, the numerical input data of the analysis, data calculated on based of information collected from various sources of recognized transport prestige, has been included with the aim of quantifying the passenger transport demand that occurs in the Community of Madrid in 2016 (pkm) and the standardized passenger transport demand per population unit (pkm / inhabitant) classified by type of vehicle. It also presents the estimated demand for passenger transport for this community in the year 2030, calculated taking into consideration the trends in promoting public transport, the commitment to new technologies such as electric and natural gas vehicles, as well as the trend of shared use of the vehicle and greater mobility. This situation of passenger transport for the future forecast has been based on documentation and various reports, specially focusing on the draft of the Integrated National Energy and Climate Plan (PNIEC) 2021-2030 of IDAE (Ministerio para la Transición Ecológica , 2019).

## Results

Prior to the impact analysis of the demand, the Impact Analysis stage presents an analysis of the impact of Comparative Global Warming of passenger cars and public transport according to the life cycle phases, a comparative analysis of the impact per km (g / km), accumulated energy demand (MJ / km) and an analysis of the impact per passenger (g / pkm) of all transport analyzed.

Finally, the results of the analysis of passenger transport demand in the Community of Madrid in 2016 (Figure 1) and 2030 (Figure 2) are presented, with a comparison of the evolution of the impacts between both years for the different types of transport analyzed.

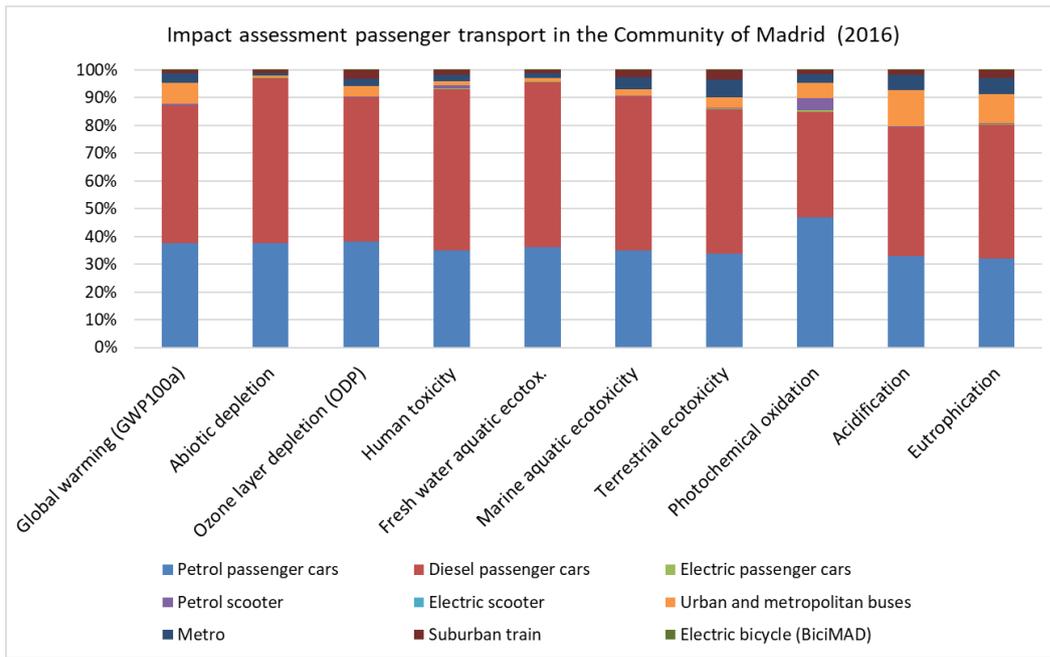


Figure 1. Impact assessment for Passenger transport in the Community of Madrid in 2016

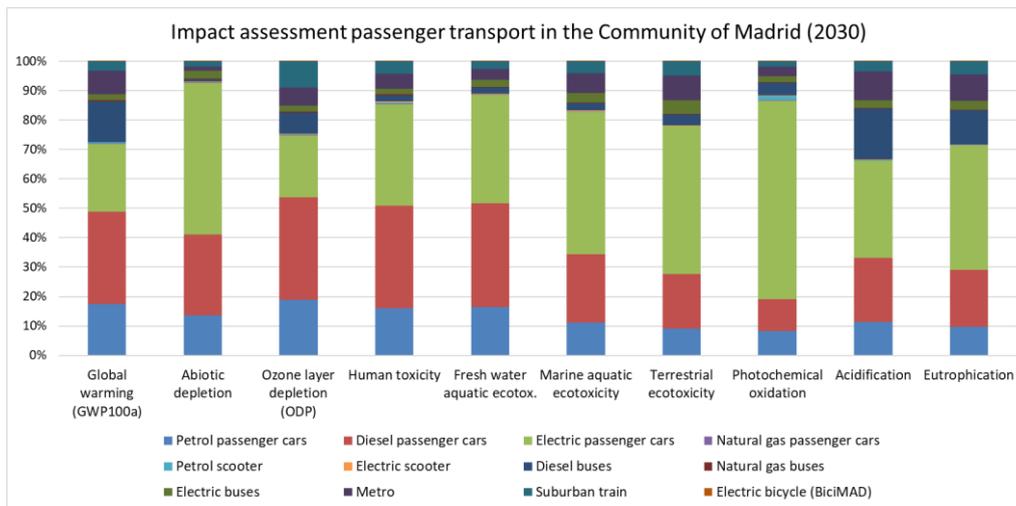


Figure 2. Impact assessment for Passenger transport in the Community of Madrid in 2030

The results of 2016 highlight the impact caused by the large use of private vehicles compared to other types of transport. It is also remarkable in the results obtained the impact on Global Warming in 2016, with a value of 799.38 kg CO<sub>2</sub> eq / inhabitant, compared to the proposed scenario of demand for passenger transport in the Community of Madrid for 2030, in which the impact is supposed to be reduced by 30%. In terms of other impacts, in the proposed scenario of 2030 the depletion of the ozone layer decreases by 34.5%, the human toxicity by 23.8% and aquatic ecotoxicity of fresh water

by 20%. However, in the proposed future scenario, among other impacts that are growing, there is an increase of 58% in photochemical oxidation, mainly due to the change in technology towards electric vehicles, which means a greater use of non-renewable materials in their manufacture, and a greater use of electricity in their use, which causes greater impacts on the environment.

The accumulated energy demand estimated in 2016 by passenger transport in the Community of Madrid is of 13,000 MJ / inhabitant, equivalent to 84,070.948 TJ, considering the population of 6,466,996 inhabitants (INE. Instituto Nacional de Estadística, 2016), highlighting the great demand of energy demanded by private vehicles and suburban trains compared to the rest of vehicles. In the proposed scenario of passenger transport in the Community of Madrid for 2030 the accumulated demand of energy would be reduced by 14%, a total of 9,698.09 MJ / inhabitant, equivalent to 72,088.19 TJ considering the estimated population by INE (2018) for 2030 of 7,433,229 inhabitants. This is due to the change in technology and the promotion of the use of public transport, since in 2016 passenger cars account for 86% of energy demand and in 2030 its estimated representation is approximately 69%.

### Conclusions

This project has estimated the great environmental impact of passenger transport in the Community of Madrid in 2016. The main causes of the great impact that this sector of passenger transport has on the environment are due to the great existing demand for passenger cars with petrol and diesel engines in the Community of Madrid that generate a large amount of polluting emissions in their life cycle, together with the low average occupancy of vehicles. A possible solution for reducing of the impact on global warming and ozone depletion could be the use of motorcycles and electric cars, although the greater impact that these vehicles produce in the depletion of natural resources should be taken into account due to the materials they are made of. Another possible solution would be the increase in the use of public transport which has been estimated that, despite having large impacts per unit per kilometer, when considering its occupancy rate, the impact per passenger per kilometer is very small and is quite less than that of passenger cars.

In the future proposal that has been estimated, based on the consideration of measures and trends that are expected to occur in the sector, mainly the increase in the

use of electric vehicles and public transport, there is a reduction in the total impact of passenger transport on global warming, mainly due to the decrease that will be experienced corresponding to cars and motorcycles and all this, despite the fact that due to its greater volume, the total joint impact of public transport on global warming increases.

In the study it is estimated that the reduction of emissions implied by the proposed future scenario does not reach the 35% average CO<sub>2</sub> reduction target for Spain proposed by the Integrated National Energy and Climate Plan (PNIEC), although it would be quite close, as this estimate achieves a 25% reduction. This may be due to the limitations of this project, since the results would be more favorable if it were considered in the period of time analyzed: a possible change in the energy mix, a greater future efficiency of the types of vehicles analyzed or their batteries or components, an increase in occupation or the appearance of new types of vehicles with innovative technologies.

### References

Ecoinvent (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Available in [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)

INE. Instituto Nacional de Estadística (2016). Población Comunidad de Madrid 2016

INE. Instituto Nacional de Estadística (2018). Proyecciones de población Comunidad de Madrid

ISO (2006 a). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006).

ISO (2006 b). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006).

Ministerio para la Transición Ecológica (2019). Borrador del Plan Nacional Integrado De Energía y Clima 2021-2030. Available in [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

## Contenido

1. Introducción .....	1
1.1 Estado del arte .....	3
1.1.1 Introducción al Análisis ciclo de vida .....	3
1.1.2 Estudios previos .....	5
1.2 Motivación .....	8
1.3 Objetivos .....	9
1.4 Metodología .....	9
2. Análisis del ciclo de vida del caso de estudio .....	11
2.1 Descripción del modelo de análisis (SIMAPRO).....	11
2.2 Caso de estudio: Objeto y alcance.....	11
2.2.1 Indicadores de impacto medioambiental.....	14
3. Situación del estudio .....	17
3.1 Normativas .....	17
3.1.1 Normativa europea sobre contaminantes .....	17
3.1.2 Plan nacional de calidad del aire .....	20
3.1.3 Transición energética .....	21
3.2 Estado actual del sector del transporte en España.....	25
3.3 El transporte en la Comunidad de Madrid.....	28
4. Análisis de inventario.....	31
4.1 Datos de entrada para el análisis .....	31
4.2 Análisis del escenario estado actual, Comunidad de Madrid 2016.....	32
4.3 Análisis del escenario futuro, Comunidad de Madrid, 2030.....	35
4.3.1 Documentación sobre previsiones futuras.....	35
4.3.2 Definición del caso futuro de estudio.....	39
5. Análisis de impacto .....	45
5.1 Análisis de la demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid, año 201653	
5.1.1 Resultados generales .....	53
5.1.2 Resultados de los turismos .....	63
5.1.3 Resultados de las motocicletas .....	65
5.1.4 Resultados del transporte público.....	67
5.2 Análisis de la demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid, año 203069	

5.2.1 Resultados generales .....	69
5.3 Comparación de impactos entre los escenarios de 2016 y 2030 .....	74
5.3.1 Resultados de Calentamiento global .....	74
5.3.2 Resultados de otros impactos .....	77
6. Conclusiones .....	81
7. Bibliografía .....	85

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de los vehículos en el Simapro (Elaboración propia a partir de la información de SimaPro) .....	13
Tabla 2. Normas EURO turismos gasolina. (Elaboración propia con datos del Portal web de dieselnet.com) .....	19
Tabla 3. Normas EURO turismos diésel. (Elaboración propia con datos del Portal web de dieselnet.com) .....	19
Tabla 4. Valor límite, valor objetivo y umbrales de alerta para protección de la salud (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017) . .....	20
Tabla 5. Valor límite, valor objetivo y umbrales de alerta para protección de la salud (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017) . .....	21
Tabla 6. Emisiones de gases de efecto invernadero en España. (Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018) .....	22
Tabla 7. Número de vehículos en España según distintivos medioambientales (Elaboración propia con datos de la Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018). .....	24
Tabla 8. Datos ocupación y km recorrido Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos del Ministerio de Fomento, 2017 y S.G. de Explotación y Gestión de Red, 2014) .....	33
Tabla 9. Resultado de personas - km de turismos Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos calculados y datos de la DGT, 2017) .....	34
Tabla 10. Resultado de personas - km de motocicletas Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos calculados y datos de la DGT, 2017) .....	34
Tabla 11. Datos de entrada en pkm y pkm/hab de la Comunidad de Madrid en el 2016.....	35
Tabla 12. Definición del sistema energético actual y futuro. (TIMES-Sinergia (Sistema Integrado para el Estudio de la Energía) de la Dirección General de Política Energética y Minas) .....	39
Tabla 13. Tabla resumen y comparativa de datos de entrada caso actual y futuro .....	44
Tabla 14. Resultados de emisiones (g/km) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes. ....	48
Tabla 15. Resultados de Demanda Acumulada de Energía (MJ/km) durante todo el ciclo de vida de los distintos transportes .....	50
Tabla 16. Ocupación de los vehículos.....	51
Tabla 17. Resultados de emisiones (g/pkm) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes.....	52
Tabla 18. Resultados de emisiones (kg/hab) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes de la C. de Madrid año 2016 .....	54
Tabla 19. Energía consumida (MJ/hab) caso actual C. de Madrid 2016.....	55
Tabla 20. Resultados de emisiones (kg/hab) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes de la C. de Madrid año 2030 .....	70
Tabla 21. Energía consumida (MJ/hab) caso futuro C. de Madrid 2030 .....	71



## Índice de figuras

Figura 1. Impactos del cambio climático. Ejemplo comparativo del vehículo eléctrico (BEV) y vehículos de combustión (ICEV) (European Environment Agency, 2018).....	3
Figura 2. Fases de un ACV según ISO 14040 (ISO-14040-2006).....	5
Figura 3. Límites del sistema de estudio del ciclo de vida.....	12
Figura 4. Hipótesis de aumento de la cuota relativa de turismos eléctricos en el total de matriculaciones (Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018).....	23
Figura 5. Evolución de matriculaciones de vehículos eléctricos en España (European alternative fuels observatory (EAFO).2018).....	27
Figura 6. Comparación de emisiones del Calentamiento global de los turismos según fases.....	46
Figura 7. Comparación de emisiones del Calentamiento global de los transportes públicos según fases.....	47
Figura 8. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2016...	57
Figura 9. Comparación de Calentamiento Global. C. de Madrid 2016.....	58
Figura 10. Comparación de Toxicidad en humanos. C. de Madrid 2016.....	58
Figura 11. Comparación de Ecotoxicidad acuática de agua dulce. C. de Madrid 2016.....	59
Figura 12. Comparación de Ecotoxicidad acuática marina. C. de Madrid 2016.....	59
Figura 13. Comparación de Ecotoxicidad terrestre. C. de Madrid 2016.....	60
Figura 14. Comparación de Acidificación. C. de Madrid 2016.....	60
Figura 15. Comparación de Eutrofización. C. de Madrid 2016.....	61
Figura 16. Impacto de los turismos en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016.....	64
Figura 17. Impacto de las motocicletas en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016.....	66
Figura 18. Impacto del transporte público y BiciMAD en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016.....	68
Figura 19. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2030.	73
Figura 20. Análisis comparativo del Calentamiento global de los turismos en la C. de Madrid 2016 y 2030.....	75
Figura 21. Análisis comparativo del Calentamiento global de las motocicletas en la C. de Madrid en 2016 y 2030. ....	75
Figura 22. Análisis comparativo del Calentamiento global del transporte público y BiciMAD en la C. de Madrid en 2016 y 2030.....	76
Figura 23. Comparación de la Oxidación fotoquímica, Eutrofización, Acidificación y Ecotoxicidad terrestre de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.....	78
Figura 24. Comparación del Potencial de agotamiento abiótico de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.....	78
Figura 25. Comparación de la Toxicidad en humanos y Ecotoxicidad acuática de agua dulce de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.....	79
Figura 26. Comparación de la Ecotoxicidad acuática marina de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.....	79



## 1. Introducción

El progresivo desarrollo económico, la continua mejora de las infraestructuras y el aumento del parque móvil, son factores que están potenciando y favoreciendo el movimiento de las personas y mercancías. Estos factores están suponiendo un alto impacto negativo en el medio ambiente por el que existe una gran inquietud social.

En este contexto, enmarcado en la realidad del cambio climático, entendido éste como la variación global del clima de la Tierra que está afectando a todos y cada uno de los países y continentes, se ha generado una creciente preocupación en la sociedad por involucrarse en un proyecto de progreso sostenible. Tanto es así que Naciones Unidas (NU) ha plasmado esta inquietud en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en los que se busca, además de otros objetivos, una sociedad con una economía donde se controlen y reduzcan las emisiones contaminantes, especialmente en sus objetivos 12 “Producción y consumo responsable” y en el 13 “Acción por el Clima” (NU, 2015).

Según el informe de la Comisión de Expertos de Transición Energética (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019) en España un 25% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> corresponden al sector del transporte, y de las emisiones de este sector el 95% corresponden al transporte por carretera, dónde los automóviles son los principales emisores.

Dentro del total de emisiones contaminantes las atmosféricas tiene un destacado papel y son las que normalmente se miden en las zonas urbanas teniendo su origen en 2 fuentes: móviles (tráfico rodado) y fijas (industrias, usos residenciales -climatización-, y procesos de eliminación de residuos) (Ballester, 2005).

La preocupación por la contaminación es mayor en las grandes ciudades debido a la concentración de vehículos en ellas. Así, en Madrid desde el 2010, en reiteradas ocasiones, se han superado los límites máximos de dióxido de nitrógeno en los análisis de contaminación atmosférica, lo que ha llevado a implantar medidas para limitar esta alta polución. Dichas medidas afectan directamente al tráfico privado ya que el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente afirma que el tráfico rodado es el principal causante de la contaminación en una atmósfera urbana, con una contribución superior al 75% en aquellos contaminantes que más preocupan en este tipo de atmósferas como son las partículas materiales (PM10 y PM2,5) y los óxidos de nitrógeno (NOx) (Ecodes & Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2010). Desde entonces, se han llevado a cabo restricciones en el uso de determinados vehículos en zonas de la ciudad cuando se dan situaciones de alta contaminación.

Teniendo en cuenta la concienciación de la sociedad por los problemas medioambientales originados por el transporte, el consumidor medio comienza a mostrar preocupación por el distinto nivel de contaminación que generan los diferentes tipos de transporte existentes, aspecto que entra en consideración en la elección del tipo de transporte a utilizar por parte del usuario.

Según el estudio de la Fundación Adecco (Fundación Adecco, 2013), un 30% de los consumidores españoles afirman que dejarían de comprar productos y servicios de empresas que no se declarasen comprometidas con el desarrollo sostenible. Pero hay que considerar que, para obtener una información clara y completa para decidir, es necesario ser conscientes de que el total de emisiones procedentes del transporte no se debe sólo a las emisiones de la fase de uso, sino que también se deben considerar todas las generadas en su ciclo de vida. Bajo esta concepción se deberán identificar y valorar las emisiones generadas desde el primer momento de la obtención de la materia prima que se utilizará para la construcción de los componentes del vehículo hasta las generadas en el proceso final de desecho o reciclado del mismo.

En referencia al ciclo de vida y su importancia, Naciones Unidas (PNUMA SETAC, 2003) declara: “Las necesidades humanas deben satisfacerse con productos y servicios hechos para cumplir ‘funciones’ específicas, como proporcionar alimento, refugio y movilidad, y que sean suministrados mediante sistemas optimizados de consumo y producción que no rebasen la capacidad del ecosistema”. Sin embargo, son pocos los estudios realizados que se refieren al conjunto de las fases del ciclo, centrandose en su mayoría la atención en el análisis de la fase de uso como es el caso de “*An urban transport emission model for the Antwerp area*” de Mensink, C. et al. (2000).

En lo que respecta a los medios de transporte, la Agencia Europea del Medio Ambiente (European Environment Agency, 2018) proporciona un análisis comparativo del impacto sobre el cambio climático de las diferentes fases del ciclo de vida de los turismos eléctricos, gasolina y diésel (Figura 1). Y aunque los datos indican que la fase de uso tiene un gran peso en el impacto contaminante de los distintos vehículos, el análisis de ciclo de vida de cada uno de ellos muestra la importancia del resto de fases en el impacto total.

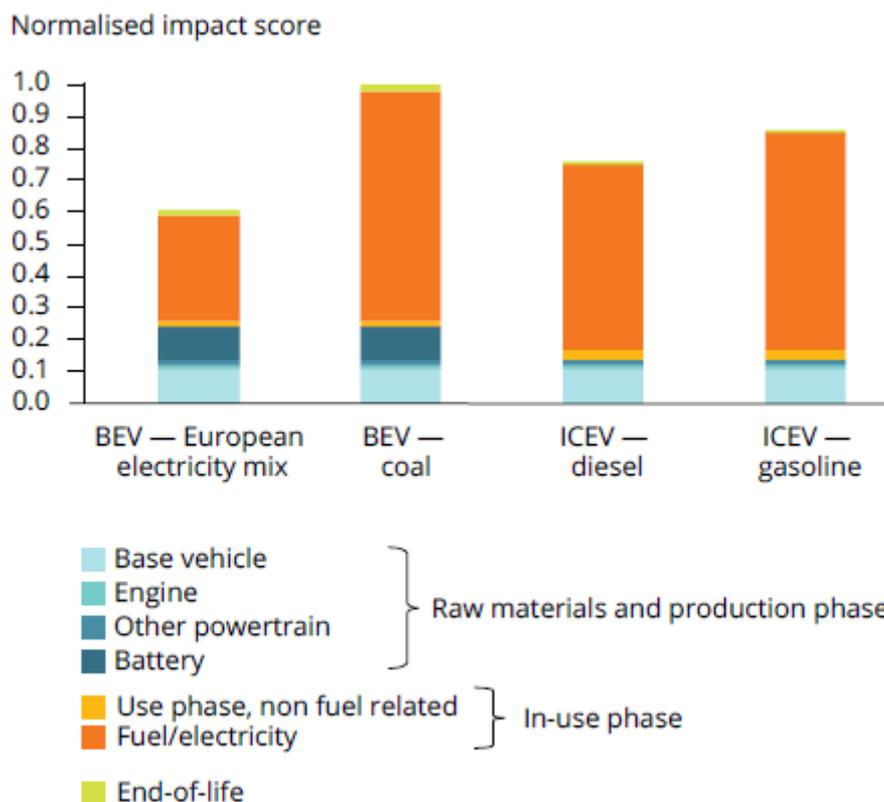


Figura 1. Impactos del cambio climático. Ejemplo comparativo del vehículo eléctrico (BEV) y vehículos de combustión (ICEV) (European Environment Agency, 2018)

Por todo lo anteriormente expuesto, el estudio se centrará en analizar el impacto ambiental que tendrán los diferentes tipos de transporte de viajeros haciendo uso de la metodología de análisis de ciclo de vida del parque móvil de la Comunidad de Madrid. De dicho análisis se obtendrán unos resultados que se acercarán a la realidad del impacto ambiental que provoca el transporte en esta área estudiada tanto en el año 2016, como en una propuesta de escenario futuro del 2030.

## 1.1 Estado del arte

### 1.1.1 Introducción al Análisis ciclo de vida

El impacto ambiental del uso de vehículos, considerado en su totalidad, se realiza mediante el análisis de su ciclo de vida (ACV).

La primera norma internacional de la serie ISO 14040 sobre ACV se publicó en 1997, titulada “*Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework* “. En la norma actual, UNE-EN ISO 14040 (ISO, 2006 a.) se define el Análisis de Ciclo de Vida como “una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un

producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

El análisis del ciclo de vida (ACV) estudia, por tanto, los aspectos ambientales y los impactos potenciales del ciclo de vida de un producto o actividad, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Teniendo en cuenta todas las fases intermedias como el transporte y preparación de materias primas o recursos, transformación, distribución, uso, etc.

Las categorías generales de impactos medioambientales según la ISO International Standard, (ISO, 2006 a. y b.) que precisan consideración son el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas.

Las normas de referencia para la realización de un ACV son:

- Norma UNE-EN ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia (ISO, 2006 a.).
- Norma UNE-EN ISO 14044 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices (ISO, 2006 b.).

De acuerdo con la metodología según la normativa ISO 14040-2006 y ISO 14044-2006, un proyecto de ACV debe dividirse en cuatro fases:

1. Objetivos y alcance del estudio. Incluye los límites del sistema y el nivel de detalle. Se establece la unidad funcional que describe la función principal del sistema.
2. Análisis del inventario. Obtención de datos y procesos de cálculo para identificar los efectos ambientales asociados a la unidad funcional, denominada carga ambiental.
3. Análisis del impacto. El objetivo de esta fase es proporcionar información que ayude a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida del producto para una mayor comprensión de la importancia ambiental.
4. Interpretación. Combinación de los resultados de análisis de inventario con la evaluación del impacto, en forma de conclusiones, recomendaciones o mejoras.

Pero estas fases no son puramente secuenciales. El ACV (Figura 2) se basa en una técnica iterativa que permite ajustar el nivel de detalle gracias a las sucesivas iteraciones.

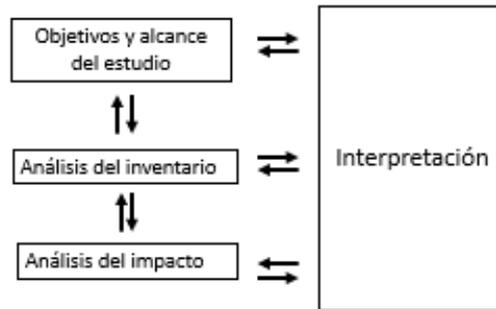


Figura 2. Fases de un ACV según ISO 14040 (ISO, 2006 a.)

### 1.1.2 Estudios previos

El interés inicial por el ACV se desencadenó por la crisis del petróleo en los comienzos de los años setenta del siglo pasado. Esta crisis hizo que los países desarrollados, principalmente Estados Unidos, se empezaran a preocupar por la dependencia energética de los combustibles fósiles para el crecimiento industrial y de la economía. Así, se despertó la necesidad de tomar medidas de ahorro energético y de buscar energías alternativas para desarrollar productos responsables con el medio ambiente.

Fue en 1969 cuando se realizó el primer análisis, como se conoce hoy en día de ciclo de vida para Coca Cola Company por el Midwest Research Institute (MRI) (Midwest Research Institute, 1969). En ese estudio se determinaban las cantidades de energía, materiales e impactos ambientales asociados al ciclo de vida de los envases, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este estudio se realizó para tener en cuenta los impactos ambientales a la hora de elegir entre envases de plásticos o de vidrio, determinar la conveniencia de fabricar en la misma empresa o externamente y saber qué hacer en la etapa final del envase.

Otros países pioneros en estudios de ciclo de vida son Alemania, Italia, Suiza y Suecia. Desde entonces, se han realizado numerosos estudios de ACV. Estos análisis contienen cada vez más detalle debido a la utilización de las nuevas tecnologías que permiten el desarrollo del análisis con programas muy avanzados especializados en dicho estudio.

Estudios recientes muestran que se han realizado ACV para comparar las tecnologías de generación eléctrica obteniendo un criterio de impacto ambiental sobre el que basar la decisión acerca de qué tecnología utilizar, como es el caso de “*Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*” de Turconi et al. (2013). También se han realizado ACV para mejorar los procesos de producción de los vehículos y saber el impacto ambiental de cada una de sus fases como el que se muestra en “Análisis del impacto

medioambiental de un automóvil, a lo largo de su ciclo de vida” de Viñoles Cebolla et al. (2003) y el realizado por AUDI AG (2011) “*Life Cycle Assessment*” que analiza el ciclo de vida del vehículo Audi A6.

Debido a la preocupación que provocan las emisiones generadas por el sector del transporte, se han realizado algunos análisis ACV comparando diferentes tipos de vehículos como: el informe empresarial “*Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems*” de General Motors Corporation (2001), el estudio realizado por profesionales del sector “*Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability*” de Le Petit (2017) y el estudio de ámbito académico “Análisis del ciclo de vida (ACV) de automóviles con diferentes sistemas de propulsión” de Iglesias Gómez (2017).

Estos estudios concluyen que el vehículo eléctrico es el que menos impacto ambiental genera debido principalmente a las bajas emisiones que produce en su fase de uso. Sin embargo, el estudio “*Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*” de Hawkins et al. (2013) resalta que el vehículo eléctrico tiene un alto impacto ambiental en la fase de producción en comparación con los vehículos de gasolina y diésel. Si se optara por estos vehículos, para reducir aún más su impacto ambiental habría que perfeccionar la fase de producción del vehículo eléctrico e, igualmente, promover el uso de recursos eléctricos renovables para la recarga de sus baterías.

Otros estudios han centrado su análisis en el impacto ambiental que provoca el transporte de pasajeros en diferentes áreas geográficas tales como: Brasil, Lyon, Los Ángeles y Bogotá.

En el caso de Brasil, se realizaron dos estudios de análisis del transporte. En el estudio de Dreier et al. (2018) se limitó el análisis a comparar las emisiones (masa/km y masa/pkm) y energía utilizada en todo el ciclo de vida de los diferentes tipos de autobuses en distintas rutas de la ciudad de Curitiba. Los autores mostraron la reducción de emisiones generadas por los autobuses eléctricos comparados con los convencionales, resaltando la importancia del aumento de la ocupación para favorecer la sostenibilidad. En el estudio de La Picirelli de Souza et al. (2018), el análisis consistió en la comparativa de las emisiones (masa/km) del ciclo de vida de los vehículos convencionales con vehículos de otros combustibles, con vehículos eléctricos enchufables, y con híbridos, existentes en el sistema de transporte de Brasil. Este estudio concluyó como otros estudios previos, que los vehículos eléctricos son los que menores emisiones emiten seguidos de los vehículos de etanol. En esta misma línea, otros estudios como los de Chester et al. (2013) y Cuéllar et al. (2016), realizan una comparación de las emisiones generadas en todo el ciclo de vida de los diferentes tipos de vehículos de las ciudades. Chester et al. (2013) compara las emisiones producidas por un tipo de automóvil frente al uso del autobús y el metro, en

masa/pasajero-milla transportada en la ciudad de Los Ángeles, remarcando la importancia del transporte público, su ocupación y la incorporación de nuevas tecnologías para la reducción de las emisiones del transporte. En relación con lo anterior, Cuellar et al. (2016) amplían el análisis comparativo a diferentes tipos de automóviles, autobuses, motocicletas y taxis de la ciudad de Bogotá, obteniendo los resultados de las emisiones en masa/pkm y resaltando los autobuses de biodiesel y eléctricos como los menos contaminantes. la comparación de los tipos.

Un avance respecto a los estudios anteriores es el que realiza François et al. (2017), al incluir características del modo de uso en la comparación del análisis de ciclo de vida de los transportes de la ciudad de Lyon. Los resultados de este análisis muestran las emisiones diarias por habitante del total de transportes de Lyon, estudiando la sensibilidad de la velocidad en la conducción y de la ocupación de los vehículos.

Como consecuencia del problema de emisiones que se presenta en la Comunidad de Madrid se han realizado estudios referentes a las emisiones que provoca el transporte en esta área. En lo referente al transporte de mercancías, López et al. (2009) realizaron un análisis comparativo de las emisiones del ciclo de vida de los camiones de diésel, biodiesel y gas natural, dónde mediante los resultados en kg/km concluyeron que, en el total del ciclo de vida, el camión de gas natural es el que produce menos emisiones.

Así mismo, el Ayuntamiento de Madrid consciente del impacto del transporte, pues anualmente presenta el Inventario de Emisiones de la Atmósfera (Comunidad de Madrid, 2018), solicitó la realización del informe “Madrid 2020-2030” (Siemens, 2017) en el que se analiza las principales causas de la contaminación y se plantean como principales medidas para la reducción de emisiones el fomento de los vehículos eléctricos y de gas natural, así como la restricción de la movilidad en el centro de la ciudad.

Este proyecto supone un avance en el impacto medioambiental del transporte de viajeros respecto a estudios anteriores porque:

- Incluye la totalidad de tipos de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid.
- Se realiza la comparación de los transportes en g/km y en g/pkm.
- Se realiza el análisis en su totalidad del impacto de los transportes según la distribución modal de la Comunidad de Madrid durante un año (datos referidos al año 2016), así como el impacto de una propuesta de escenario para el 2030.

## 1.2 Motivación

El marco descrito anteriormente ha puesto de manifiesto la necesidad de dar respuesta a la inquietud existente sobre qué vehículo usar para evitar el aumento de la contaminación ambiental, lo que facilitaría acercarse a los objetivos de la Unión Europea sobre la descarbonización del transporte. A su justificación también podemos añadir las siguientes motivaciones:

- Preocupación por el impacto medioambiental debido a los problemas relacionados con el cambio climático y la salud de las personas.
- Evolución creciente de la movilidad, debido a una sociedad global en la que el transporte es necesario para mantener las relaciones y la comunicación global.
- Conocer en mayor detalle el impacto de las diferentes fases del ciclo de vida del transporte con diferentes vehículos en el medio ambiente. Generalmente se habla del impacto de la fase de uso, no de todo su ciclo de vida.

En concreto, el trabajo pretende contribuir en la lucha contra el cambio climático proporcionando el análisis de impacto del transporte de pasajeros. Esto permitirá que el usuario pueda reducir, desde el conocimiento del sector, su consumo de energía y de generación de emisiones GEI (gases de efecto invernadero) con el ánimo de promover el cumplimiento de los objetivos climáticos y de energía asumidos por la UE para 2020 y las siguientes metas destacables del objetivo 13 de Naciones Unidas (NU, 2015):

- “Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”
- “Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana”

Para ello, se aborda el estudio del impacto medioambiental del transporte de pasajeros para los distintos vehículos utilizados para el desplazamiento de las personas en la Comunidad de Madrid proporcionando así, indirectamente, información relevante para el cumplimiento del objetivo 11 de los ODS: Ciudades y comunidades sostenibles. De igual manera, el análisis de impacto del transporte permitirá conocer cómo la industria automovilística está actuando para favorecer el cumplimiento del Objetivo 12: Producción y consumo responsable.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es analizar, desde una perspectiva de ciclo de vida, el impacto actual (2016) del transporte de viajeros en la comunidad de Madrid y estimar el efecto que tendrán las políticas y tendencias que se conocen para este sector sobre los impactos generados en el año 2030. En concreto, se analizarán y compararán los vehículos particulares de carretera de gasolina, diésel y eléctricos, las motocicletas eléctricas y de gasolina, la bicicleta eléctrica, así como los transportes públicos: los autobuses, el metro y el cercanías; obteniendo el impacto medioambiental del transporte de viajeros actual en el área señalada. Posteriormente, se analizará un escenario futuro, 2030, de dicho transporte en la misma área con el que se podrá comparar el efecto de las medidas de cambio modal y de la renovación del parque propuestas por los planes existentes de políticas y eficiencia energética.

Como objetivo específico se persigue el dar a conocer las emisiones en todo su ciclo de vida de los distintos tipos de vehículos.

### 1.4 Metodología

Antes de comenzar a realizar el análisis del ciclo de vida es necesario hacer un estudio previo del estado actual del sector del transporte, de los tipos de transporte, cantidad de vehículos en circulación y proyección del sector. También es necesario estudiar la normativa medioambiental que restringe el uso de éstos en algunas ciudades y conocer los objetivos medioambientales de los próximos años que afectan al sector del transporte de viajeros, así como la normativa aplicable al análisis de ciclo de vida.

Tras este estudio del ámbito, se requiere una búsqueda de información de recursos y datos de inventario necesarios para hacer el análisis del ciclo de vida. La información necesaria para el análisis se mostrará en el apartado de Análisis de inventario, dónde se presentarán los datos de entrada de la investigación. Estos incluirán, tanto para el estado actual como para el escenario futuro y en el área definida, el parque de vehículos de carretera, los kilómetros recorridos por éstos y su ocupación, así como el transporte de viajeros en servicios públicos como son: el autobús, el metro y el ferrocarril de cercanías.

En lo referente al software elegido, en los últimos años se han desarrollado numerosos programas para el cálculo de ACV, algunos a destacar son: GaBi (IKP), LCAiT (Chalmers) y Simapro (Pré Consultants). Estos programas tienen una base de datos interna que varía en extensión y calidad de datos en función del software y, a su vez, con el precio.

Para la realización del análisis de ciclo de vida (ACV) de este proyecto se utilizará el software SimaPro por su gran base de datos y por su potencial de análisis. El procedimiento por el que se llevará a cabo es el siguiente:

- En primer lugar, se necesitará un conocimiento y dominio previo del software y, siguiendo las normas ISO 14040 y ISO 14044, se establecerá una definición del objetivo y alcance del proyecto. Se establecerá así, en qué consistirá el modelo del sistema que representará el transporte, se incluirá el área de estudio, los vehículos a tener en cuenta, así como las entradas y salidas relevantes del sistema de estudio, y se buscarán datos e información necesarios para el análisis.
- Tras esto, se llevará a cabo un análisis del ciclo de vida con dicho software. Se analizarán los resultados obtenidos por el programa, evaluando y validando los resultados de impacto, desarrollando un informe del análisis y una comparativa del impacto ambiental de los vehículos elegidos.
- Por último, se presentarán las conclusiones pertinentes, incluyendo una comparativa del caso actual del impacto del transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid con el impacto de una propuesta de escenario futuro. Estudio, que se realizará considerando la tendencia del sector y las políticas y medidas establecidas para cambiar el uso del transporte, fomentando el transporte público. Igualmente se tendrá en cuenta la renovación del parque automovilístico.

## 2. Análisis del ciclo de vida del caso de estudio

### 2.1 Descripción del modelo de análisis (SIMAPRO)

La herramienta SimaPro ofrece un interfaz al usuario que permite modelar y analizar el ciclo de vida de un producto bajo las recomendaciones de la norma ISO 14040 (ISO, 2006 a.). El programa permite el cálculo de evaluación de impacto para cada etapa del modelo de estudio, permitiendo analizar diferentes escenarios de tratamiento de residuos y reciclaje, análisis de sensibilidad e incertidumbre.

SimaPro incorpora las bases de datos más importantes, como Ecoinvent, ELCD, Industry data, entre otras. Estas bases de datos proporcionan información documentada de los procesos que forman parte del ciclo de vida de miles de productos permitiendo obtener información real sobre su impacto medioambiental. La base de datos utilizada para este proyecto ha sido la de Ecoinvent 3.3 con datos del año 2016. Las otras opciones eran Ecoinvent 3.2 y 3.1 con datos del año 2015 y 2013, respectivamente.

### 2.2 Caso de estudio: Objeto y alcance

Utilizando la herramienta SimaPro, se ha realizado el modelado del sistema de transporte de la Comunidad de Madrid, analizando el inventario con el que cuenta cada tipo de vehículo.

Referente a la tipología de vehículos a considerar, que está en constante evolución en una búsqueda de una mayor eficiencia, teniendo en cuenta su sistema de propulsión, se pueden distinguir:

- Vehículo impulsado por gasolina: motor de combustión interna que utiliza la potencia creada por la explosión del combustible para expandir el gas produciendo el movimiento de los pistones.
- Vehículo impulsado por diésel/gasoil: motor de encendido por compresión donde se comprime el aire, consiguiendo una gran presión y temperatura y se inyecta el combustible, produciendo una autoinflamación que genera el movimiento.
- Vehículo híbrido no enchufable: vehículo que incorpora un motor eléctrico que da apoyo al uso del motor de combustión. Este tipo de vehículo se caracteriza porque las baterías del motor eléctrico no son enchufables. En este caso las baterías únicamente se recargan mediante la recuperación de energía cuando el vehículo frena, cuando circula en llano a velocidad constante y al decelerar.
- Vehículo eléctrico: Puede ser vehículo eléctrico de batería (BEV Battery Electric Vehicle) motor eléctrico al que se le proporciona la electricidad únicamente por medio

de baterías incorporadas en el vehículo enchufables a la red. También se considera vehículo eléctrico el híbrido enchufable (PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle) que combina la propulsión eléctrica almacenada en baterías con la propulsión de un motor de combustión interna. En este caso, las baterías de un PHEV se recargan al conectarlas a la red y con la recuperación de energía como los híbridos convencionales.

Habría que recalcar que en la actualidad los nuevos desarrollos de motores para los vehículos conviven con los vehículos tradicionales de gasolina y diésel. Según ANFAC (2017), el 48% de la flota de vehículos turismo y todoterreno matriculados en 2017 fueron diésel, pese a que se prevé que el futuro del sector sea el coche eléctrico. Así lo refleja el Informe de Bloomberg New Energy Finance (2016) donde se afirma que la progresiva reducción del precio de la batería eléctrica va a causar que la opción del vehículo eléctrico sea tanto la opción más económica como la mejor para controlar las emisiones a partir del 2020.

Para el estudio se ha utilizado la unidad funcional de transporte de viajeros de la comunidad de Madrid en 2016 y 2030 normalizada por habitante.

En el análisis realizado, cada proceso cuenta con todas las fases de ciclo de vida de un vehículo, las entradas y salidas de cada fase, las emisiones que produce y los materiales necesarios de cada fase, tal y como se muestra en la Figura 3.

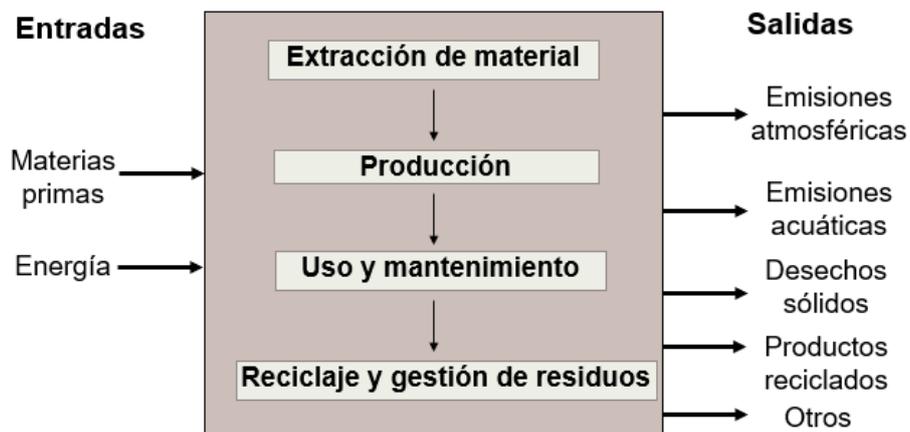


Figura 3. Límites del sistema de estudio del ciclo de vida

Para la simulación de las diferentes fases del ciclo de vida del vehículo se ha tenido en cuenta las características que recoge el programa SimaPro para cada tipo de vehículo (Tabla 1):

Tabla 1. Características de los vehículos en el Simapro (Elaboración propia a partir de la información de SimaPro)

Tipo de Vehículo	Características
Turismos Euro (gasolina, diésel y gas natural)	Vehículo medio con motor de 1.4-2 L 100 CV Peso 1.600 kg Vida del vehículo: 150.000 km
Turismos eléctricos	Baterías de 18 kWh Ion Litio 82 CV Peso total 1.180 kg Vida del vehículo: 150.000 km
Motocicletas gasolina	Motocicleta representa un promedio de las características de motocicletas de 50 cc a 150 cc (gasolina de dos y cuatro tiempo, 6-16 CV) Emisiones relacionadas con norma Euro 4 Vida del vehículo: 50.000 km
Motocicletas eléctricas	Baterías de 2,1 kWh Ion Litio 14 CV Peso total 122 kg Vida del vehículo: 50.000 km
Autobuses: diésel y gas natural	Autobús de 12 m 400 CV Peso 19.000 kg Vida del vehículo: 600.000 km
Autobuses eléctricos	Autobús de 12 m Baterías de 376 kWh de Ion Litio 310 CV Peso total 12.600 kg Vida del vehículo: 600.000 km
Metro	650 CV Peso 43,26 ton Vida media de 59,1 millones de pkm
Cercanías	Tren eléctrico regional 4500 CV Peso 162 ton Vida media de 191.000 mill. de pkm
Bicicleta eléctrica	0,68 CV Peso 23 kg Vida media: 15.000 km

El análisis del escenario propuesto del caso futuro se ha realizado teniendo en cuenta las mismas características del caso actual, lo que supone una limitación de los resultados de impacto a obtener al no considerar la eficiencia o avances tecnológicos que puedan producirse en los próximos años.

Las fases del ciclo de vida y las actividades dentro del ciclo de vida que se han tenido en cuenta durante el estudio son:

- **Extracción de material y producción**
  - Producción del combustible
  - Construcción de la carretera
  - Producción del vehículo: motor, carrocería
  - Transporte de los materiales

- **Uso del vehículo**

Esta fase tiene en cuenta el combustible medio consumido, así como, los km de vida media mencionados para cada tipo de vehículo.

- **Mantenimiento**

Incluye cambios de frenos, bandas, llantas, cristales, ruedas y aceites y su correspondiente transporte de compra y cuando se desecha.

- **Final de vida**

Incluye el transporte y desmantelamiento del vehículo. Tiene en cuenta las partes que se pueden reciclar.

### 2.2.1 Indicadores de impacto medioambiental

El término impacto se define en 1960 como una acción fuerte y perjudicial, así, junto con la palabra ambiental contiene un significado de efecto producido en el ambiente y los procesos naturales por la actividad humana y en un tiempo determinado (Perevochtchikova, 2013).

La evaluación de impacto ambiental incluye gran cantidad de datos de los ámbitos ambiental, social y económico, entre otros, que se utilizan para la toma de continuas decisiones en el desarrollo de la política ambiental. Con objeto de sintetizar la información e interpretarla de forma más simple surgen los indicadores ambientales. Estos indicadores representan un modelo empírico de la realidad y hacen posible cuantificar y comunicar la información relevante a diversos sectores, a la vez que permite la monitorización y evaluación de la situación ambiental.

En el análisis de SimaPro gracias al método de análisis de ciclo de vida CML-IA, del *Center of Environmental Science (CML) de Leiden University in The Netherlands* se consigue calcular los indicadores de impacto siguientes, que se corresponden a los establecidos por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 2006):

- **Calentamiento global (GWP100a):** es el potencial de calentamiento global calculado para un horizonte de tiempo de 100 años y se obtiene en kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono). El CO<sub>2</sub> equivalente es una medida que expresa en términos de CO<sub>2</sub> la masa de otros gases de efecto invernadero. La medida de CO<sub>2</sub> sólo hace referencia al

dióxido de carbono, mientras que CO<sub>2</sub> equivalente hace referencia al CO<sub>2</sub>, al CH<sub>4</sub>, al N<sub>2</sub>O y a los gases fluorados.

- **Potencial de agotamiento abiótico:** se refiere al agotamiento de los recursos abióticos sin incluir los combustibles fósiles que el INCYT (Instituto de investigación y proyección sobre ciencia y tecnología) define, estos son los recursos que rodean a los seres vivos y que, junto con ellos, conforman el ecosistema. Se mide en kilogramos equivalentes de Sb (Antimonio) (INCYT, 2016).
- **Agotamiento de la capa de ozono (PAO):** es la habilidad para agotar la capa de ozono, se conoce como potencial de agotamiento del ozono (PAO). A cada sustancia se le asigna un PAO relativo al CFC-11 (ONU Medio Ambiente, s.f.).
- **Toxicidad en humanos:** es el grado de efectividad que poseen las sustancias que, por su composición, se consideran tóxicas en el ser humano. Se mide en Kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>).
- **Ecotoxicidad acuática de agua dulce:** Este impacto está relacionado con las emisiones de metales a las masas de agua dulce que producen efectos tóxicos sobre las especies acuáticas. Se mide en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>).
- **Ecotoxicidad acuática marina:** Impacto relacionado con las emisiones de metales que producen efectos tóxicos sobre las especies acuáticas marinas. Se mide en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>).
- **Ecotoxicidad terrestre:** evalúa el efecto de las sustancias tóxicas sobre el ecosistema terrestre. Se mide en kilogramos equivalentes de 1,4-diclorobenceno (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>).
- **Oxidación fotoquímica:** se refiere a la formación de compuestos químicos reactivos (llamados fotooxidantes) mediante la reacción de ciertos contaminantes en el aire con la luz. Se mide en kilogramos equivalentes de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (Etileno).
- **Acidificación:** se refiere al proceso químico por el que algunas sustancias se transforman, adquiriendo características ácidas, provocando corrosión en los materiales con los que tiene contacto. Se mide en kilogramos equivalentes de SO<sub>2</sub> (Dióxido de azufre).

- **Eutrofización:** este impacto cubre los impactos potenciales derivados de altos niveles ambientales de macronutrientes, siendo el nitrógeno y el fósforo las sustancias más importantes. El exceso de nutrientes puede causar cambios indeseables en los ecosistemas terrestres y acuáticos llegando a contaminar el agua y hacerla no apta para el consumo (Red temática de bioenergía, 2017). Se mide en kilogramos equivalentes de PO<sub>4</sub> (Fosfato).

Por último, con objeto de analizar la energía usada por todo el ciclo de vida de los transportes, se presenta también el **Indicador de Demanda Acumulada de Energía** en MJ obtenido mediante el método de *Cumulative Energy Requirements Analysis* (CERA) (Ecoinvent, 2010). Este indicador incluye usos directos e indirectos de consumo de energía consecuencia de la construcción de materiales del vehículo y carreteras o la energía procedente del combustible.

## 3. Situación del estudio

En este capítulo, se presenta información y normativas de los transportes que ponen en situación el análisis a tratar.

### 3.1 Normativas

Se han revisado las siguientes normativas con la finalidad de conocer las normas referentes al transporte y a sus emisiones. En la revisión de estas normas se ha hecho más hincapié en la normativa que regula el transporte por carretera por ser el medio de transporte más utilizado en la Comunidad de Madrid. En “Los transportes y las infraestructuras. informe anual 2017” del Ministerio de Fomento (2018) se destaca la importancia del uso de transportes por carretera, señalándose que la utilización de este medio por las personas ha sido constante en los últimos años, teniendo en el año 2017 una participación en la distribución modal española del 86,21%.

#### 3.1.1 Normativa europea sobre contaminantes

Desde 1988 la Unión Europea establece en una normativa los límites de emisiones contaminantes procedentes de vehículos. La norma comenzó con acuerdos entre la UE y la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles (ACEA) pero, con el objetivo de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de una forma más exigente, evolucionó a la creación de Reglamentos.

Fijándose en el tratamiento dado a los turismos, el Reglamento CE443/2009 limitó en 130 g de CO<sub>2</sub>/km el promedio de emisiones que los turismos nuevos de todos los fabricantes debían alcanzar en el año 2015. El perfeccionamiento de la tecnología de los fabricantes de vehículos fue tal, que ya se llegó al objetivo de 132g/km en el año 2012, tres años antes de lo esperado. Ante ese efecto, se modificó el anterior Reglamento y se formuló el Reglamento CE 333/2014 estableciendo un límite de 95 CO<sub>2</sub>/km para el año 2020.

Debido a las críticas recibidas de la prueba que se realizaba a los vehículos, se estudió el modelo de conducción de los vehículos (NEDC, New European Driving Cycle) por el que se medía el cumplimiento de estas normativas, terminando con la polémica en septiembre de 2017 cuando la Comisión Europea (CE) estableció un nuevo modelo de conducción en el test llamado *Worldwide Harmonized Tlight Test Procedure* (WLTP). Junto a este modelo, la Comisión Europea anunció unos nuevos estándares de CO<sub>2</sub>, un límite de 80 g/km para 2025 y de 66,5 g/km para 2030.

Del mismo modo que la UE establece unos límites para las emisiones de CO<sub>2</sub>, desde 1992 existe una legislación para limitar emisiones de otros contaminantes. Estas normas denominadas “*EURO Standards*” limitan las emisiones de cuatro contaminantes perjudiciales para la salud de las personas a turismos, vehículos comerciales ligeros y vehículos de uso pesado. Los contaminantes regulados son:

- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- Monóxido de carbono (CO).
- Hidrocarburos (HC).
- Partículas contaminantes (PM): los componentes que se separan del gas de escape diluido a una temperatura máxima de 325 K (52 °C) mediante los filtros descritos en el procedimiento de ensayo para la verificación de las emisiones medias del tubo de escape.

Desde la primera normativa, llamada EURO 0, los vehículos vendidos en Europa estaban obligados a cumplir con los límites de emisiones que se establecían en las normas. Estas normativas se han ido desarrollando con los años hasta llegar a la actualidad: son las normativas Euro 1,2,3,4,5 y 6 para turismos y vehículos comerciales ligeros, y las normativas Euro I, II, III, IV, V y VI para vehículos pesados. Cada norma varía los límites contaminantes y el método de evaluación para cada clase de vehículo y tipo de combustible.

A continuación, se muestra un resumen (Tabla 2 y 3) de los límites establecidos en las normas Euro para los turismos. Hay que destacar que hasta la norma Euro 2 se sumaban los valores de HC + NO<sub>x</sub>; desde la Euro 3, estas medidas se limitan por separado. Y desde la norma 6 para gasolina y 5b para diésel se incluye el límite de número de partículas emitidas por kilómetro.

Tabla 2. Normas EURO turismos gasolina. (Elaboración propia con datos del Portal web de dieselnet.com)

Normas EURO para turismos de gasolina		Partículas g/km					Partículas #/km
<u>Norma</u>	<u>Fecha</u>	<u>CO</u>	<u>HC</u>	<u>HC+NOx</u>	<u>NOx</u>	<u>PM</u>	<u>PN</u>
<b>EURO 1</b>	jul-1992	2,72	-	0,97	-	-	-
<b>EURO 2</b>	ene-1996	2,2	-	0,5	-	-	-
<b>EURO 3</b>	ene-2000	2,3	0,2	-	0,15	-	-
<b>EURO 4</b>	ene-2005	1	0,1	-	0,08	-	-
<b>EURO 5</b>	sep-2009	1	0,1	-	0,06	0,005	-
<b>EURO 6</b>	sep-2014	1	0,1	-	0,06	0,005	6 x10 <sup>11</sup>

Tabla 3. Normas EURO turismos diésel. (Elaboración propia con datos del Portal web de dieselnet.com)

Normas EURO para turismos de diésel		Partículas g/km				Partículas #/km
<u>Norma</u>	<u>Fecha</u>	<u>CO</u>	<u>HC+NOx</u>	<u>NOx</u>	<u>PM</u>	<u>PN</u>
<b>EURO 1</b>	jul-1992	2,72	0,97	-	0,14	-
<b>EURO 2 IDI</b>	ene-1996	1	0,7	-	0,08	-
<b>EURO 2 DI</b>	ene-1996	1	0,9	-	0,1	-
<b>EURO 3</b>	ene-2000	0,64	0,56	0,5	0,05	-
<b>EURO 4</b>	ene-2005	0,5	0,3	0,25	0,025	-
<b>EURO 5a</b>	sep-2009	0,5	0,23	0,18	0,05	-
<b>EURO 5b</b>	nov-2009	0,5	0,23	0,18	0,05	6 x10 <sup>11</sup>
<b>EURO 6</b>	sep-2014	0,5	0,17	0,08	0,05	6 x10 <sup>11</sup>

Estos contaminantes de los que se han establecido límites están relacionados con las categorías de impacto ambiental que este trabajo analiza en el ciclo de vida de los vehículos de la siguiente manera (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.):

- El monóxido de carbono (CO) está relacionado con los efectos sobre la salud humana y sobre la salud de los animales, por lo que contribuye en el impacto de toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre y también contribuye al calentamiento global ya que se puede oxidar a CO<sub>2</sub>.

- Los hidrocarburos (HC) emitidos son partículas del combustible que no han sido combustionadas, la emisión de estas partículas afecta gravemente a la ecotoxicidad sobre el agua dulce y marina, y a la ecotoxicidad terrestre. Estas partículas también son perjudiciales para la salud, por lo que afecta al impacto de la toxicidad humana y contribuyen al agotamiento de la capa de ozono cuando se produce la fotólisis en algunos de estos hidrocarburos.

- Los óxidos de nitrógeno (NOx) tienen efectos adversos sobre la salud humana y sobre el medio ambiente (acidificación y eutrofización).

- Partículas contaminantes (PM) son las más peligrosas para la salud humana y contribuyen también al agotamiento de la capa de ozono.

### 3.1.2 Plan nacional de calidad del aire

Los contaminantes generados por el uso de los vehículos se liberan a la atmósfera afectando a la calidad del aire, y produciendo daños en la salud humana y en el medio ambiente. Por ello, las actuaciones dirigidas para limitar los impactos en la contaminación atmosférica del uso de los vehículos para el transporte requieren la consideración de la normativa relacionada con la calidad del aire.

Así el plan nacional de calidad de aire 2017-2019, basándose en la normativa europea de calidad del aire, establece unas medidas para el control y reducción de los compuestos que causan los mayores problemas de contaminación: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, Ozono O<sub>3</sub>, PM<sub>2,5</sub>. En el plan se establecen los límites de los parámetros exigidos por el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, que se muestran a continuación en las Tablas 4 y 5. El análisis de estos límites permite resaltar la necesidad de centrar las medidas a adoptar en el control del comportamiento de estos contaminantes.

Tabla 4. Valor límite, valor objetivo y umbrales de alerta para protección de la salud (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017) .

Contaminante	Valor límite (VL) /objetivo (VO) /Umbral de Alerta	Concentración	Nº superaciones máximas	Año de aplicación
SO <sub>2</sub>	Media horaria (VL)	350 µg/m <sup>3</sup>	>24 horas/año	2005
	Media diaria (VL)	125 µg/m <sup>3</sup>	>3 días/año	
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	500 µg/m <sup>3</sup>		
NO <sub>2</sub>	Media horaria (VL)	200 µg/m <sup>3</sup>	>18 horas/año	2010
	Media anual (VL)	40 µg/m <sup>3</sup>		
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	400 µg/m <sup>3</sup>		
PM <sub>10</sub>	Media diaria (VL)	50 µg/m <sup>3</sup>	>35 días/año	2005
	Media anual (VL)	40 µg/m <sup>3</sup>		
PM <sub>2,5</sub>	Media anual (VL)	25 µg/m <sup>3</sup>		2015
Pb	Media anual (VL)	0,5 µg/m <sup>3</sup>		2005
CO	Máximo diario de las medias móviles octohorarias (VL)	10 mg/m <sup>3</sup>		2005
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Media anual (VL)	5 µg/m <sup>3</sup>		2010

Tabla 5. Valor límite, valor objetivo y umbrales de alerta para protección de la salud (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017).

Contaminante	Valor límite (VL) /objetivo (VO) /Umbral de Alerta	Concentración	Nº superaciones máximas	Año de aplicación
O <sub>3</sub>	Máximo diario de las medias móviles octohorarias (VO)	120 µg/m <sup>3</sup>	>25 días/año (en un promedio de 3 años)	2010
	Umbral de información (promedio horario)	180 µg/m <sup>3</sup>		
	Umbral de alerta (promedio horario)	240 µg/m <sup>3</sup>		
As	Media anual (VO)	6 ng/m <sup>3</sup>		2013
Cd	Media anual (VO)	5 ng/m <sup>3</sup>		2013
Ni	Media anual (VO)	20 ng/m <sup>3</sup>		2013
B(a)p	Media anual (VO)	1 ng/m <sup>3</sup>		2013

Cuando se miden y se controlan estos parámetros por las estaciones de medida se tienen en cuenta los límites para realizar la evaluación y la gestión de la calidad del aire.

Además, con el objetivo de ayudar a reducir los niveles de emisión a la atmósfera de los contaminantes relevantes mencionados, el Ministerio ha propuesto las siguientes medidas de mejora de movilidad: (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017)

:

- Medidas centradas en facilitar la recarga de vehículos eléctricos y facilitar el uso de la bicicleta.
- Medidas referentes al tráfico rodado para permitir la disminución de contaminantes procedentes de este sector que es el principal causante de la baja calidad de aire en las grandes ciudades. Así se presentan las ayudas para la renovación del parque automovilístico para fomentar la compra de vehículos de energías alternativas y menos contaminantes.

### 3.1.3 Transición energética

La Comisión de Expertos de Transición Energética del Ministerio de España, en su análisis y propuestas para la descarbonización de abril de 2018, presenta el sector del transporte como un sector difuso, es decir, un sector cuyas actividades emiten gases de efecto invernadero, pero no están sujetas al comercio de derechos de emisión. Así, en 2017 el transporte emitió un total de 83,3 millones de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, representando el 24% de las emisiones totales brutas (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

La distribución de esa cantidad de emisiones se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Emisiones de gases de efecto invernadero en España. (Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018)

	miles de ton. de CO <sub>2</sub>		miles de ton. de CO <sub>2</sub>		miles de ton. de CO <sub>2</sub>		
Transporte	83.386	→	Por carretera	78.084	→	Automóviles	53.005
Industrias de la Energía	86.224		Aviación doméstica	2.504		Camiones ligeros	6.053
Industria y construcción (combustión)	41.173		Por ferrocarril	245		Camiones pesados y autobuses	17.426
Otros (combustión de otros fueles y emisiones fugitivas de	44.670		Navegación doméstica	1.366		Motocicletas	1.600
Procesos industriales y de uso de productos	30.760		Por tubería	265			
Agricultura	35.979						
Residuos	13.471						
Total de emisiones brutas	335.662						

En el análisis de la tabla, se podría destacar que, en relación con el total del transporte, la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen del transporte por carretera, representando el 95% de las emisiones, y que, dentro de éste, los automóviles son los principales emisores.

España tiene como compromiso para el horizonte 2020 la reducción del 10% de emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores difusos (Decisión 406/2009/CE) respecto a los niveles de 2005. La propuesta de la Comisión Europea para el periodo 2021-2030 es de una reducción del 30% respecto a los niveles de 2005 para el conjunto de la Unión Europea; objetivo que para España es del 26% lo que supondría unas emisiones en el transporte de 76,3 MtCO<sub>2</sub> equivalentes.

Con el fin de cumplir con estos objetivos la Comisión Europea lanzó en 2016 un plan de acciones a adoptar para el transporte de carretera y que se basa en:

- a) Medidas de optimización del transporte y mejora de su eficiencia.
- b) Medidas para el incremento del uso de energías alternativas de bajas emisiones en el transporte.
- c) Medidas para avanzar en el uso de vehículos de bajas o nulas emisiones.

La Comisión española comparte la necesidad de adoptar estas medidas y coincide en considerar que el mayor potencial para la descarbonización se deberá al transporte eléctrico.

Partiendo de una cuota de 0,28% de vehículos eléctricos en 2016, y un aumento hasta el 0,53% en 2017, la comisión plantea dos escenarios:

- Escenario 1: 2,4 millones de turismos eléctricos en 2030.
- Escenario 2: 1 millón de turismos eléctricos en 2030.

En la Figura 4 se muestra cual podría ser la distribución esperada del aumento de la cuota relativa de turismos eléctricos en el total de matriculaciones para que fuera coherente con los dos escenarios propuestos. La distribución propuesta se corresponde con las distribuciones que corresponden a las tecnologías en fase de desarrollo que suponen inicialmente un crecimiento

lento, que en el escenario 2 supondría no superar un 5 % de las matriculaciones hasta 2026, y a partir de ese año registrar un fuerte crecimiento de la cuota hasta alcanzar en 2030 un 18%. En el escenario 1, con mayor penetración se alcanzan en 2030 porcentajes cercanos al 30%

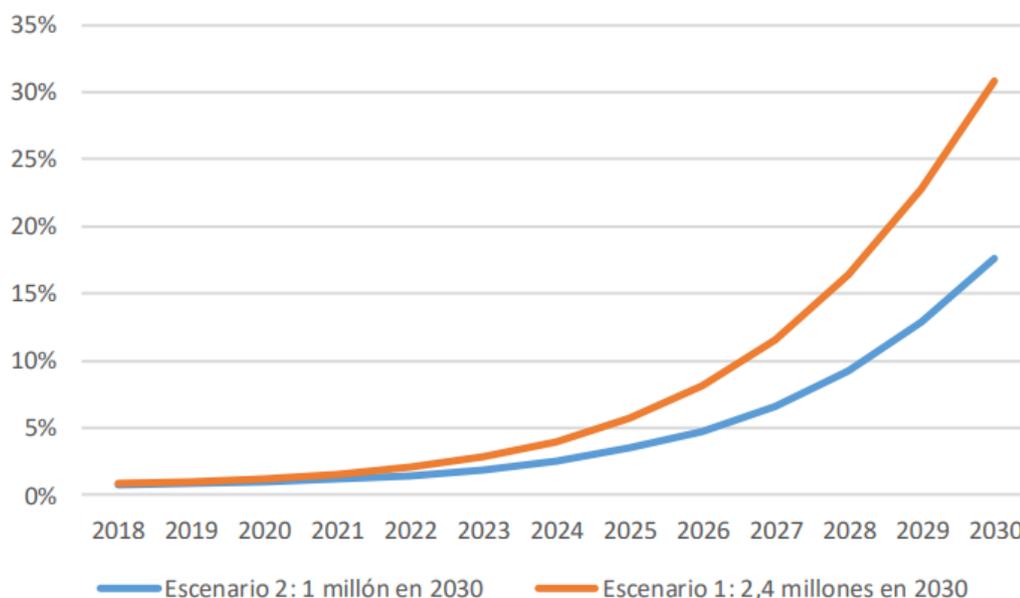


Figura 4. Hipótesis de aumento de la cuota relativa de turismos eléctricos en el total de matriculaciones (Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018)

Ambos escenarios reducirían considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub>, pero no garantizarían el objetivo de reducciones en el transporte propuesto para ese año, debido a que los resultados en el caso más favorable serían:

- Escenario 1: 2,4 millones de vehículos eléctricos recorriendo 15.000 km/año, emitiendo 81 g CO<sub>2</sub>/km generarían 2,9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Hay que tener en cuenta que la penetración de vehículos eléctricos vendrá limitada por su coste, que dependerá esencialmente de la evolución tecnológica y de la disponibilidad de nuevas baterías con mayor capacidad de carga, mayor rapidez en la recarga y un mayor número de ciclos de recarga sin perder significativamente la capacidad inicial. Además de las barreras que suponen el coste de las baterías y su peso, otra limitación importante es el proceso de recarga que de momento es bastante lento.

Para compensar esta deficiencia y alcanzar con el resto de vehículos el objetivo, la Comisión de Expertos insiste en que esto es sólo una previsión sin tener en cuenta que las preferencias de movilidad pueden cambiar como, por ejemplo, con el uso extensivo de vehículos de alquiler en

lugar de en propiedad, o con el incremento del uso de otros medios de transporte como la bicicleta tanto en su versión clásica como eléctrica. Además, la Comisión señala que de la electrificación del parque de vehículos también dependerá el coste y capacidad de las baterías, base de dicha transición a la electrificación.

Por otro lado, la Comisión de Expertos también considera que la regulación debería adaptarse para facilitar la penetración del vehículo eléctrico. Algunas de estos cambios serían:

- Avanzar en establecer una estructura de peajes de acceso de transporte y distribución que favorezca un uso eficiente de la red, desplazando la recarga de vehículos hacia horarios con menor uso de la red eléctrica.
- Medidas proactivas para fomentar en los entornos urbanos incentivos para la movilidad no contaminante como accesos selectivos al centro de ciudades o precios de aparcamientos diferenciados.
- Medidas de ayuda para la renovación del parque vinculados al achatarramiento de los vehículos antiguos sustituidos.

El incremento del uso de los distintivos medioambientales de la DGT (Dirección General de Tráfico) ayuda a llevar a cabo estas medidas porque favorece el control del uso de los vehículos. Gracias a estos distintivos, se ha realizado un análisis (Tabla 7) que permite identificar las características de los vehículos que se encuentran en España.

*Tabla 7. Número de vehículos en España según distintivos medioambientales (Elaboración propia con datos de la Comisión de Expertos de Transición Energética, 2018).*

<b>Distintivo</b>	<b>Características</b>	<b>N.º de vehículos</b>
0	Cero emisiones. Vehículos eléctricos de batería (BEV), vehículo eléctrico de autonomía extendida (REEV) y vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV) con una autonomía mínima de 40 km o vehículos de pila de combustible.	31.741
ECO	Vehículos híbridos enchufables con una autonomía <40km, vehículos híbridos no enchufables (HEV), vehículos propulsados por gas natural, por gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL) o gas licuado del petróleo (GLP). En todo caso, deberán cumplir los criterios de la etiqueta C.	180.491
C	Vehículos gasolina EURO 4/IV, 5/V o 6/VI o diésel EURO 6/VI.	7.102.064
B	Vehículos gasolina EURO 3/III o diésel EURO 4/IV o 5/V.	11.325.594
Total		18.639.890

El análisis de los resultados del estudio y las medidas que sugieren permitirá obtener datos de referencia para la propuesta del escenario futuro de este proyecto y tras el análisis, permitirá

poner de manifiesto si las medidas que se están adoptando por el Gobierno favorecerán la consecución de los objetivos mencionados anteriormente.

### 3.2 Estado actual del sector del transporte en España

El transporte de viajeros y mercancías en España tiene una gran importancia en la industria, el comercio y la movilidad de las personas lo que beneficia directamente al sector económico del país.

El territorio español, al igual que en muchos territorios en el mundo, se caracteriza por la concentración de la población en áreas metropolitanas. Sin embargo, el flujo de viajeros y mercancías no sigue un patrón centralizado ya que estos flujos son influenciados por las relaciones exteriores con la Unión Europea y otros países, tanto en el flujo de mercancías como en el flujo de transporte de viajeros debido a la gran demanda turística.

El metro es uno de los medios de transporte que adquiere gran importancia en los núcleos de gran concentración de personas para el transporte de viajeros, pues es un medio fácil y rápido de utilizar. El transporte en metro es un servicio público que une diversas zonas dentro de una ciudad y su área metropolitana. El metro está presente en las siguientes ciudades españolas: Madrid, Barcelona, Bilbao, Málaga, Sevilla, Alicante, Palma de Mallorca, Valencia y próximamente en Granada. En concreto, referente al caso del Metro de Madrid, habría que destacar que en el año 2017 tuvo un total de 626.403.077 viajeros en los 2.341 coches de tren con los que cuenta el parque y que la evolución de su demanda es creciente desde el año 2013 (Metro de Madrid, 2018).

Los trenes de cercanías es otro transporte demandado por los viajeros. Esta modalidad de transporte público ferroviario cuenta con gran capacidad y frecuencia, se utiliza para unir núcleos suburbanos en recorridos de corta distancia. España cuenta con Renfe Cercanías y Renfe Feve que prestan este servicio. Los territorios españoles en los que se encuentra este servicio son: Asturias, Barcelona, Bilbao, Cádiz, Madrid, Málaga, Murcia/alicante, Santander, San Sebastián, Sevilla, Valencia y Zaragoza. En concreto, la red de cercanías de Madrid cuenta con 92 estaciones y 9 líneas, que transporta 820.000 viajeros diarios (Consortio Regional de Transportes de Madrid, 2019).

Por otro lado, al hablar del transporte de viajeros es indispensable hablar del sector del automóvil. El sector industrial de la automoción en España tiene gran importancia en la economía del país, a pesar de que en los últimos años ha habido un leve descenso en las cifras de producción y exportación de vehículos. El presidente de Anfac en el Informe Anual (Anfac, 2017) explica que para mantener en este país la industria del automóvil ya consolidada se debe proceder a una

transformación tecnológica que permita una renovación del parque de vehículos. También se debe evolucionar hacia unos criterios medioambientales más exigentes que permitan cumplir con las peticiones de la Comisión Europea y enfocar el sector hacia el uso del vehículo y no hacia la posesión de este.

En el año 2017, según la Dirección General de Tráfico (2017) el parque nacional contaba con 32,9 millones de vehículos. Entre todos ellos, se resalta por el objeto de este trabajo los vehículos de transporte de viajeros como son los 63.589 autobuses y 3,3 millones de motocicletas con las que cuenta España, y, sobre todo, se resalta que los turismos son los vehículos más abundantes con una representación de 71,3%, un total de 23,5 millones de vehículos.

El transporte en autobús es un sector destacable en la economía española. Este sector factura más de 3.000 M€ y da empleo a más de 80.000 personas de forma directa. Además, transporta anualmente 1.750 millones de viajeros (Confibus, 2019). Entre los autobuses, despunta el autobús propulsado por motor de diésel, un 96,6% de los autobuses en España son de este tipo. Los autobuses de gasolina sólo representan un 0,4%, mientras que otros tipos de autobuses como pueden ser los de gas natural, eléctricos o híbridos, representan un 3,2%.

En referencia a las motocicletas españolas, sin embargo, un 99,6% son de gasolina. Las motocicletas eléctricas están adquiriendo cada vez más protagonismo en los últimos años, ya que existen muchas empresas de alquiler de motocicletas en las que todo su parque son motocicletas eléctricas. No obstante, en el parque nacional de motocicletas de 2017 sólo un 0,3% eran eléctricas.

Entre los turismos, la DGT distingue 10,1 millones de turismos de gasolina, 13,3 millones de turismos de gasoil y 29.868 turismos que utilizan otros carburantes (DGT, 2017). Aunque la mayoría de estos turismos siguen siendo vehículos de combustión, entre los que utilizan otros carburantes se encuentra el vehículo eléctrico. En los últimos años, el número de matriculaciones de vehículos eléctricos dentro del total se ha visto incrementado como se observa en la Figura 5, llegando en la actualidad, en 2018 a 9.393 vehículos eléctricos (European alternative fuels observatory (EAFO).2018).

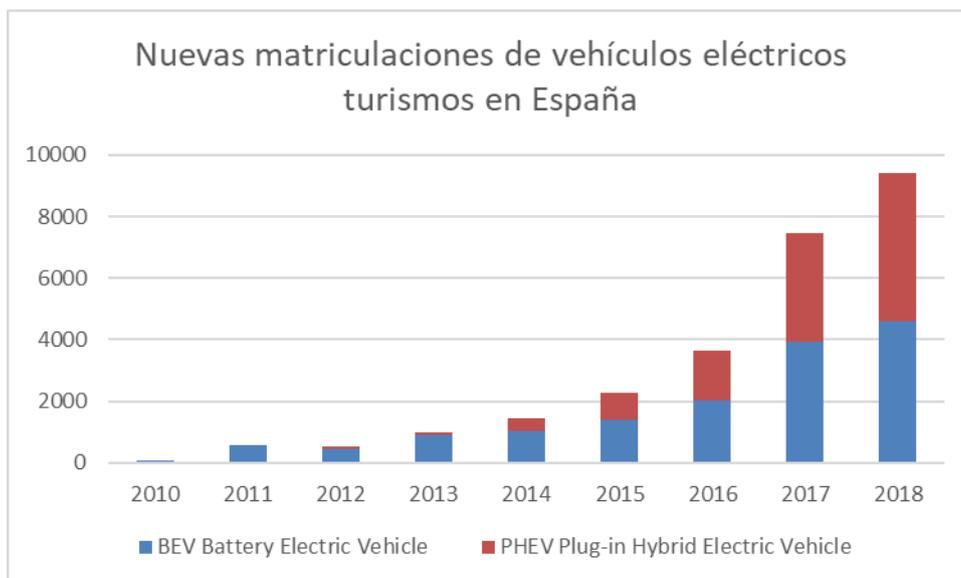


Figura 5. Evolución de matriculaciones de vehículos eléctricos en España (European alternative fuels observatory (EAFO).2018)

Este incremento de vehículos eléctricos se debe a la creciente preocupación del sector y de la sociedad por el medio ambiente, así como a las ayudas y promociones existentes para la compra de este tipo de vehículos, antes comentadas, que tienen su origen en las exigencias de indicadores medioambientales del gobierno nacional para poder cumplir con las normativas, sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El cambio y evolución de la concepción actual del vehículo irá a más. Un estudio de PwC (2018) indica que para el año 2030, el mercado de automoción sufrirá una transformación radical debido al desarrollo tecnológico y al impacto del vehículo compartido, y se estima que haya cinco tendencias que transformarán el sector de la automoción tal y como lo conocemos. Las cinco tendencias son:

- El vehículo compartido, este será uno de los nuevos hábitos del uso del vehículo. Se estima que en Europa el 35% de los kilómetros se harán de esta forma en 2030.
- El aumento de la población generará una mayor demanda de los vehículos, generando en Europa un incremento de 23% de km recorridos por persona y año.
- Los futuros coches, serán autónomos y compartidos, y se les dará un uso más intenso, que reducirá la duración de la fase de uso y provocará que el ciclo de vida sea menor.
- La transformación hacia el uso de un vehículo autónomo será lenta, pero se completará, dependiendo del desarrollo tecnológico y de la regulación aplicable a este tipo de vehículo.
- En 2030 el 95% de los vehículos nuevos que se matriculen serán 55% eléctricos y 40% híbridos.

### 3.3 El transporte en la Comunidad de Madrid

En el año 2015 se considera que hubo un total de 5.416 muertes (Sánchez Fernández, 2018) por alta contaminación en la Comunidad de Madrid. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), unos 15 millones de españoles respiran un aire que la Unión Europea considera insalubre.

Según datos de la Ministerio para la Transición Ecológica (2019), en España en el año 2018 el sector del transporte es el sector con mayores emisiones de gases de efecto invernadero con un 27%, representando un incremento del 2,7% respecto al año 2017. De hecho, se señala que el tráfico rodado, es el responsable de un 25% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero, asociadas al cambio climático y se estima que un tercio de estas emisiones se generan en aglomeraciones urbanas. Entre el total de emisiones de gases de efecto invernadero, resaltan las emisiones de NO<sub>2</sub> procedentes principalmente de los automóviles, como consecuencia de la oxidación de las partículas emitidas de NO. Su efecto, gravemente perjudicial para la salud, provoca que ante situaciones de gran cantidad de estas emisiones se produzcan condiciones de alerta por contaminación en las ciudades.

Conscientes del problema de la contaminación, el gobierno del Ayuntamiento de la Comunidad de Madrid del año 2018 ha implantado medidas para disuadir del uso de vehículos privados y para fomentar y priorizar el uso de transportes públicos, la bicicleta o favorecer la movilidad caminando. Para ello pone en práctica protocolos cuando existen medidas de alta contaminación. El protocolo en rigor desde octubre de 2018 (Ayuntamiento de Madrid, 2018) se puede resumir de la siguiente manera:

Se establecen tres niveles de actuación en función de las concentraciones **de dióxido de nitrógeno** que se registren o se prevean registrar según el modelo de predicción de calidad del aire (Ayuntamiento de Madrid, 2018, p6):

- **PREAVISO:** cuando dos estaciones cualesquiera de una misma zona superan, simultáneamente, 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante dos horas consecutivas, o tres estaciones cualesquiera de la red de vigilancia superan, simultáneamente, 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante tres horas consecutivas.
- **AVISO:** cuando dos estaciones cualesquiera de una misma zona superan, simultáneamente, 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante dos horas consecutivas, o tres estaciones cualesquiera de la red de vigilancia superan, simultáneamente, 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante tres horas consecutivas.
- **ALERTA:** cuando tres estaciones cualesquiera de una misma zona (o dos si se trata de la zona 4) superan, simultáneamente, 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante tres horas consecutivas.

La superación de algunos de estos niveles de actuación en ciertos contextos desfavorables climatológicos dará lugar a la definición de posibles escenarios que conlleven la adopción de distintas medidas, tal y como se resumen a continuación:

- En el **escenario 1**, un día con superación del nivel de preaviso: se recomienda y promueve el transporte público, y se reduce el límite de velocidad a 70 km/h en la M-30 y accesos a Madrid.
- En el **escenario 2**, dos días consecutivos con superación del nivel de preaviso o un día con superación del nivel de aviso: incluye las medidas del escenario 1, se refuerza el transporte público, se prohíbe la circulación en la M-30 y su interior a todos los vehículos sin distintivo ambiental de la DGT y prohíbe el estacionamiento en las plazas y horario del SER (Servicio de Estacionamiento Regulado) a los vehículos a motor que no dispongan de distintivo ambiental CERO o ECO.
- En el **escenario 3**, tres días consecutivos con superación del nivel de preaviso o dos días con superación del nivel de aviso: incluye las medidas del escenario 2, prohíbe la circulación en todo el término municipal a todos los vehículos sin distintivo ambiental de la DGT y se recomienda la no circulación de taxis libres que no estén en servicio, excepto vehículos CERO o ECO.
- En el **escenario 4**, cuatro días con superación del nivel de aviso: incluye las medidas del escenario 3 y prohíbe la circulación en el interior de la M-30 y por la M-30 a los vehículos a motor con distintivo ambiental B de la DGT.
- En el **escenario de Alerta**, un día a nivel de alerta: incluye todas las medidas del escenario 4, pueden circular los vehículos CERO o ECO, pero sólo pueden estacionar en el SER los CERO y se prohíbe la circulación de taxis libres que no estén en servicio, excepto vehículos CERO o ECO.

Bajo esta situación actual de la Comunidad de Madrid, con restricciones muy amplias en el uso de los vehículos debido a la contaminación y la previsión futura del sector del automóvil se presenta este trabajo para verificar e identificar el impacto medioambiental de los transportes de viajeros en la actualidad y compararlo con un escenario futuro marcado por el cambio en el modo de uso de los vehículos.



## 4. Análisis de inventario

En este capítulo, se presenta el análisis de inventario de Ciclo de Vida (ICV), en él se incluye los datos numéricos para cuantificar los vehículos y así poder desarrollar el modelo del sistema del transporte de viajeros de la Comunidad de Madrid.

### 4.1 Datos de entrada para el análisis

Para el análisis del ciclo de vida se han elegido el área de la Comunidad de Madrid dos escenarios: un escenario del transporte de viajeros en el año 2016 y un escenario futuro con expectativas del transporte de viajeros en el año 2030.

El software utilizado contaba con datos del 2014, se han actualizado dichos datos de Simapro para que recogieran las correspondientes emisiones de la normativa Euro que aparecen en el informe de European Environment Agency (2018).

El análisis, con el software de Simapro, ha sido llevado a cabo mediante el método CML-IA, un método de análisis de ciclo de vida desarrollado por el Center of Environmental Science (CML) de Leiden University in The Netherlands y haciendo uso del método de Cumulative Energy Requirements Analysis (CERA) para el cálculo de Demanda Acumulada de Energía (Ecoinvent, 2010) . Al realizar el análisis mediante este método se están seleccionando los indicadores ambientales de impacto que se quieren obtener.

Seguidamente, se detallan los diferentes tipos de vehículos de pasajeros que han formado parte de este estudio y el proceso que se ha utilizado en el software de Simapro para su análisis:

- *Turismos gasolina EURO 1, 2, 3, 4, 5 y 6*: “Transport, passenger car, medium size, petrol, Euro X”. Se han definido los vehículos de norma Euro 1, 5 y 6 que no existían en la base de datos cambiando las emisiones producidas según la norma y el consumo de combustible.
- *Turismos diésel EURO 1, 2, 3, 4, 5 y 6*: “Transport, passenger car, medium size, diesel, Euro X”. Se han definido los vehículos de norma Euro 1, 5 y 6 que no existían en la base de datos cambiando las emisiones producidas según la norma y el consumo de combustible.
- *Turismos eléctricos*: “Transport, passenger car, electric”
- *Autobús urbano diésel*: “Transport, regular bus”
- *Autobús interurbano diésel*: “Transport, regular bus”. Se ha diferenciado del urbano al tener en cuenta una mayor ocupación y km recorridos.

- *Motocicleta gasolina*: “Transport, passenger, motor scooter”
- *Motocicleta eléctrica*: “Transport, passenger, electric scooter”
- *Metro y metro ligero*: “Transport, tram”
- *Cercanías*: “Transport, passenger train / regional”
- *Bicicletas eléctricas*: “Transport, passenger, electric bicycle”

En relación con el cambio y evolución de vehículos, se han incorporado en el escenario futuro los siguientes vehículos para el análisis:

- *Turismo de gas natural*: “Transport, passenger car, medium size, natural gas, Euro 5”
- *Autobús urbano de gas natural*: No existía en la base de datos y se ha creado cogiendo de referencia el proceso de un turismo de tamaño grande de gas natural y el autobús de diésel. Con esos datos se ha realizado una aproximación a los datos del autobús de gas natural en proporción al peso y consumo de combustible con los datos del turismo.
- *Autobús urbano eléctrico*: No existía en la base de datos y se ha creado cogiendo de referencia el proceso de un turismo de tamaño eléctrico y el autobús de diésel. Con esos datos se ha realizado una aproximación a los datos del autobús de gas natural en proporción al peso y a la batería utilizada por un autobús eléctrico del mercado con los datos del turismo.

## 4.2 Análisis del escenario estado actual, Comunidad de Madrid 2016

A continuación, se introducen los datos relevantes al caso de estudio actual, que corresponde al análisis de ciclo de vida de los transportes de viajeros de la Comunidad de Madrid en el año 2016.

Para obtener la demanda de transporte de viajeros de la Comunidad de Madrid y normalizarla por el número de habitantes de este área se ha partido del dato de personas-km para cada vehículo y de la población de la Comunidad de Madrid en el año 2016 (6.466.996 habitantes (INE. Instituto Nacional de Estadística, 2016)).

El número de personas transportadas (personas-km) en 2016 dentro de la Comunidad de Madrid se ha obtenido por diferentes medios.

- **Turismos y motocicletas**: Para obtener la demanda de transporte de viajeros para los turismos y motocicletas se ha tenido en cuenta el parque de vehículos de cada tipo, la distancia media recorrida y la ocupación media.

El cálculo se ha realizado mediante la siguiente ecuación para cada tipo de vehículo y norma Euro:

$$Personas * km = (\text{parque de vehículos}) * \left(\frac{\text{ocupación media}}{\text{vehículo}}\right) * \left(\frac{\text{km medios anuales}}{\text{vehículo}}\right)$$

*Parque de vehículos:* para obtener el parque de vehículos por carburante y norma Euro se ha realizado una estimación de la siguiente forma:

- Del anuario de la DGT (DGT, 2016) se ha obtenido el parque nacional por carburante y año de matriculación hasta el año 2016.
- Se ha obtenido de los anuarios desde el año 2002 hasta el 2016 de la DGT el parque de la Comunidad de Madrid y el nacional, para calcular el porcentaje de vehículos en España que corresponde a la Comunidad de Madrid. Este porcentaje se ha aplicado al parque nacional por antigüedad y se ha obtenido el parque de la Comunidad de Madrid por carburante y año de matriculación, obteniendo así el parque por norma euro y carburante (Tabla 9).
- Por último, se ha comprobado que el resultado calculado equivalía al parque total que aparece en el Anuario de la DGT de 2016 para la Comunidad de Madrid.

El parque de motocicletas eléctricas y de gasolina (Tabla 10) se ha obtenido directamente del Anuario 2016 de la DGT ya que en la simulación no se ha hecho distinción de norma Euro para este tipo de vehículo.

*Ocupación media/vehículo:* Los datos de ocupación media, 1,68 para el turismo y 1,45 para la motocicleta, se han obtenido de la encuesta de viajeros de la Dirección General de Carreteras de España (S.G. de Explotación y Gestión de Red, 2014) .

*Km medios anuales/vehículo:* De forma generalizada se ha tomado el dato de km anualmente recorridos por tipo de todos los vehículos de la Comunidad de Madrid de la Tabla 7.3.a del Anuario de 2016 (Ministerio de Fomento, 2017) , y se ha dividido por el número de vehículos existentes de ese tipo en la Comunidad de Madrid, obteniendo como se muestra en la Tabla 8, la distancia media anual recorrida por cada vehículo dentro de la Comunidad de Madrid.

*Tabla 8. Datos ocupación y km recorrido Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos del Ministerio de Fomento, 2017 y S.G. de Explotación y Gestión de Red, 2014)*

<b>Madrid</b>	<b>Ocupación (p)</b>	<b>millones km total vehículos de Madrid</b>	<b>km/vehículo</b>
<b>Turismos</b>	1,68	13.302,0	3.950,8
<b>Motocicletas</b>	1,45	169,6	505,2

Tabla 9. Resultado de personas - km de turismos Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos calculados y datos de la DGT, 2017)

<b>Turismos Madrid (2016)</b>	<b>Nº turismos</b>	<b>millones personas-km</b>
EURO 1 gasolina	256.075	1.700
EURO 2 gasolina	230.760	1.532
EURO 3 gasolina	274.887	1.825
EURO 4 gasolina	231.160	1.534
EURO 5 gasolina	153.991	1.022
EURO 6 gasolina	157.266	1.044
EURO 1 diésel	33.937	225
EURO 2 diésel	169.912	1.128
EURO 3 diésel	534.720	3.549
EURO 4 diésel	608.748	4.040
EURO 5 diésel	417.484	2.771
EURO 6 diésel	291.992	1.938
Turismo eléctrico	5.963	40
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>3.366.896</b>	<b>22.347</b>

Tabla 10. Resultado de personas - km de motocicletas Comunidad de Madrid 2016 (Elaboración propia con datos calculados y datos de la DGT, 2017)

<b>Madrid (2016)</b>	<b>Nº motocicletas</b>	<b>millones personas-km</b>
Motocicletas gasolina	334.049	243,02
Motocicletas eléctricas	1.324	0,96
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>335.373</b>	<b>243,98</b>

- **Transporte público:** Para el autobús urbano, metropolitano, metro, metro ligero y cercanías de la Comunidad de Madrid, se ha escogido el dato personas-km y km anuales recorridos por estos transportes en el año 2016 que proporciona el Observatorio de Movilidad (TRANSyT, 2018).
- **Bicicletas eléctricas:** Para el caso de estudio se ha tenido en cuenta las bicicletas eléctricas de la empresa de BiciMAD, sistema de alquiler público de bicicletas de la ciudad de Madrid. La demanda del transporte de viajeros de las bicicletas BiciMAD se ha calculado de la siguiente forma:

$$\text{personas} * \text{km (BiciMAD)} = n^{\circ} \text{ de viajes} * \frac{\text{km medio recorrido}}{\text{viaje}}$$

Donde el nº de viajes en el año 2016 es de 2.813.135, que equivale a esa cantidad de personas transportadas, información recogida de la web del Ayuntamiento (Portal de

datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid, 2016) . El resultado de 3 km de media recorridos en cada viaje se ha obtenido del informe “*The pulse of the cycling city: visualising Madrid bike share system GPS routes and cycling flow*” de (Romanillos et al. 2018).

El análisis de la información anterior nos ha permitido obtener los datos de demanda de transporte (pkm) y demanda de transporte normalizada por unidad de población (pkm/habitante) clasificados por tipo de vehículo que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos de entrada en pkm y pkm/hab de la Comunidad de Madrid en el 2016

<b>Datos de entrada caso Comunidad de Madrid 2016</b>		
	<b>millones personas-km</b>	<b>pkm/habitante</b>
Turismos Euro 1 gasolina	1.699,66	262,82
Turismos Euro 2 gasolina	1.531,64	236,84
Turismos Euro 3 gasolina	1.824,53	282,13
Turismos Euro 4 gasolina	1.534,30	237,25
Turismos Euro 5 gasolina	1.022,10	158,05
Turismos Euro 6 gasolina	1.043,84	161,41
Turismos Euro 1 diésel	225,26	34,83
Turismos Euro 2 diésel	1.127,77	174,39
Turismos Euro 3 diésel	3.549,14	548,81
Turismos Euro 4 diésel	4.040,49	624,79
Turismos Euro 5 diésel	2.771,00	428,48
Turismos Euro 6 diésel	1.938,06	299,69
Turismos eléctricos	39,58	6,12
Motocicletas gasolina	243,02	37,58
Motocicletas eléctricas	0,96	0,15
Autobús urbano diésel	1.187,10	183,56
Autobús metropolitano diésel	2.974,10	459,89
Metro y metro ligero	3.802,50	587,99
Cercanías Renfe	4.017,30	621,20
Bicicletas eléctricas (BiciMAD)	8,44	1,30
<b>Total</b>	<b>34.580,78</b>	<b>5.347,27</b>

## 4.3 Análisis del escenario futuro, Comunidad de Madrid, 2030

### 4.3.1 Documentación sobre previsiones futuras

Proponer una previsión del escenario futuro en el sector del transporte en el año 2030 es una ardua labor de llevar a cabo por la rapidez con la que el escenario cambia fruto de los nuevos descubrimientos, evolución de las investigaciones y mejoras constantes de eficiencia. Dicho esto, se han tomado como marco de referencia algunos informes internacionales y se han utilizado y analizado diferentes informes y tendencias de este sector, entre los que se destaca:

- Un informe (Naciones Unidas, 2018) del que se desprende que hay una previsión de que en el 2050 el 68% de la población vivirá en zonas urbanas, lo cual implicará un aumento en el uso del transporte ya que la movilidad entre ellas será imprescindible.
- La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por las Naciones Unidas en 2015, se plantea como objetivo a alcanzar para el 2030 el proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos, así como mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de mayor edad.
- Y, principalmente, el borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 de IDAE (Ministerio para la Transición Ecológica., 2019) que está pendiente de ser aprobado en Europa. En este plan se diseñan las políticas energéticas que se deben establecer en España para alcanzar los objetivos fijados por la Unión Europea para 2030. Dichos objetivos son:
  - 40% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990.
  - 32% de renovables sobre el consumo total de energía final bruta, para toda la UE.
  - 32,5% de mejora de la eficiencia energética.
  - 15% interconexión eléctrica de los Estados miembros.

Para alcanzar estos objetivos en el horizonte del 2030 en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima se establecen una serie de consideraciones, entre las que destacan:

- La reducción de las emisiones de GEI del sector transporte de nuestro país, en el 2017 el sector transporte aportaba el 26,1 % de las emisiones de GEI totales, de ahí la importancia de trabajar e influir sobre este sector como elemento clave en el proceso pretendido de descarbonización. El plan de acción establece el objetivo de la reducción de 28 Mt CO<sub>2</sub> equivalente, consiguiendo de esta manera una reducción del 35%.
- La potenciación de las energías renovables en el sector del transporte. El transporte por carretera y ferrocarril representa un tercio del consumo total de energía, situándose en 28.241 ktep en 2016. En esta fecha la aportación de las energías renovables en el sector del transporte ascendió al 5,3%. La revisión de la Directiva de energías renovables establece un objetivo general de renovables en el transporte que debe alcanzar el 14% en el año 2030.

La consecución de estos objetivos fijados de aumento de la descarbonización y de las energías renovables mediante la aplicación de las medidas previstas supondrá un ahorro acumulado de 5.622,9 ktep de energía final durante el periodo 2021 – 2030, de un total de 13.888 ktep que

representa el total del sector transporte, y se llevará a cabo mediante el establecimiento de las siguientes medidas:

#### **Medida de cambio modal:**

Esta medida se presenta para reducir el consumo de energía final y reducir las emisiones de dióxido de carbono actuando sobre la movilidad urbana y metropolitana, consiguiendo cambios en el reparto modal. Este cambio modal resultaría en una mayor participación de modos más eficientes, una reducción del uso del vehículo privado de baja ocupación, fomentando el vehículo compartido, así como el uso de la bicicleta y de la marcha a pie.

Una de las principales acciones para alcanzar este cambio modal consistirá en la implantación en todas las ciudades de más de 50.000 habitantes, y a partir del 2023, de limitaciones en el acceso a las zonas centrales a los vehículos con más emisiones contaminantes. A esta acción se le unirán otras tales como el desarrollo e implantación de planes de movilidad, peatonalizaciones, restricciones de tráfico en momentos de mayor contaminación, impulso del vehículo compartido, promoción del uso de la bicicleta, mejora y promoción del transporte público, y se complementarán con la implantación y desarrollo de Planes de Transporte al Trabajo (PTT), servicios de movilidad compartida en las empresas, teletrabajo, etc.

#### **Medida de uso más eficiente del vehículo:**

El objetivo es reducir el consumo de energía final y las emisiones de dióxido de carbono impulsando actuaciones que permitan un uso más eficiente de los medios de transporte, actuando en la mejora de la gestión de flotas por carretera, implantando mejores técnicas de conducción para conductores profesionales (con ahorros potenciales de carburante del orden del 10%) y equiparando las cargas y dimensiones del transporte de mercancías por carretera a los países del entorno. Otra acción que incluye esta medida sería la realización de auditorías energéticas a las flotas de vehículos.

#### **Biocombustibles**

Los biocarburantes se constituyen como la tecnología renovable de repercusión directa en el transporte más ampliamente disponible y utilizada en la actualidad. En los próximos años, esta será la forma de sustituir los carburantes fósiles en sectores como el de los vehículos pesados y el de la aviación. Para poder cumplir con los objetivos de consumo de estos biocarburantes se requiere que la producción sea mayor, pues en la actualidad es muy reducida. La baja producción puede deberse en unos casos, a la baja disponibilidad de algunas de las materias primas consideradas y, en otros, al bajo nivel de madurez tecnológica de algunos de los procesos que permiten la fabricación de este tipo de biocarburantes.

### **Medidas de renovación de parque automovilístico:**

Esta medida pretende mejorar la eficiencia energética del parque automovilístico mediante su renovación por nuevos modelos dotados de mejor tecnología. Actualmente, la edad media del parque es de 12 años. Los nuevos vehículos son de manera general más eficientes, por tanto, con su penetración disminuirá el consumo de combustible y de energía. La medida incluye acciones para facilitar el cambio como es el promover la compra de turismos clasificados energéticamente como A o B según el IDAE (clasificación de la A-G de menor a mayor consumo de combustible para los vehículos de gasolina y diésel), y señala que se considera necesario reorientar la ponderación de las tasas actuales con criterios basados en la emisión de contaminantes mediante Norma Euro o de la etiqueta medioambiental de la Dirección General de Tráfico, penalizando así a los vehículos más antiguos, que son los generadores de más emisiones y más contaminación. Al mismo tiempo, el Ministerio de Hacienda analizará la posible reforma del IEDMT (Impuesto Especial sobre Determinados Medios de Transporte) de manera que las decisiones de compra del consumidor se orienten hacia vehículos de menor consumo, esta orientación se potenciará actualizando el impuesto basado en tramos de emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **Medidas de impulso del vehículo eléctrico:**

Esta medida es complementaria a la renovación del parque automovilístico. Se pretende reducir el consumo de energía total a través de la progresiva electrificación renovable del sector, permitiendo la penetración de energías renovables en el transporte, aunque se ha de recalcar que sólo se computará en el porcentaje de uso de energías renovables en el transporte si en el mix eléctrico se genera electricidad mediante fuentes renovables. En la actualidad es muy bajo el número de vehículos eléctricos, el vehículo eléctrico sólo representa el 0,85% de las matriculaciones del año 2018 (Sánchez Criado, 2019). Si se aumentara su implantación ello supondría una gran ventaja para el cumplimiento de los objetivos de reducción de CO<sub>2</sub>, reducirá las emisiones de NOx y otras partículas contaminantes y, a su vez, permitiría disminuir la dependencia de los derivados del petróleo y conllevaría, igualmente, una mejor gestión de la demanda actual de la curva de carga del sistema eléctrico.

La electrificación del parque parece que sólo se conseguirá cuando el precio de estos vehículos se asemeje a los de vehículos de combustión. Según los fabricantes esta paridad, se podría alcanzar en el año 2025, debido a un esperado descenso del precio de las baterías. Por otro lado, habría que destacar que para 2030 se estima que un gran porcentaje de los vehículos eléctricos del parque se utilicen para servicios de Movilidad Compartida (MaaS son las siglas en inglés), lo que conllevará a cambiar la cultura de propiedad de vehículo a una cultura de servicio. El escenario objetivo de este PNIEC considera que en 2030 el parque contará con más de 3,5 millones de turismos eléctricos y más de un millón de motocicletas, camiones ligeros y autobuses.

Los vehículos eléctricos serían un total de 5 millones de unidades. La introducción de la movilidad eléctrica se hará paulatinamente y para alcanzar esa cifra en 2030 será necesario el despliegue extensivo de infraestructuras de puntos de recarga para estos vehículos.

Tras las medidas anteriormente expuestas, el PNIEC 2021-2030 plantea un modelado del sistema energético mediante la herramienta TIMES-Sinergia (Sistema Integrado para el Estudio de la Energía) de la Dirección General de Política Energética y Minas. Esto permite la definición del sistema energético actual y futuro mediante el modelado de los distintos sectores relacionados con el consumo de energía y, de esta forma, se caracteriza la estructura energética nacional.

El sector transporte es un sector gran consumidor de energía que agrupa las demandas de servicios energéticos de movilidad, tanto de personas como de mercancías. Estas demandas de servicios se expresan en millones de pasajeros-km o millones de toneladas-km para las distintas modalidades de transporte: carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo. Los resultados de este modelo en relación con el transporte de pasajeros se han resumido en la Tabla 12.

Tabla 12. Definición del sistema energético actual y futuro. (TIMES-Sinergia (Sistema Integrado para el Estudio de la Energía) de la Dirección General de Política Energética y Minas)

		2015	2020	2025	2030
<b>Transporte de pasajeros</b>	pasajeros-km				
Automóviles	millones pkm	54.869,30	56.166,05	82.070,92	108.285,97
Motocicletas	millones pkm	469.924,14	529.765,18	480.527,89	425.580,88
Ferrocarril	millones pkm	36.400,03	41.353,16	42.079,31	42.620,79
<b>Emisiones GEI en el sector del transporte</b>	teq. CO2	83.197.462,00	85.722.267,00	74.638.027,00	57.695.037,00
<b>Consumo de energía final del sector del transporte de pasajeros</b>	ktep	-	26.473,06	24.371,26	20.354,10
<b>Intensidad de carbono de la demanda de energía final del transporte de pasajeros</b>	teq. CO2/tep	2,82	2,42	2,40	2,36

#### 4.3.2 Definición del caso futuro de estudio

Para realizar las estimaciones que se proponen para obtener los datos de entrada para realizar el ACV de los transportes para pasajeros en el escenario futuro se han considerado las siguientes presunciones:

- Debido a la incertidumbre existente del cambio o evolución que pueda desarrollarse en los materiales con los que se producen los vehículos. Se asume que los vehículos se producen con los mismos materiales con los que se realiza este proceso en el año 2016.

- No se asumirán cambios en el proceso y tecnología de reciclaje de los vehículos tras su uso, pues se desconoce la evolución con la que contarán estos procesos en el futuro.
- Se asumirá que no se crearán nuevas normas EURO en la que se restrinjan las emisiones, porque se desconocen los nuevos límites de emisiones que habrá en el futuro.
- No se considerarán los biocombustibles porque, según se menciona en el plan de acción, este tipo de combustibles se utilizarán en la aviación y en el transporte de mercancías pesadas, no en el transporte de pasajeros que es el objeto de este proyecto.
- Se considerará un aumento de la población de la Comunidad de Madrid del 13% respecto a los habitantes de 2018, tal y como estima el Instituto Nacional de Estadística (Instituto Nacional de Estadística, (INE), 2018), obteniendo para 2030 en la Comunidad de Madrid una población de 7.433.229 habitantes.

Tras la información expuesta anteriormente, se asumen los siguientes datos para un escenario del transporte de viajeros en el año 2030:

**Turismos:** Como resultado de la concienciación por el medio ambiente, la utilización del vehículo compartido y los programas de movilidad sostenible promovidos mediante el uso de aplicaciones para compartir el desplazamiento, se ha estimado que los turismos pasarán a tener una ocupación media de 2, suponiendo un aumento del 25% respecto al año 2016. Sin embargo, debido a la restricción de circulación y al mayor uso del transporte público, el km medio anual recorrido por turismo dentro de la Comunidad de Madrid disminuirá un 25%, quedando en 3.367,5 km.

- Turismos eléctricos: se asume el valor nacional en 2030 de 3,5 millones de turismos eléctricos. Esta estimación se basa en la hipótesis optimista presentada por la Comisión de Expertos de Transición Energética (2018) donde exponen que la curva de nuevas matriculaciones irá ascendiendo, teniendo en 2030 un total de 2,4 millones de nuevas matriculaciones, así como en PNIEC 2021-2030 donde se establecen un total de 3,5 millones de turismos eléctricos circulando en España para 2030. Multiplicando este dato por el % de vehículos de este tipo que representa la Comunidad de Madrid a nivel nacional, un 40% en la actualidad según el dato de (Dirección General de Tráfico, DGT, 2017) , se estima que en la Comunidad de Madrid para 2030 habrá 1,36 millones de turismos eléctricos.

- Turismos Diesel y Gasolina: Los turismos diésel y gasolina disminuirán debido a la normativa de restringir zonas de la ciudad a la circulación de este tipo de vehículos, norma vigente en la Comunidad de Madrid desde el 2019 para el área Madrid Central y debido también al protocolo de contaminación vigente desde 2018 (Ayuntamiento de Madrid, 2018). Es más, se estima que para 2030 esté prohibida la circulación para los vehículos de norma Euro 1, 2 y 3 de ambos tipos

de combustible en la Comunidad de Madrid, pues ya en 2019 está prohibida la circulación de estos vehículos por algunas zonas y puesto que en 2030 serían vehículos con más de 30 años de antigüedad, que no circularían debido a las restricciones de emisiones. Por tanto, se ha estimado que para 2030 en la Comunidad de Madrid, en los turismos de gasolina de norma Euro 4 y 5 habría una reducción del 50% y 10%, respectivamente, y que los de gasolina Euro 6 aumentarían en un 70% debido a las nuevas matriculaciones, sobre todo de zonas rurales y en vehículos más eficientes. Respecto a los vehículos diésel, se ha estimado que para 2030 en la Comunidad de Madrid, habrá una reducción de turismos de diésel norma Euro 4 y 5 del 60% y 15%, respectivamente, debido a que se ha detectado que estos son los que mayores emisiones producen. Los de diésel Euro 6 aumentarían en un 60% debido a las nuevas matriculaciones en vehículos de este tipo más eficientes y a la incorporación de captadores de CO<sub>2</sub>.

- Turismos Gas Natural: Una gran proporción de los turismos estará propulsado por este tipo de combustible pues Repsol apuesta por él ya que plantea para 2020 tener más de 700 puntos de repostaje de gas natural en sus versiones de GNC y GLP. Aun así, este tipo de combustible se utilizará más en el transporte público. En los últimos años, este tipo de combustible ha tenido un gran aumento, tanto es así que desde el 2017 al 2018, a nivel nacional, los turismos de gas natural han aumentado en un 150%. Este incremento se estima que es posible debido a la etapa de introducción según el ciclo de vida de un producto. Por eso, se estima que su tecnología se vuelva más madura hasta lograr un crecimiento más estable y constante para el 2030, siendo este del 100% respecto a los datos de 2018. Trasladando estos datos a los conocidos de la Comunidad de Madrid, se obtiene que en 2030 se estiman 5.600 turismos de gas natural.

**Motocicletas:** De forma general, como resultado de la concienciación por el medio ambiente y al igual que ocurre con los turismos, en las motocicletas se ha estimado que pasarán a tener una ocupación media de 1,6. Sin embargo, debido a la restricción de circulación y el mayor uso del transporte público, el km medio anual recorrido por vehículo dentro de la Comunidad de Madrid disminuirá un 15%, resultando en 441,3 km.

- Motocicletas gasolina: Las motocicletas de gasolina disminuirán debido a que estas también deberán llevar el distintivo medioambiental y su circulación estará restringida. Se ha estimado que la reducción de este tipo de motocicletas será del 25%. Trasladando este dato a la Comunidad de Madrid, en 2030 habrá 250.537 motocicletas de gasolina.

- Motocicletas eléctricas: En PNIEC 2021-2030 se estimaba que las motocicletas, los autobuses y los camiones ligeros sumarían un total de 1,5 millones de vehículos eléctricos en España para 2030. Trasladando ese dato a la Comunidad de Madrid y teniendo en cuenta el porcentaje que representan en el total de vehículos esos tres transportes mencionados, se estima que habrá 298.907 motocicletas eléctricas en 2030.

**Bicicletas:** Las bicicletas, tal y como plantea el plan de acción PNIEC 2021-2030 y otros planes de movilidad, se fomentarán en los próximos años. Desde BiciMad se pondrán a disposición de los habitantes más bicicletas, se ha estimado que para 2030 aumentarán un 100% el número de usuarios que utilizarán este servicio y el recorrido que estos realizarán aumentará un 50%.

**Transporte público:** El transporte público de forma general aumentará porque se verá fomentado, tal y como se ha explicado en los diferentes informes de plan de acción y medidas para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como por el aumento de población en las zonas urbanas. En la actualidad la evolución del uso del transporte público ha sido creciente en los últimos años, experimentando en el 2018, cuando ya se han implementado las restricciones medioambientales en algunas ciudades, un crecimiento del uso del autobús de un 7,8% y del cercanías de un 4,23% respecto al año anterior (Epdata, 2019) . Suponiendo que esta evolución creciente continuará, debido a la concienciación de los próximos años, se ha estimado un aumento del uso del transporte público de alrededor del 20% o 25% respecto a los datos de 2016. A continuación, se detalla la estimación del estado futuro para cada tipo de transporte público:

#### **Autobuses:**

- Autobuses urbanos e interurbanos diésel: Para 2030, se ha estimado que tanto el recorrido como la ocupación crecerán en Madrid, por lo que los pasajeros-km por habitante aumentarán en los autobuses urbanos un 3%. En los interurbanos, debido a la ocupación de zonas urbanas y los desplazamientos al trabajo, se ha estimado que aumentarán un 5%. Este porcentaje representaría el aumento del uso de los autobuses de diésel los primeros años hasta que se apueste por el uso de otras tecnologías en los autobuses.
- Autobuses eléctricos: El objetivo en un futuro es que los autobuses urbanos en su mayoría sean autobuses eléctricos y su estimación se ha realizado, como con la motocicleta eléctrica, basándonos en que el PNIEC 2021-2030 estimaba 1,5 millones de vehículos eléctricos en España entre motocicletas, autobuses y camiones ligeros. Teniendo en cuenta las proporciones pertinentes el resultado estimado para Madrid es de 11.000 autobuses eléctricos, que con el aumento de la ocupación y el aumento del recorrido supondría 3.102 millones de pkm.
- Autobuses de gas natural: El número de autobuses de este tipo de combustible ha aumentado en España en 2018 un 68% respecto a 2017 (Gasnam, 2019) . En el año 2016 había 600 autobuses de este combustible. Se ha estimado que la evolución creciente se mantendrá y se superará en los próximos años llegando a alcanzarse en 2030 en Madrid una cifra de 1.582 autobuses urbanos en circulación de gas natural, porque como se ha mencionado anteriormente

se considera que la tecnología evolucione a una etapa más madura, dónde el crecimiento continúe, pero de forma más estable. Teniendo en cuenta la ocupación y la distancia recorrida, este tipo de transporte alcanzaría 446 millones de pkm.

**Cercanías:** Debido al aumento de la evolución del uso del transporte público y a la potenciación que se va a producir de este tipo de transporte, suponemos que aumentará un 45% la demanda de este transporte por habitante debido a los desplazamientos hacia zonas rurales, resultando 6.695 millones de pkm.

**Metro y metro ligero:** Debido a la evolución creciente del uso del transporte público y al fomento del mismo, como se ha comentado anteriormente, suponemos que aumentará un 40% la demanda de este transporte por habitante, resultando 6.118 millones de pkm.

En la Tabla 13 se presenta una tabla resumen y comparativa de la propuesta del escenario futuro del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2030, en ella tras el cálculo de pkm/hab se ha aumentado sobre las estimaciones un 20% como consecuencia de las perspectivas del incremento de movilidad en el futuro estimada en diferentes estudios (PwC, 2018). Con esto, el resultado final del transporte en 2030 presenta un incremento del 25% del total de personas-km/habitantes transportadas respecto al año 2016.

Tabla 13. Tabla resumen y comparativa de datos de entrada caso actual y futuro

Habitantes Área Metropolitana Madrid= 6.466.996 (2016) y 7.433.229 (2030)	Datos de entrada caso actual (Madrid 2016)		Datos de entrada caso futuro (Madrid 2030)	
	millones personas-km	pkm/habitante	millones personas-km	pkm/habitante
Turismo EURO 1 gasolina	1.699,66	262,82	-	-
Turismo EURO 2 gasolina	1.531,64	236,84	-	-
Turismo EURO 3 gasolina	1.824,53	282,13	-	-
Turismo EURO 4 gasolina	1.534,30	237,25	778,43	125,67
Turismo EURO 5 gasolina	1.022,10	158,05	933,42	150,69
Turismo EURO 6 gasolina	1.043,84	161,41	1.800,62	290,69
Turismo EURO 1 diésel	225,26	34,83	-	-
Turismo EURO 2 diésel	1.127,77	174,39	-	-
Turismo EURO 3 diésel	3.549,14	548,81	-	-
Turismo EURO 4 diésel	4.040,49	624,79	1.639,97	264,75
Turismo EURO 5 diésel	2.771,00	428,48	2.390,00	385,84
Turismo EURO 6 diésel	1.938,06	299,69	3.146,52	507,97
Turismo eléctrico	39,58	6,12	9.226,31	1.489,47
Turismo gas natural	-	-	37,72	6,09
Motocicletas Madrid gasolina	243,02	37,58	88,98	14,36
Motocicletas Madrid eléctricas	0,96	0,15	141,68	22,87
Autobús urbano diésel	1.187,10	183,56	1.405,40	226,88
Autobús metropolitano diésel	2.974,10	459,89	3.589,38	579,46
Autobús urbano gas natural	-	-	446,12	72,02
Autobús urbano eléctrico	-	-	3.102,00	500,78
Metro y metro ligero	3.802,50	587,99	6.118,88	987,82
Cercanías Renfe	4.017,30	621,20	6.695,41	1.080,89
Bicicletas eléctricas (Bicimad)	8,44	1,30	25,32	4,09
<b>Totales:</b>	<b>34.580,78</b>	<b>5.347,27</b>	<b>41.566,17</b>	<b>6.710,33</b>

## 5. Análisis de impacto

En este apartado se presentan los resultados que corresponden a los dos escenarios analizados, los impactos ambientales del análisis de ciclo de vida del transporte de viajeros de la Comunidad de Madrid en el año 2016 y en el escenario propuesto para el año 2030. En el escenario del año 2016 se presentarán los resultados de impacto y energía de forma general, así como, un estudio comparativo de los impactos generados por los diferentes tipos de transportes de pasajeros. En el escenario del año 2030, se presentarán los resultados de impacto y energía de forma general, y por último se compararán los impactos generados según el tipo de transporte en los dos escenarios analizados.

Como se comentó anteriormente, en el apartado 2.2 de esta memoria, para el estudio se ha utilizado la unidad funcional de transporte de viajeros de la comunidad de Madrid en 2016 y 2030 normalizada por habitante.

Con objeto de mostrar las emisiones procedentes de cada fase del ciclo de vida, se ha realizado un primer análisis en el que se muestra la comparativa de las emisiones, por fases, de los distintos tipos de vehículos. Las fases en las que se ha dividido el ciclo de vida en este análisis son:

- Fase de construcción de la infraestructura: cuenta con la construcción de la carretera y el traslado de los materiales referentes a ella.
- Fase de producción de materiales y fase de desmantelamiento: cuenta con la producción del vehículo y la última fase de desmantelamiento, incluyendo todos los materiales, su posterior reciclaje y transportes de mercancías correspondientes.
- Fase uso y mantenimiento: cuenta con las emisiones referentes al uso del combustible o consumo de electricidad, en el caso del vehículo eléctrico. También cuenta con las emisiones referentes a las actividades de mantenimiento que se realizan durante la utilización del vehículo.

A continuación, en la Figura 6, se presentan las emisiones de CO<sub>2</sub> correspondientes a cada fase del ciclo de vida de los turismos.

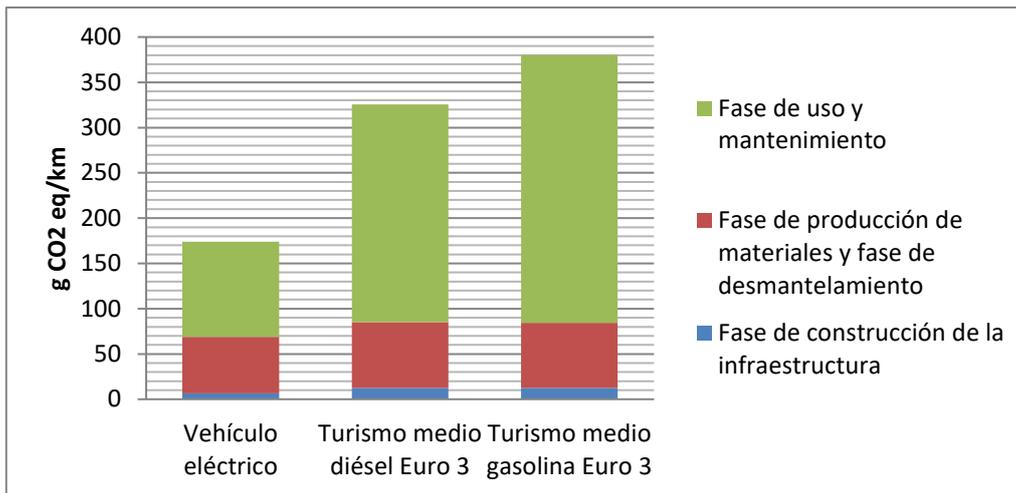


Figura 6. Comparación de emisiones del Calentamiento global de los turismos según fases.

Como se observa en la Figura 6, las emisiones de CO<sub>2</sub> que corresponden a la fase de uso y mantenimiento es mucho mayor que las de las otras fases de los ciclos de vida de estos turismos. Ésta varía considerablemente entre los diferentes sistemas de propulsión (60,4% para el turismo eléctrico, 73,9% para el turismo diésel y 77,8% para el turismo de gasolina). En el caso del turismo eléctrico estas emisiones corresponden a la procedencia de la electricidad consumida en la utilización del vehículo. Las emisiones referentes a la fase de construcción de la carretera son iguales en todos los turismos (3,8% en todos los casos), mientras que se observa una leve variación en la fase de producción del vehículo, debido a los materiales de los que se componen (35% para el eléctrico, 22,3% para el turismo diésel y 19% para el turismo de gasolina).

Los resultados obtenidos al realizar el ACV mediante el software SimaPro se han comparado con los del informe “TERM 2016” de la EEA (European Environment Agency, 2016). Este informe presenta los resultados por fases y aunque se asemejan, los resultados obtenidos mediante Simapro varían levemente respecto a los resultados del informe. Esto podría deberse a la diferencia en el método de conducción que se ha simulado o a que en los resultados de SimaPro hemos analizado también las emisiones referentes al mantenimiento del vehículo. También habría que resaltar que la producción del combustible, en el caso de SimaPro, se ha considerado como consumo durante el uso del vehículo. Los resultados finales del informe muestran que las emisiones de CO<sub>2</sub> en la fase de producción y eliminación del vehículo sería del 40,5% para el vehículo eléctrico, 22,7% para el turismo de diésel y 20% para el de gasolina, y la fase de producción del combustible y uso tendría unas emisiones de CO<sub>2</sub> de 59,5% para el vehículo eléctrico, 77,3% para el de diésel y 80% para el de gasolina.

En referencia al transporte público se presenta la Figura 7 comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub> por fases del ciclo de vida.

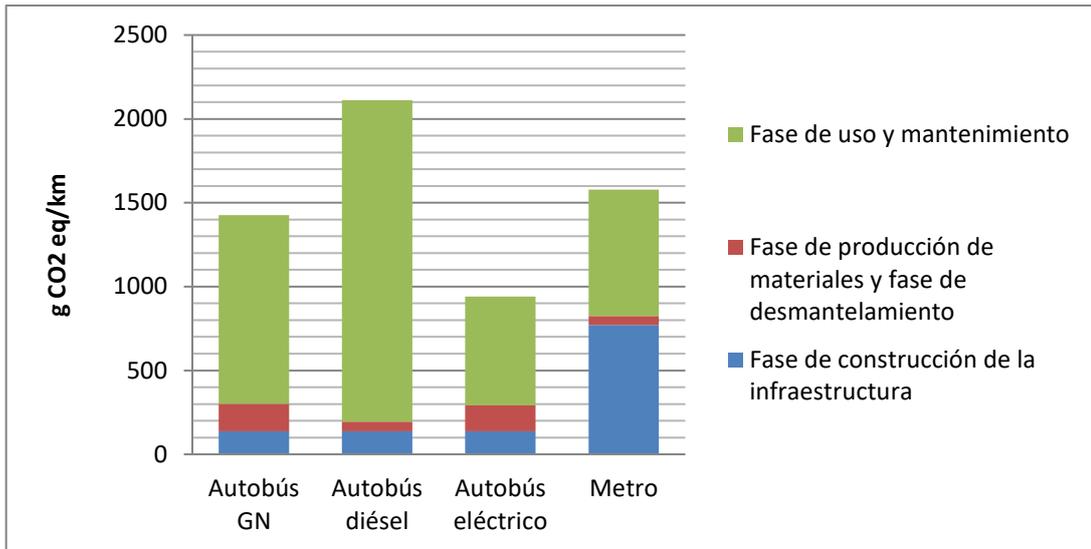


Figura 7. Comparación de emisiones del Calentamiento global de los transportes públicos según fases

Para el transporte público (Figura 7) cabe destacar la diferencia importante que existe en la fase de construcción de la infraestructura entre el metro y los distintos tipos de autobuses. Por otro lado, se observa también variación según el tipo de combustible en las emisiones referentes a la fase de producción del vehículo y obtención de los materiales.

En cuanto a la fase de uso y mantenimiento, el transporte que produce mayores emisiones es el autobús diésel, tras él, el autobús de gas natural, mientras que las emisiones de uso del autobús eléctrico y el metro son bastante parecidas.

Por otro lado, con objeto de validar los datos y el análisis del software para el escenario actual y futuro se ha realizado un segundo análisis donde se ha llegado a los resultados de las emisiones producidas por km. También se presentan los resultados de las emisiones producidas por pasajero y km (pkm) para los diferentes tipos de vehículos, dónde se tiene en cuenta la ocupación media de cada vehículo.

Los resultados de emisiones por km (g/km), de demanda de energía acumulada MJ/Km y de emisiones por pasajero y Km (g/pkm) del ciclo de vida se muestran en las tablas 14, 15 y 17 respectivamente y sirven para realizar una comparación del impacto de cada tipo de vehículo.

Tabla 14. Resultados de emisiones (g/km) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes.

Categoría de impacto:	Calentamiento global (GWP100a)	Potencial de agotamiento abiótico	Agotamiento de la capa de ozono (PAO)	Toxicidad en humanos	Ecotoxicidad acuática de agua dulce	Ecotoxicidad acuática marina	Ecotoxicidad terrestre	Oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
Unidad:	g CO2 eq/km	g Sb eq/km	g CFC-11 eq/km	g 1,4-DB eq/km	g 1,4-DB eq/km	g 1,4-DB eq/km	g 1,4-DB eq/km	g C2H4 eq/km	g SO2 eq/km	g PO4 eq/km
<b>Turismos Euro 1 gasolina</b>	4,2E+02	3,8E-03	6,7E-05	2,9E+02	2,3E+02	2,7E+05	5,4E-01	1,6E-01	1,3E+00	4,3E-01
<b>Turismos Euro 2 gasolina</b>	4,0E+02	3,8E-03	6,4E-05	2,9E+02	2,3E+02	2,7E+05	5,4E-01	1,4E-01	1,2E+00	3,9E-01
<b>Turismos Euro 3 gasolina</b>	3,8E+02	3,8E-03	6,1E-05	2,8E+02	2,3E+02	2,6E+05	5,3E-01	1,3E-01	9,9E-01	3,8E-01
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	3,6E+02	3,8E-03	5,8E-05	2,8E+02	2,3E+02	2,6E+05	5,3E-01	1,0E-01	9,4E-01	3,7E-01
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	3,5E+02	3,8E-03	5,6E-05	2,8E+02	2,3E+02	2,6E+05	5,2E-01	9,9E-02	8,9E-01	3,7E-01
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	3,4E+02	3,8E-03	5,4E-05	2,8E+02	2,3E+02	2,6E+05	5,2E-01	9,8E-02	9,0E-01	3,6E-01
<b>Turismos Euro 1 diésel</b>	3,5E+02	3,8E-03	5,9E-05	3,0E+02	2,4E+02	2,7E+05	5,3E-01	7,6E-02	1,1E+00	3,9E-01
<b>Turismos Euro 2 diésel</b>	3,4E+02	3,8E-03	5,7E-05	3,0E+02	2,4E+02	2,7E+05	5,3E-01	7,2E-02	1,1E+00	3,8E-01
<b>Turismos Euro 3 diésel</b>	3,3E+02	3,8E-03	5,4E-05	3,0E+02	2,4E+02	2,7E+05	5,2E-01	6,6E-02	1,1E+00	3,8E-01
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	3,1E+02	3,8E-03	5,2E-05	3,0E+02	2,4E+02	2,6E+05	5,2E-01	6,4E-02	1,0E+00	3,6E-01
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	3,1E+02	3,8E-03	5,1E-05	2,9E+02	2,4E+02	2,6E+05	5,2E-01	6,3E-02	1,0E+00	3,6E-01
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	3,0E+02	3,8E-03	4,9E-05	2,9E+02	2,4E+02	2,6E+05	5,1E-01	6,3E-02	9,7E-01	3,6E-01
<b>Turismos eléctricos</b>	1,7E+02	5,5E-03	2,3E-05	2,3E+02	1,9E+02	4,3E+05	1,1E+00	3,1E-01	6,2E-01	6,1E-01
<b>Turismo gas natural</b>	2,9E+02	3,7E-03	4,3E-05	2,4E+02	2,3E+02	2,6E+05	5,0E-01	7,8E-02	8,9E-01	3,4E-01
<b>Motocicletas gasolina</b>	9,2E+01	4,0E-04	1,5E-05	3,2E+02	8,4E+01	2,0E+05	3,8E-01	3,5E-01	3,9E-01	2,3E-01
<b>Motocicletas eléctricas</b>	4,4E+01	1,5E-03	5,7E-06	6,7E+01	6,9E+01	1,5E+05	2,2E-01	1,9E-02	3,3E-01	1,6E-01
<b>Autobús urbano diésel</b>	2,1E+03	1,6E-03	1,7E-04	3,0E+02	2,1E+02	4,4E+05	1,6E+00	4,0E-01	1,3E+01	3,4E+00
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	2,3E+03	1,8E-03	1,8E-04	3,2E+02	2,3E+02	4,8E+05	1,7E+00	4,3E-01	1,4E+01	3,7E+00
<b>Autobús urbano gas natural</b>	1,2E+03	8,0E-03	1,6E-04	5,6E+02	5,1E+02	4,4E+05	1,3E+00	2,0E-01	5,3E+00	3,0E+00
<b>Autobús urbano eléctrico</b>	9,4E+02	1,4E-02	1,2E-04	6,8E+02	6,7E+02	1,5E+06	5,4E+00	4,9E-01	5,3E+00	2,4E+00
<b>Metro y metro ligero</b>	1,6E+03	4,2E-03	1,8E-04	8,5E+02	4,9E+02	1,6E+06	4,8E+00	4,1E-01	9,4E+00	3,4E+00
<b>Cercanías Renfe</b>	1,9E+03	1,5E-02	7,6E-04	2,2E+03	1,1E+03	2,7E+06	7,9E+00	6,2E-01	9,6E+00	5,0E+00
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	1,6E+01	4,2E-04	2,6E-06	3,9E+01	2,3E+01	1,0E+05	1,1E-01	7,4E-03	1,4E-01	7,3E-02

La Tabla 14 muestra las emisiones producidas en todo el ciclo de vida para los distintos vehículos, diferenciados por tipo de combustible. En este caso la unidad en la que se representan los resultados es en g/km. Entre los resultados mostrados se puede destacar que:

- Los transportes públicos presentan, en este apartado, valores más altos que los que muestran el resto de vehículos. Esto se debe al gran consumo de combustible por km de los vehículos utilizados en los transportes públicos, así como por las emisiones correspondientes a la etapa de la producción de los materiales que los forman. En el caso concreto del metro y del cercanías el alto impacto tiene su origen en la gran cantidad de energía que consumen para recorrer un km e, igualmente, por lo que representa la producción de estos trenes.

- El impacto de acidificación es levemente mayor en los vehículos de motorización diésel. Esto se debe al nivel de las emisiones de SO<sub>2</sub> y a la abundancia de emisiones de óxidos de nitrógeno, los llamados NO<sub>x</sub>, que emiten los vehículos diésel en su fase de uso. Estas emisiones de SO<sub>2</sub> eran significativas en las primeras normas euro porque en la mezcla del combustible se incorporaba una pequeña cantidad de azufre, pero van disminuyendo en los vehículos de norma Euro 5 y 6 debido a que, a partir de 2009, se puso en marcha el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero que prohibía la venta de combustibles con composición de azufre.

- Los impactos del transporte de propulsión eléctrica sobre el calentamiento global y sobre el agotamiento de la capa de ozono son menores que los de los vehículos de combustión, aunque en otros impactos sí superan a los vehículos de combustión, como es el caso del potencial de agotamiento de recursos, ecotoxicidad acuática marina, ecotoxicidad terrestre, oxidación fotoquímica y eutrofización. El alto resultado mostrado por los vehículos eléctricos en estos últimos impactos citados se debe a su elevado grado de utilización de energía eléctrica durante su fase de uso, pero, sobre todo, a la procedencia de esta energía eléctrica, debido a que en 2016 en España el mix energético (REE, 2017) incorpora un 23% de energía nuclear y un 21% de energía procedente del carbón. De igual manera los resultados se ven altamente influenciados por la tipología de los materiales con los que se fabrican los vehículos eléctricos: las baterías, electrónica de potencia y el motor eléctrico contienen en componentes basados en metales como el litio, el aluminio y el cinc, que los vehículos convencionales no poseen, y que tienen un alto impacto en el ecosistema debido a los procesos de extracción, minería y metalurgia (EEA, 2018).

A continuación, se muestra la Demanda Acumulada de Energía en todo su ciclo de vida entre km recorrido.

Tabla 15. Resultados de Demanda Acumulada de Energía (MJ/km) durante todo el ciclo de vida de los distintos transportes

Energía final consumida	Fuentes no renovables				Fuentes renovables				Total de Energía
	Combustibles fósiles	Nuclear	Biomasa	Total Fuentes no renovables	Biomasa	Eólica, solar y geotérmica	Hidráulica	Total Fuentes renovables	
Unidad:	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km	MJ/km
<b>Turismos Euro 1 gasolina</b>	6,0E+00	1,8E-01	1,8E-04	6,2E+00	5,0E-02	9,8E-03	6,1E-02	1,2E-01	6,3E+00
<b>Turismos Euro 2 gasolina</b>	5,8E+00	1,8E-01	1,8E-04	5,9E+00	5,0E-02	9,6E-03	6,0E-02	1,2E-01	6,1E+00
<b>Turismos Euro 3 gasolina</b>	5,5E+00	1,8E-01	1,7E-04	5,7E+00	4,9E-02	9,5E-03	5,9E-02	1,2E-01	5,8E+00
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	5,3E+00	1,8E-01	1,7E-04	5,4E+00	4,9E-02	9,3E-03	5,9E-02	1,2E-01	5,6E+00
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	5,1E+00	1,7E-01	1,7E-04	5,2E+00	4,8E-02	9,2E-03	5,8E-02	1,2E-01	5,4E+00
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	4,9E+00	1,7E-01	1,7E-04	5,0E+00	4,8E-02	9,1E-03	5,8E-02	1,2E-01	5,2E+00
<b>Turismos Euro 1 diésel</b>	5,2E+00	1,7E-01	1,8E-04	5,4E+00	4,8E-02	8,8E-03	5,8E-02	1,1E-01	5,5E+00
<b>Turismos Euro 2 diésel</b>	5,0E+00	1,6E-01	1,8E-04	5,2E+00	4,8E-02	8,8E-03	5,8E-02	1,1E-01	5,3E+00
<b>Turismos Euro 3 diésel</b>	4,8E+00	1,6E-01	1,8E-04	5,0E+00	4,8E-02	8,7E-03	5,7E-02	1,1E-01	5,1E+00
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	4,6E+00	1,6E-01	1,8E-04	4,8E+00	4,7E-02	8,6E-03	5,7E-02	1,1E-01	4,9E+00
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	4,5E+00	1,6E-01	1,8E-04	4,7E+00	4,7E-02	8,5E-03	5,7E-02	1,1E-01	4,8E+00
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	4,4E+00	1,6E-01	1,8E-04	4,5E+00	4,7E-02	8,5E-03	5,6E-02	1,1E-01	4,6E+00
<b>Turismos eléctricos</b>	2,4E+00	6,4E-01	1,6E-04	3,0E+00	5,6E-02	1,1E-01	1,2E-01	2,8E-01	3,3E+00
<b>Turismo gas natural</b>	4,9E+00	1,8E-01	1,6E-04	5,1E+00	4,5E-02	8,6E-03	6,7E-02	1,2E-01	5,2E+00
<b>Motocicletas gasolina</b>	1,4E+00	3,0E-02	5,2E-05	1,5E+00	7,8E-03	1,3E-03	1,3E-02	2,2E-02	1,5E+00
<b>Motocicletas eléctricas</b>	5,9E-01	1,2E-01	7,1E-05	7,1E-01	1,4E-02	1,7E-02	2,9E-02	6,1E-02	7,7E-01
<b>Autobús urbano diésel</b>	1,2E+01	4,9E-01	4,8E-04	1,2E+01	1,4E-01	3,1E-02	1,7E-01	3,4E-01	1,3E+01
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	1,3E+01	5,3E-01	5,2E-04	1,4E+01	1,5E-01	3,4E-02	1,9E-01	3,7E-01	1,4E+01
<b>Autobús urbano gas natural</b>	1,7E+01	5,7E-01	5,3E-04	1,8E+01	1,5E-01	3,4E-02	2,6E-01	4,4E-01	1,8E+01
<b>Autobús urbano eléctrico</b>	1,1E+01	3,7E+00	7,1E-04	1,5E+01	2,4E-01	6,7E-01	5,6E-01	1,5E+00	1,6E+01
<b>Metro y metro ligero</b>	1,9E+01	4,7E+00	1,3E-03	2,4E+01	3,9E-01	6,7E-01	8,9E-01	1,9E+00	2,6E+01
<b>Cercanías Renfe</b>	7,3E+01	1,9E+01	2,8E-03	9,2E+01	2,5E-01	8,4E-01	1,3E+00	2,4E+00	9,5E+01
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	2,0E-01	8,8E-02	3,0E-05	2,9E-01	7,2E-03	1,4E-03	2,7E-02	3,6E-02	3,2E-01

La energía consumida de la Tabla 15 hace referencia a la cantidad y a la procedencia de energía usada durante todo el ciclo de vida de los vehículos. En esta energía, como se mencionó anteriormente, se incluyen los consumos directos e indirectos. De forma general, la energía consumida procede de fuentes no renovables. Los transportes públicos son los que mayor energía

consumen tanto en su producción como en su operación. Habría que destacar que el consumo de energía de los turismos de gasolina y diésel es mayor que el consumo de los vehículos eléctricos. Esto se debe a que, analizando el total de ciclo de vida en los vehículos de combustión, el consumo de energía es muy grande tanto en la producción y abastecimiento del combustible como en la operación del vehículo debido al peso que representa la energía procedente del combustible, mientras que en el vehículo eléctrico la gran parte de su consumo de energía se centra en la producción y abastecimiento de materiales, siendo mucho menor la fase de operación debido al uso de energía eléctrica para generar el movimiento del motor.

Tras estas reflexiones, se presentan los resultados teniendo en cuenta el transporte de viajeros. En este caso, los resultados de la tabla 17 muestra las emisiones por km y pasajeros transportados. El número de pasajeros seleccionado es la ocupación media para turismos y motocicletas recogida por la encuesta de viajeros de la D.G de carreteras de España (S.G. de Explotación y Gestión de Red, 2014) y, para el transporte público, los pasajeros se han recogido de la ocupación media según el número de viajeros en el año 2016 que proporciona el Observatorio de Movilidad (TRANSyT, 2018), resultando la ocupación que se presenta en la Tabla 16.

Para el caso futuro, la ocupación sufre una variación que se explicará en el apartado del proyecto correspondiente al análisis futuro.

*Tabla 16. Ocupación de los vehículos.*

	Ocupación (p)
Turismos	1,6
Motocicletas	1,4
Autobús urbano	22
Autobús metropolitano	24
Metro y metro ligero	35
Cercanías Renfe	111
Bicicletas eléctricas (Bicimad)	1

Tabla 17. Resultados de emisiones (g/pkm) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes.

Categoría de impacto:	Calentamiento global (GWP100a)	Potencial de agotamiento abiótico	Agotamiento de la capa de ozono (PAO)	Toxicidad en humanos	Ecotoxicidad acuática de agua dulce	Ecotoxicidad acuática marina	Ecotoxicidad terrestre	Oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
Unidad:	g CO2 eq/pkm	g Sb eq/pkm	g CFC-11 eq/pkm	g 1,4-DB eq/pkm	g 1,4-DB eq/pkm	g 1,4-DB eq/pkm	g 1,4-DB eq/pkm	g C2H4 eq/pkm	g SO2 eq/pkm	g PO4 eq/pkm
<b>Turismos Euro 1 gasolina</b>	2,5E+02	2,3E-03	4,0E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,2E-01	9,6E-02	7,8E-01	2,5E-01
<b>Turismos Euro 2 gasolina</b>	2,4E+02	2,3E-03	3,8E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,2E-01	8,6E-02	7,2E-01	2,3E-01
<b>Turismos Euro 3 gasolina</b>	2,3E+02	2,2E-03	3,6E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,2E-01	7,9E-02	6,1E-01	2,3E-01
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	2,2E+02	2,2E-03	3,5E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	6,0E-02	5,8E-01	2,2E-01
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	2,1E+02	2,2E-03	3,3E-05	1,6E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	5,9E-02	5,5E-01	2,2E-01
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	2,0E+02	2,2E-03	3,2E-05	1,6E+02	1,3E+02	1,5E+05	3,1E-01	5,8E-02	5,6E-01	2,2E-01
<b>Turismos Euro 1 diésel</b>	2,1E+02	2,3E-03	3,5E-05	1,8E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,2E-01	4,5E-02	6,8E-01	2,3E-01
<b>Turismos Euro 2 diésel</b>	2,0E+02	2,2E-03	3,4E-05	1,8E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	4,3E-02	6,8E-01	2,3E-01
<b>Turismos Euro 3 diésel</b>	1,9E+02	2,2E-03	3,2E-05	1,8E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	3,9E-02	6,7E-01	2,3E-01
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	1,9E+02	2,2E-03	3,1E-05	1,8E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	3,8E-02	6,3E-01	2,2E-01
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	1,8E+02	2,2E-03	3,0E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	3,8E-02	6,2E-01	2,2E-01
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	1,8E+02	2,2E-03	2,9E-05	1,7E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,1E-01	3,7E-02	6,0E-01	2,1E-01
<b>Turismos eléctricos</b>	1,0E+02	3,3E-03	1,4E-05	1,3E+02	1,2E+02	2,6E+05	6,5E-01	1,8E-01	3,8E-01	3,6E-01
<b>Turismo gas natural</b>	1,7E+02	2,2E-03	2,5E-05	1,4E+02	1,4E+02	1,6E+05	3,0E-01	4,7E-02	5,3E-01	2,0E-01
<b>Motocicletas gasolina</b>	6,6E+01	2,8E-04	1,1E-05	2,3E+02	6,0E+01	1,4E+05	2,7E-01	2,5E-01	2,7E-01	1,6E-01
<b>Motocicletas eléctricas</b>	3,0E+01	1,0E-03	4,0E-06	4,7E+01	4,8E+01	1,1E+05	1,5E-01	1,3E-02	2,3E-01	1,1E-01
<b>Autobús urbano diésel</b>	9,6E+01	7,5E-05	7,5E-06	1,3E+01	9,5E+00	2,0E+04	7,2E-02	1,8E-02	5,8E-01	1,6E-01
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	9,6E+01	7,5E-05	7,5E-06	1,3E+01	9,5E+00	2,0E+04	7,2E-02	1,8E-02	5,8E-01	1,6E-01
<b>Autobús urbano gas natural</b>	5,4E+01	3,6E-04	7,3E-06	2,5E+01	2,3E+01	2,0E+04	5,8E-02	9,0E-03	2,4E-01	1,4E-01
<b>Autobús urbano eléctrico</b>	4,3E+01	6,5E-04	5,2E-06	3,1E+01	3,0E+01	6,9E+04	2,5E-01	2,2E-02	2,4E-01	1,1E-01
<b>Metro y metro ligero</b>	4,5E+01	1,2E-04	5,2E-06	2,4E+01	1,4E+01	4,6E+04	1,4E-01	1,2E-02	2,7E-01	9,6E-02
<b>Cercanías Renfe</b>	1,7E+01	1,3E-04	6,9E-06	2,0E+01	9,9E+00	2,4E+04	7,2E-02	5,6E-03	8,7E-02	4,5E-02
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	1,6E+01	4,2E-04	2,6E-06	3,9E+01	2,3E+01	1,0E+05	1,1E-01	7,4E-03	1,4E-01	7,3E-02

En la Tabla 17 se muestra cómo las grandes emisiones en g/km producidas por los transportes públicos se ven compensadas si se tienen en cuenta el número de pasajeros que estos vehículos transportan, siendo así menores las emisiones de estos vehículos, bajo esta consideración, que las de los turismos. Sin embargo, las emisiones procedentes de los vehículos privados casi se mantienen, debido a que la ocupación media es prácticamente de una persona por vehículo.

De esta manera, con la Tabla 17 en g/pkm se puede afirmar que una persona contaminaría menos si utilizara el transporte público, pues las emisiones de los vehículos privados en g/pkm son mayores en todos los impactos ambientales demostrados frente a las que presentan los vehículos públicos.

## 5.1 Análisis de la demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid, año 2016

### 5.1.1 Resultados generales

Tras la presentación de los datos de entrada y el análisis de impacto, se muestran en las tablas 18 y 19 con los resultados generales referentes a la situación del transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid en el año 2016. En este caso el reparto modal que se da en la actualidad en la C. de Madrid refleja directamente el impacto medioambiental que estos vehículos producen.

Tabla 18. Resultados de emisiones (kg/hab) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes de la C. de Madrid año 2016

Categoría de impacto:	<i>Calentamiento global (GWP100a)</i>	<i>Potencial de agotamiento abiótico</i>	<i>Agotamiento de la capa de ozono (PAO)</i>	<i>Toxicidad en humanos</i>	<i>Ecotoxicidad acuática de agua dulce</i>	<i>Ecotoxicidad acuática marina</i>	<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	<i>Oxidación fotoquímica</i>	<i>Acidificación</i>	<i>Eutrofización</i>
Unidad:	kg CO2 eq/hab	kg Sb eq/hab	kg CFC-11 eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg 1,4-DB eq /hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg C2H4 eq/hab	kg SO2 eq/hab	kg PO4 eq/hab
<b>Turismos Euro 1 gasolina</b>	6,5E+01	5,9E-04	1,1E-05	4,5E+01	3,6E+01	4,2E+04	8,5E-02	2,5E-02	2,2E-01	6,6E-02
<b>Turismos Euro 2 gasolina</b>	5,6E+01	5,3E-04	9,1E-06	4,0E+01	3,2E+01	3,7E+04	7,6E-02	2,0E-02	1,8E-01	5,5E-02
<b>Turismos Euro 3 gasolina</b>	6,4E+01	6,3E-04	1,0E-05	4,8E+01	3,8E+01	4,4E+04	8,9E-02	2,2E-02	2,0E-01	6,4E-02
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	5,1E+01	5,3E-04	8,2E-06	4,0E+01	3,2E+01	3,7E+04	7,4E-02	1,4E-02	1,6E-01	5,3E-02
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	3,3E+01	3,6E-04	5,3E-06	2,6E+01	2,1E+01	2,5E+04	4,9E-02	9,3E-03	1,0E-01	3,4E-02
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	3,2E+01	3,6E-04	5,2E-06	2,7E+01	2,2E+01	2,5E+04	5,0E-02	9,4E-03	1,0E-01	3,5E-02
<b>Turismos Euro 1 diésel</b>	7,3E+00	7,8E-05	1,2E-06	6,2E+00	5,0E+00	5,5E+03	1,1E-02	1,6E-03	2,4E-02	8,0E-03
<b>Turismos Euro 2 diésel</b>	3,5E+01	3,9E-04	5,9E-06	3,1E+01	2,5E+01	2,8E+04	5,5E-02	7,5E-03	1,2E-01	4,0E-02
<b>Turismos Euro 3 diésel</b>	1,1E+02	1,2E-03	1,8E-05	9,7E+01	7,8E+01	8,7E+04	1,7E-01	2,2E-02	3,7E-01	1,3E-01
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	1,2E+02	1,4E-03	1,9E-05	1,1E+02	8,9E+01	9,8E+04	1,9E-01	2,4E-02	3,9E-01	1,4E-01
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	7,8E+01	9,6E-04	1,3E-05	7,4E+01	6,1E+01	6,7E+04	1,3E-01	1,6E-02	2,6E-01	9,2E-02
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	5,3E+01	6,7E-04	8,7E-06	5,2E+01	4,2E+01	4,7E+04	9,2E-02	1,1E-02	1,8E-01	6,4E-02
<b>Turismos eléctricos</b>	6,3E-01	2,0E-05	8,5E-08	8,2E-01	7,0E-01	1,6E+03	4,0E-03	1,1E-03	4,4E-03	2,2E-03
<b>Motocicletas gasolina</b>	2,5E+00	1,1E-05	4,0E-07	8,5E+00	3,7E-01	1,7E+03	2,6E-03	9,3E-03	1,0E-02	2,4E-03
<b>Motocicletas eléctricas</b>	4,5E-03	1,5E-07	5,9E-10	7,0E-03	7,2E-03	1,6E+01	2,3E-05	2,0E-06	3,4E-05	1,7E-05
<b>Autobús urbano diésel</b>	1,8E+01	1,4E-05	1,4E-06	2,5E+00	1,7E+00	3,7E+03	1,3E-02	3,3E-03	1,1E-01	2,8E-02
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	4,4E+01	3,4E-05	3,5E-06	6,2E+00	4,4E+00	9,2E+03	3,3E-02	8,3E-03	2,7E-01	7,1E-02
<b>Metro y metro ligero</b>	2,7E+01	7,1E-05	3,1E-06	1,4E+01	8,2E+00	2,7E+04	8,0E-02	6,9E-03	1,6E-01	5,7E-02
<b>Cercanías Renfe</b>	1,0E+01	8,3E-05	4,3E-06	1,2E+01	6,2E+00	1,5E+04	4,4E-02	3,5E-03	5,4E-02	2,8E-02
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	2,1E-02	5,4E-07	3,3E-09	5,1E-02	3,0E-02	1,4E+02	1,4E-04	9,6E-06	1,8E-04	9,6E-05
<b>Total:</b>	8,0E+02	8,0E-03	1,3E-04	6,4E+02	5,0E+02	6,0E+05	1,3E+00	2,2E-01	2,9E+00	9,6E-01

Tabla 19. Energía consumida (MJ/hab) caso actual C. de Madrid 2016

Demanda Acumulada de Energía	Fuentes no renovables				Fuentes renovables				Total de Energía
	Combustibles fósiles	Nuclear	Biomasa	Total F. no renovables	Biomasa	Eólica, solar y geotérmica	Hidráulica	Total F. renovables	
Unidad:	MJ/ habs	MJ/ habs	MJ/ habs	MJ/habs	MJ/ habs	MJ/ habs	MJ/ habs	MJ/habs	MJ/ habs
<b>Turismos Euro 1 gasolina</b>	9,4E+02	2,9E+01	2,8E-02	9,7E+02	7,8E+00	1,5E+00	9,5E+00	1,9E+01	9,9E+02
<b>Turismos Euro 2 gasolina</b>	8,1E+02	2,5E+01	2,5E-02	8,4E+02	7,0E+00	1,4E+00	8,5E+00	1,7E+01	8,6E+02
<b>Turismos Euro 3 gasolina</b>	9,3E+02	3,0E+01	2,9E-02	9,6E+02	8,3E+00	1,6E+00	1,0E+01	2,0E+01	9,8E+02
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	7,4E+02	2,5E+01	2,4E-02	7,7E+02	6,9E+00	1,3E+00	8,3E+00	1,7E+01	7,8E+02
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	4,8E+02	1,6E+01	1,6E-02	4,9E+02	4,6E+00	8,7E-01	5,5E+00	1,1E+01	5,0E+02
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	4,7E+02	1,6E+01	1,6E-02	4,8E+02	4,6E+00	8,8E-01	5,6E+00	1,1E+01	5,0E+02
<b>Turismos Euro 1 diésel</b>	1,1E+02	3,5E+00	3,8E-03	1,1E+02	1,0E+00	1,8E-01	1,2E+00	2,4E+00	1,1E+02
<b>Turismos Euro 2 diésel</b>	5,2E+02	1,7E+01	1,9E-02	5,4E+02	5,0E+00	9,1E-01	6,0E+00	1,2E+01	5,5E+02
<b>Turismos Euro 3 diésel</b>	1,6E+03	5,3E+01	5,9E-02	1,6E+03	1,6E+01	2,8E+00	1,9E+01	3,7E+01	1,7E+03
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	1,7E+03	6,0E+01	6,6E-02	1,8E+03	1,8E+01	3,2E+00	2,1E+01	4,2E+01	1,8E+03
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	1,2E+03	4,1E+01	4,5E-02	1,2E+03	1,2E+01	2,2E+00	1,4E+01	2,9E+01	1,2E+03
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	7,8E+02	2,8E+01	3,2E-02	8,1E+02	8,4E+00	1,5E+00	1,0E+01	2,0E+01	8,3E+02
<b>Turismos eléctricos</b>	8,7E+00	2,3E+00	5,7E-04	1,1E+01	2,0E-01	3,9E-01	4,2E-01	1,0E+00	1,2E+01
<b>Motocicletas gasolina</b>	3,7E+01	7,8E-01	1,4E-03	3,8E+01	2,0E-01	3,5E-02	3,4E-01	5,8E-01	3,9E+01
<b>Motocicletas eléctricas</b>	6,1E-02	1,2E-02	7,4E-06	7,3E-02	1,5E-03	1,8E-03	3,0E-03	6,3E-03	8,0E-02
<b>Autobús urbano diésel</b>	1,0E+02	4,1E+00	4,0E-03	1,0E+02	1,2E+00	2,6E-01	1,4E+00	2,9E+00	1,1E+02
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	2,5E+02	1,0E+01	1,0E-02	2,6E+02	2,9E+00	6,4E-01	3,6E+00	7,2E+00	2,7E+02
<b>Metro y metro ligero</b>	3,3E+02	7,9E+01	2,2E-02	4,0E+02	6,5E+00	1,1E+01	1,5E+01	3,3E+01	4,4E+02
<b>Cercanías Renfe</b>	8,3E+02	7,4E+01	1,6E-02	9,0E+02	8,1E+00	7,7E-01	8,4E+00	1,7E+01	9,1E+02
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	2,6E-01	1,1E-01	3,9E-05	3,8E-01	9,4E-03	1,9E-03	3,5E-02	4,7E-02	4,2E-01
<b>Total</b>	1,2E+04	5,2E+02	4,2E-01	1,2E+04	1,2E+02	3,2E+01	1,5E+02	3,0E+02	1,3E+04

La tabla 18 muestra el resultado del impacto del transporte de pasajeros. En ella se observa el gran impacto que provoca el vehículo privado frente al resto de transportes. También se puede observar el alto impacto de los turismos diésel en el calentamiento global y el alto impacto sobre el medio de los vehículos eléctricos y del transporte público debido a los materiales de los que están producidos. Posteriormente, se explicará y compararán estos resultados en profundidad.

La tabla 19 del consumo de energía demuestra que el consumo del transporte de pasajeros en la Comunidad de Madrid es muy alto. El total de energía consumida por el transporte en España en el año 2016 fue de 1.227.543 TJ, incluyendo el transporte por carretera, ferroviario, marítimo y aeronáutico, dónde sólo el de carretera representa un 93% del total según el Ministerio de Fomento (2019). El consumo de energía debido al transporte destaca frente al resto de sectores en el país, tanto es así que el Informe del Observatorio del Transporte (Ministerio de Fomento, 2019) afirma que “tanto en la Unión Europea como en España, el transporte es el sector con mayor consumo energético, con un 33,2% de la Demanda Acumulada de Energía en los países de la UE-28, y un porcentaje aún mayor en España, donde se alcanza en 2016 un 42,4%”.

En la Figura 8 que se muestra de forma proporcional el impacto de cada tipo de transporte en las distintas categorías de impactos analizadas, de forma que se pueda hacer una comparativa de los medios de transportes, dejando ver qué tipo de transporte es el que produce mayores emisiones en cada impacto medioambiental.

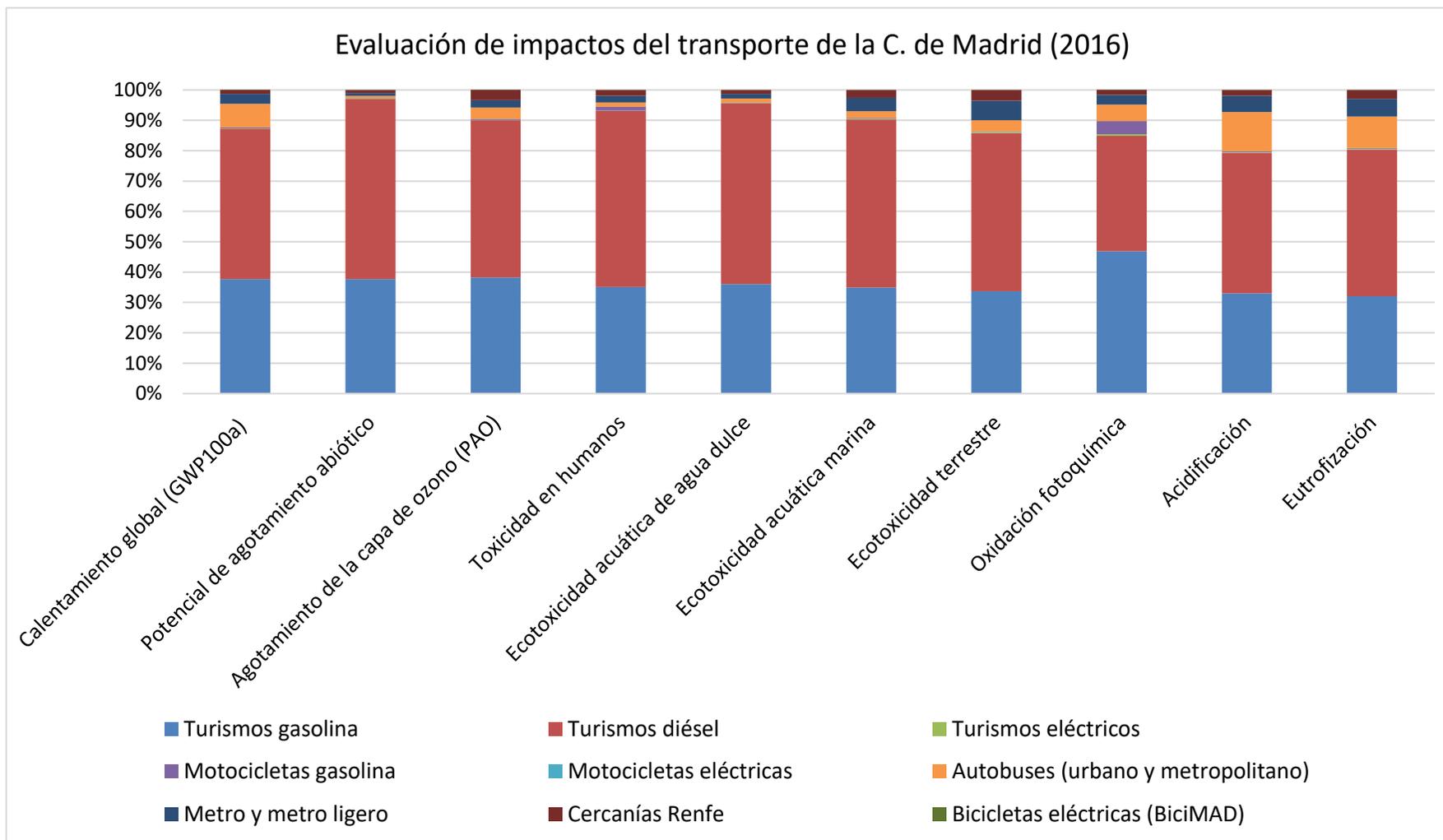


Figura 8. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2016

A continuación, en las Figuras 9-15 se muestran los impactos de turismos y autobuses agrupados por tipo de combustible y de metro y cercanías, con objeto de realizar una comparación más detallada de los impactos más característicos del transporte público frente al del vehículo privado. En estas figuras no se muestra el impacto de los vehículos eléctricos porque es muy bajo debido al número de vehículos de este tipo que se encuentran en el año 2016 en la Comunidad de Madrid.

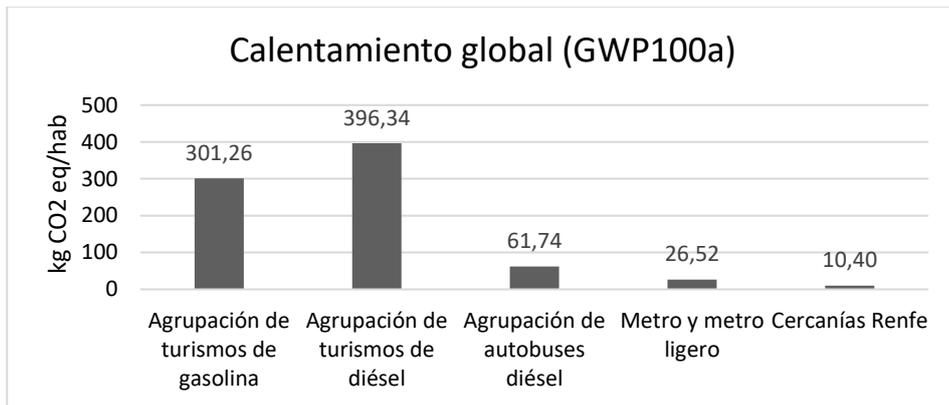


Figura 9. Comparación de Calentamiento Global. C. de Madrid 2016

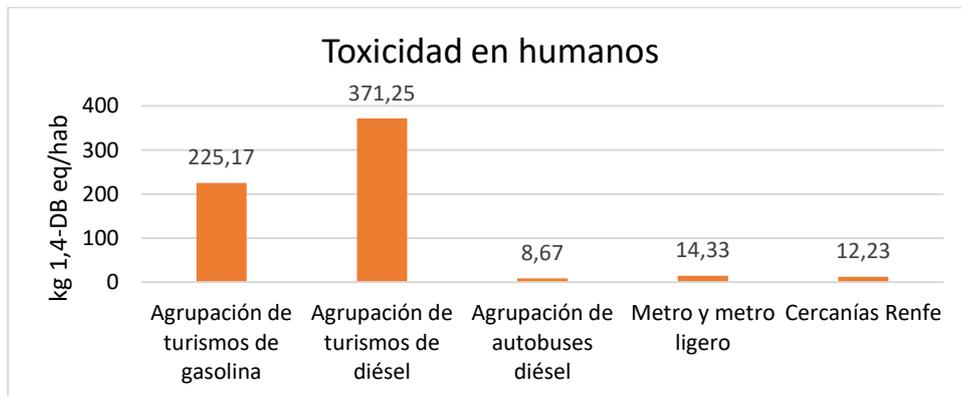


Figura 10. Comparación de Toxicidad en humanos. C. de Madrid 2016

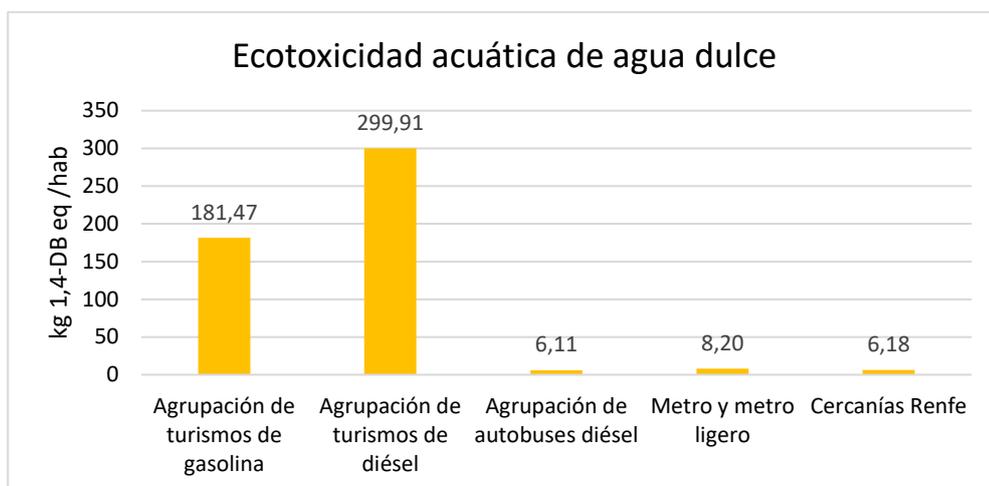


Figura 11. Comparación de Ecotoxicidad acuática de agua dulce. C. de Madrid 2016

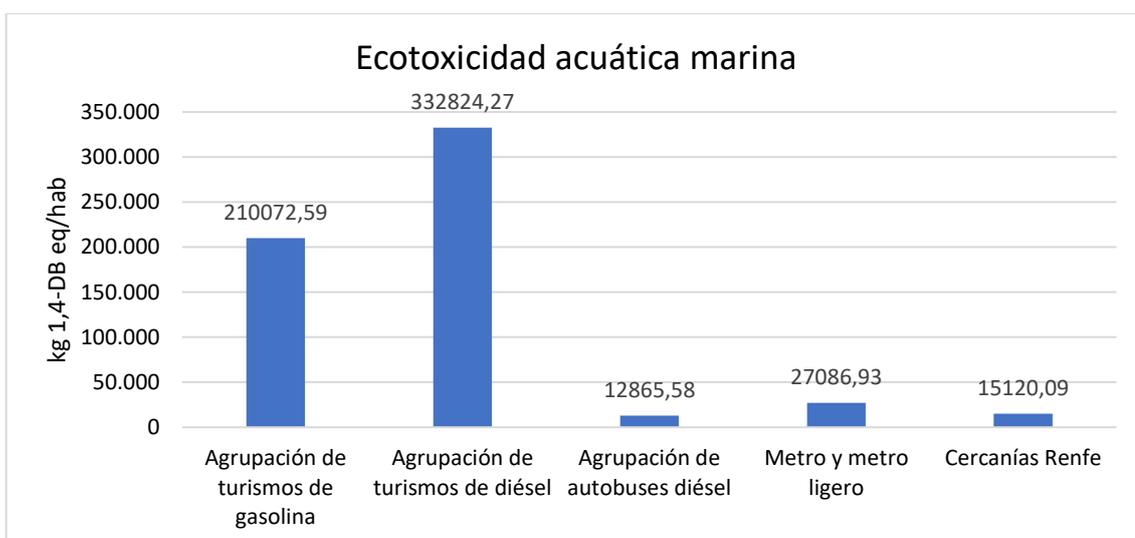


Figura 12. Comparación de Ecotoxicidad acuática marina. C. de Madrid 2016

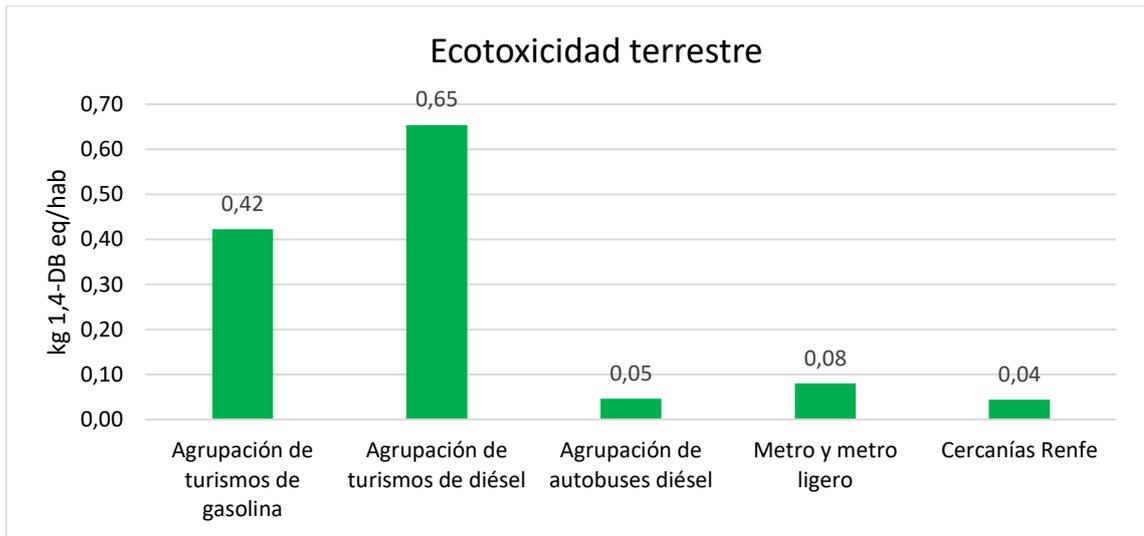


Figura 13. Comparación de Ecotoxicidad terrestre. C. de Madrid 2016

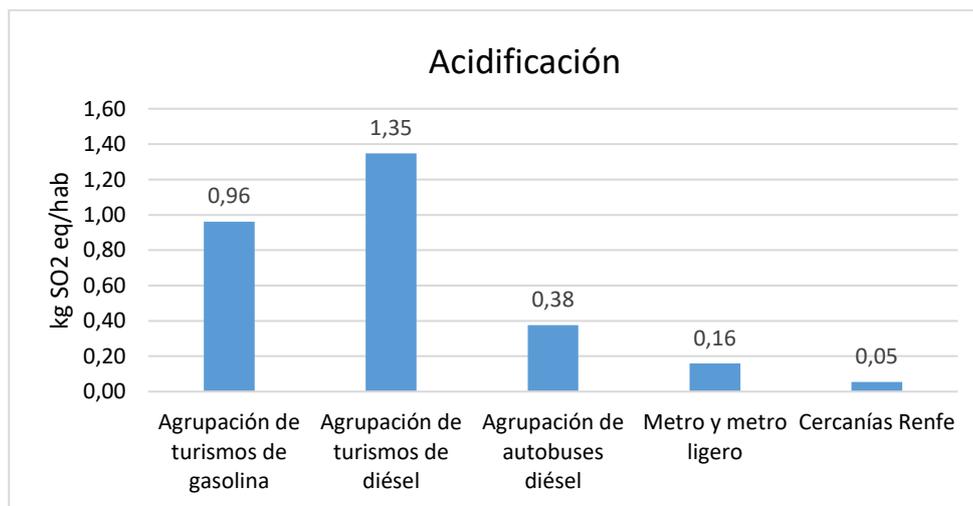


Figura 14. Comparación de Acidificación. C. de Madrid 2016

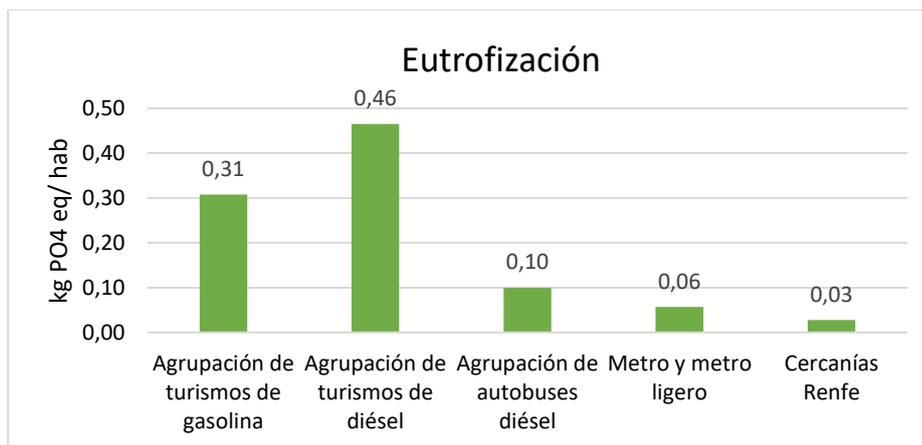


Figura 15. Comparación de Eutrofización. C. de Madrid 2016

De los datos expuestos en las gráficas anteriores, respecto al vehículo privado, los resultados muestran cómo el impacto de estos vehículos representa el 80% de los impactos totales producidos por el transporte de pasajeros en la Comunidad de Madrid, siendo en especial el conjunto de turismos diésel el que, debido a su gran utilización (el uso de la agrupación de turismos de este tipo suma 2.110,9 pkm/hab) y a las grandes emisiones que provoca este vehículo por unidad, los que mayores emisiones producen con diferencia. Es así, que los turismos diésel representan un impacto del 49% del potencial de calentamiento global y una media de 52% de las otras categorías de impacto.

La gran utilización de los turismos, un 65% según el reparto modal utilizado para el análisis, unido a una ocupación bastante baja, provoca gran cantidad de emisiones contaminantes en comparación con el resto de transportes. Sin embargo, el impacto de las motocicletas es casi despreciable, pues las motocicletas representan un 0,7% en el reparto modal establecido con los datos de pkm utilizados para el análisis. El único impacto en el que se aprecia su influencia es en la oxidación fotoquímica ya que las motocicletas de gasolina aportan un impacto semejante al producido por los turismos. Esto se debe a que estos vehículos, al tener motores menos potentes, deben de producir un mayor número de combustiones para alcanzar similares prestaciones, lo que les hace generar mayor número de emisiones NO<sub>2</sub>.

En cuanto al transporte público, éste representa según los datos recogidos un total del 35% del reparto modal del transporte elegido por los habitantes de la Comunidad de Madrid, mientras que BiciMad representa un 0,024%. La utilización del autobús y el metro en pkm/habitante se asemeja a la utilización de los turismos diésel Euro 3, 4 y 5, sin embargo, comparando sus emisiones, se puede ver en los resultados generales cómo los turismos tienen mayor impacto ambiental que los transportes públicos. Como se mencionó anteriormente, los transportes públicos tienen, por unidad de vehículo, mayores emisiones en g/km que los turismos, sin embargo, al tener en cuenta su ocupación las emisiones en g/pkm disminuyen drásticamente. Considerando

las emisiones que producen los autobuses de motorización diésel, aunque podría ser el apostar por utilizar este tipo de transporte público una buena opción para reducir la emisiones de efecto invernadero, la reducción sería mayor si se optara por vehículos eléctricos, aunque la mejor opción es claramente el metro, con la lógica limitación que su existencia implica por estar condicionada y vinculada su implantación a zonas de gran concentración de personas por la gran inversión que este medio de transporte exige.

La realidad de que los turismos sean la categoría del transporte de viajeros que mayor impacto produce en la Comunidad de Madrid es un fiel reflejo de lo que ocurre en muchas otras ciudades en las que el transporte cotidiano está basado en el vehículo privado. Esto provoca, no sólo situaciones como la observada de la contaminación medioambiental, sino problemas de congestión en las ciudades y, a su vez, problemas de contaminación acústica y accidentes de tráfico pues el automóvil es el medio de transporte que presenta mayores tasas de accidentalidad.

En Madrid se está tratando de disminuir la contaminación, como anteriormente en este proyecto se ha comentado, con el protocolo de contaminación, el uso de etiquetas ambientales y la restricción de la circulación por Madrid Central. Con estas medidas se pretende reducir el uso del vehículo privado de combustión, fomentando el vehículo eléctrico, el transporte público y el uso de la bicicleta. Otras ciudades de Europa como Friburgo, Ámsterdam y Oslo han implantado medidas similares debido al estado de la calidad del aire en sus ciudades y han conseguido cambios en el reparto modal, favoreciendo la reducción de emisiones y es que, observando los resultados de impacto de los turismos, la implantación de estas medidas reduciría en gran medida las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Si se focaliza la comparación de los resultados generales en los vehículos eléctricos, habría que resaltar que, pese a que estos vehículos destacaban negativamente en algunos impactos (g/km) debido al elevado uso que presentaban de recursos no renovables, comparado su impacto, en conjunto, en el estado actual, con el del resto de vehículos, éste es casi inapreciable debido al bajísimo número de unidades existentes y, por consiguiente, bajísima influencia de utilización comparada con el total manejado. Pero hay que tener en cuenta que, si se aumentara el uso del vehículo eléctrico, pese a conseguirse una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se produciría un mayor impacto en el agotamiento de recursos y en la toxicidad del medio, tal y como se comentó en el capítulo de Análisis de impacto, debido a los materiales que estos vehículos utilizan.

Consciente de la importancia del problema del transporte, Siemens ha desarrollado la *City Performance Tool* para el Ayuntamiento de Madrid (Siemens, 2017) en la que ha comparado las emisiones de esta ciudad con las que se dan en el transporte en otras ciudades del mundo, concluyendo este estudio que el transporte en la capital española, tanto público como privado, supone un porcentaje muy alto de emisiones de carbono, proponiendo medidas para reducir las

emisiones. Los resultados publicados resaltan que las emisiones generadas en Madrid se deben en un 41% al transporte, mientras que en otras ciudades las emisiones procedentes del transporte son de un 32% en Helsinki, un 21% en Copenhague y un 24% en Aarhus.

Pese a esta realidad de nivel de emisiones contaminantes, donde destacan las de los vehículos privados dentro de las totales del sector transporte, las políticas implementadas hasta ahora no han hecho sino favorecer el uso del vehículo privado, aun siendo conscientes de la estrecha relación existente entre la contaminación generada por el sector transporte y el cambio climático, como se refleja en las figuras anteriormente mencionadas. Se ha intentado abordar, eso sí, el problema fomentando políticas centradas en la innovación y en la mejora de la eficiencia de los vehículos, pero sería preferible afrontar y fomentar un cambio modal que implique la apuesta clara por el sector del transporte público. Por ello, a no ser que se cambie, de una manera significativa, la fuente de energía de los vehículos privados, o se logre el cambio hacia un uso generalizado del transporte público, tal y como se ha demostrado con las figuras anteriores, se prevé que las emisiones del transporte seguirán creciendo ya que la necesidad de éste va a ir en aumento.

#### 5.1.2 Resultados de los turismos

En la Figura 16, se aprecia cómo los turismos de gasolina de primeras normas Euro que tenían mayores emisiones, unidos a que continúa habiendo mayores unidades de este tipo de vehículos, son causantes de grandes emisiones debido a que producen unas emisiones totales mayores que las del conjunto de los nuevos vehículos de gasolina, normas 5 y 6. El hecho de que los turismos de diésel más utilizados sean los Euro 3 y Euro 4, y a que éstos tengan un alto índice de emisiones contaminantes, conlleva que éstos sean los que más impacto provocan entre los turismos de la Comunidad de Madrid. Por ejemplo, en el caso del impacto del calentamiento global, los turismos diésel Euro 3 y 4 suman un 32% del impacto de calentamiento global producido por los turismos.

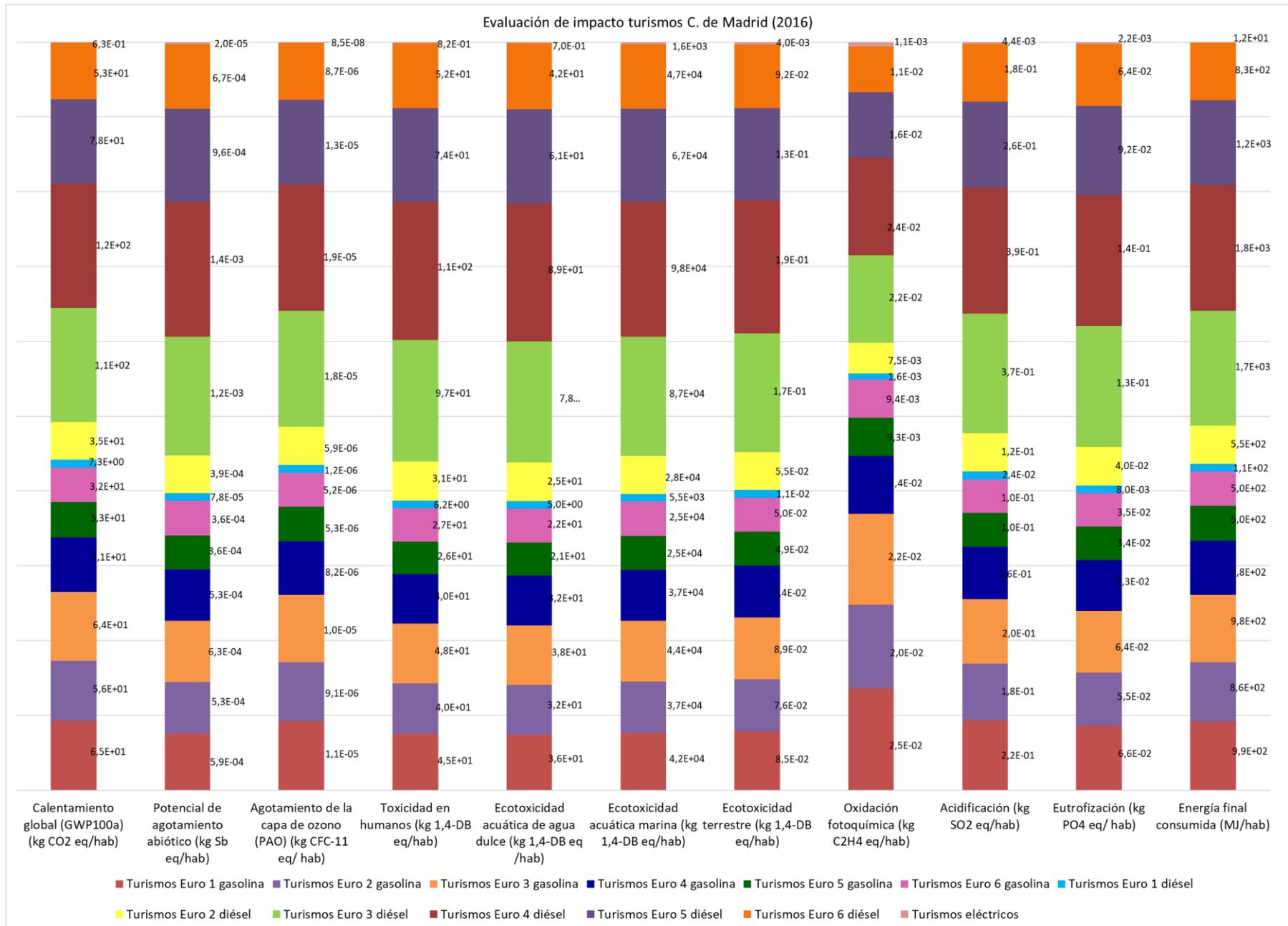


Figura 16. Impacto de los turismos en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016

### 5.1.3 Resultados de las motocicletas

En referencia a la Figura 17, si se compara el impacto de las motocicletas de gasolina y de las eléctricas, se aprecia cómo la preferencia actual por la motocicleta de gasolina en la Comunidad de Madrid provoca que ésta sea la causante de mayores impactos ambientales frente a la motocicleta eléctrica. Sin embargo, a pesar del poco uso que se les da a las motocicletas eléctricas comparándolas con las de gasolina, los materiales de las baterías eléctricas, al igual que ocurría con los turismos eléctricos, son de origen no renovable y tienen un gran impacto en la ecotoxicidad del medio y agotamiento de los recursos.

Si se avanzara en la investigación de las baterías para que éstas no tuvieran tanto impacto sobre el medio, las motocicletas eléctricas serían una opción de transporte que podría ayudar al compromiso de reducción de emisiones contaminantes. De hecho, a fecha de 2019, existen seis empresas (COUP, eCooltra, ACCIONA, Movo, Muving e Ioscoot) que ya han visto una oportunidad de negocio con este medio de transporte y ofrecen a la población de la ciudad de Madrid un servicio significativo de posibilidades de alquiler de motocicletas eléctricas.

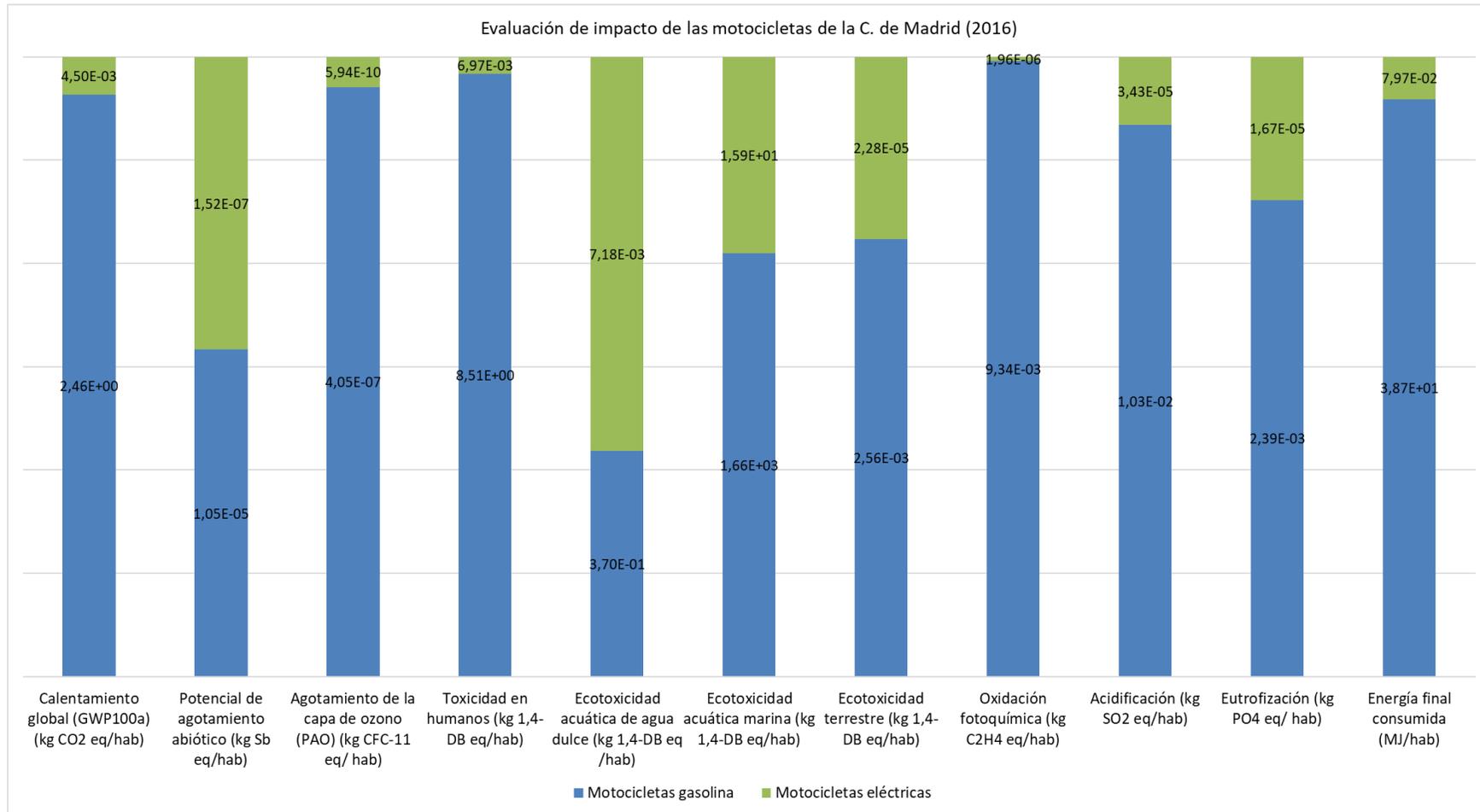


Figura 17. Impacto de las motocicletas en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016 (gráfica elaborada sobre el 100% para cada categoría de impacto).

#### 5.1.4 Resultados del transporte público

Fijando la atención en el transporte público, en la Figura 18, se puede ver cómo los transportes propulsados por motores diésel tienen un mayor impacto en el calentamiento global debido a sus emisiones de CO<sub>2</sub>, los autobuses representan el 63% del impacto del calentamiento global de los transportes públicos, mientras que el metro representa un 27% y el cercanías un 11%. Sin embargo, en los otros indicadores, resalta el impacto del metro tanto por el alto uso que hace de la electricidad durante su operación debido a que la electricidad, según el mix energético de España, proviene mayoritariamente de recursos no renovables, como por el impacto derivado de los materiales de los que están fabricados estos trenes.

En lo referente a las bicicletas eléctricas, al ser tan baja su utilización, su impacto resulta despreciable en comparación con el resto de transportes, aunque, al igual que ocurre en el resto de medios de transporte eléctrico, si se aumentara su uso, el mayor impacto de estas bicicletas sería el originado por los materiales necesarios para la fabricación de las baterías, que provienen de recursos agotables.

Si se cambiara el mix energético hacia la utilización de fuentes renovables y se apostara por transportes públicos eléctricos o de otras energías, como el caso de gas natural o hidrógeno, se podría reducir, en gran medida, las emisiones producidas por el uso del transporte público

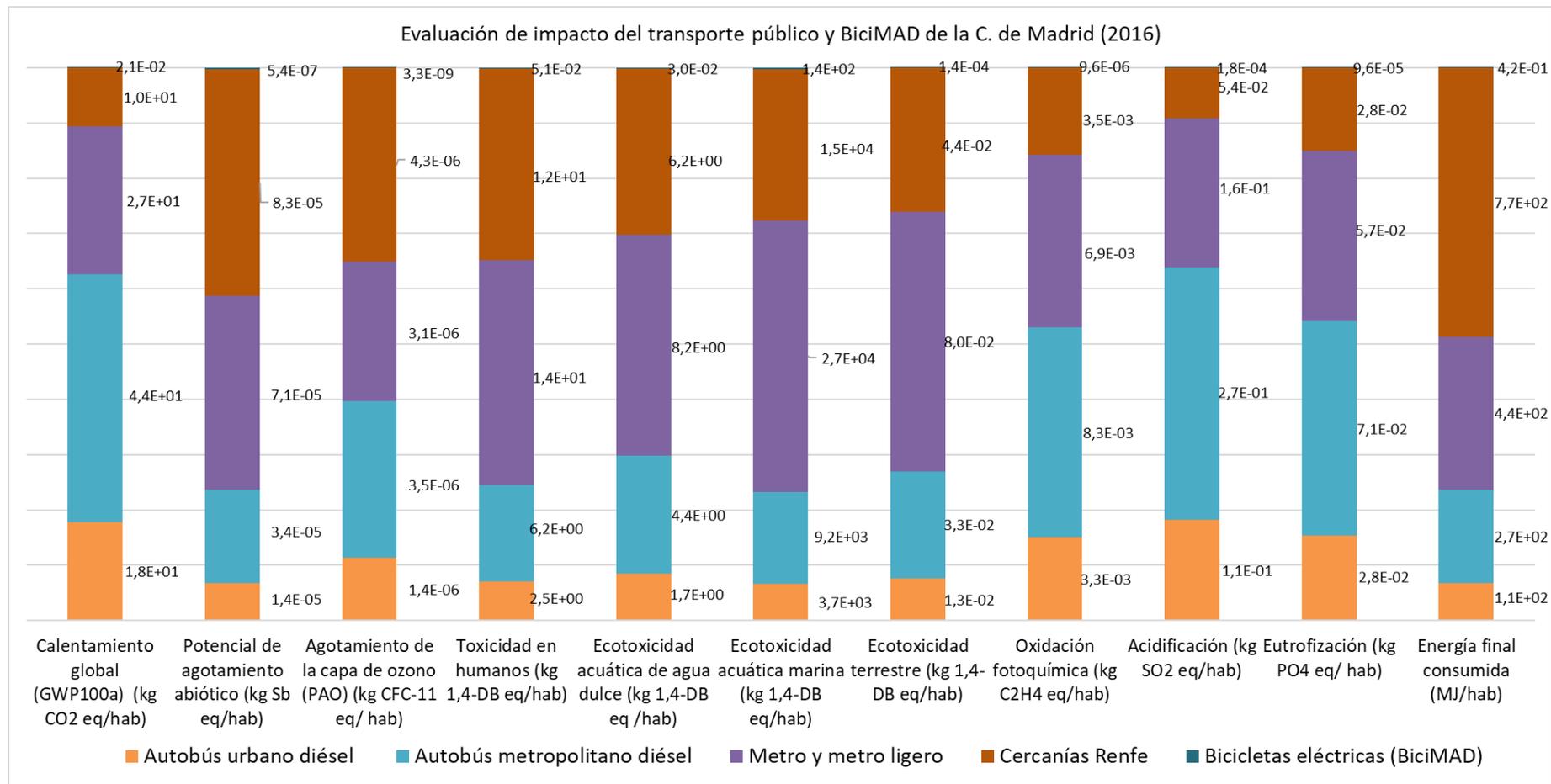


Figura 18. Impacto del transporte público y BiciMAD en el caso actual de la C. de Madrid en el año 2016

## 5.2 Análisis de la demanda de transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid, año 2030

### 5.2.1 Resultados generales

Tras haber analizado los resultados del transportes de viajeros del escenario del año 2016 para la Comunidad de Madrid, se muestran a continuación los resultados de emisiones (kg/habitantes) (Tabla 20) y energía consumida (MJ/habitantes) (Tabla 21) del ACV realizado con el software SimaPro para la misma comunidad en el escenario futuro propuesto, explicado anteriormente, del año 2030.

Tabla 20. Resultados de emisiones (kg/hab) producidas por todo el ciclo de vida para los distintos transportes de la C. de Madrid año 2030

Categoría de impacto:	<i>Calentamiento global (GWP100a)</i>	<i>Potencial de agotamiento abiótico</i>	<i>Agotamiento de la capa de ozono (PAO)</i>	<i>Toxicidad en humanos</i>	<i>Ecotoxicidad acuática de agua dulce</i>	<i>Ecotoxicidad acuática marina</i>	<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	<i>Oxidación fotoquímica</i>	<i>Acidificación</i>	<i>Eutrofización</i>
Unidad:	kg CO2 eq/hab	kg Sb eq/hab	kg CFC-11 eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg 1,4-DB eq/hab	kg C2H4 eq/hab	kg SO2 eq/hab	kg PO4 eq/hab
<b>Turismo EURO 4 gasolina</b>	2,3E+01	2,4E-04	3,7E-06	1,8E+01	1,4E+01	1,6E+04	3,3E-02	6,4E-03	7,2E-02	2,3E-02
<b>Turismo EURO 5 gasolina</b>	2,6E+01	2,8E-04	4,2E-06	2,1E+01	1,7E+01	2,0E+04	3,9E-02	7,5E-03	8,4E-02	2,8E-02
<b>Turismo EURO 6 gasolina</b>	4,9E+01	5,5E-04	7,8E-06	4,0E+01	3,3E+01	3,8E+04	7,5E-02	1,4E-02	1,6E-01	5,3E-02
<b>Turismo EURO 4 diésel</b>	4,2E+01	5,0E-04	6,9E-06	3,9E+01	3,2E+01	3,5E+04	6,9E-02	8,5E-03	1,4E-01	4,8E-02
<b>Turismo EURO 5 diésel</b>	5,9E+01	7,3E-04	9,8E-06	5,6E+01	4,6E+01	5,1E+04	1,0E-01	1,2E-02	2,0E-01	7,0E-02
<b>Turismo EURO 6 diésel</b>	7,5E+01	9,6E-04	1,2E-05	7,4E+01	6,1E+01	6,7E+04	1,3E-01	1,6E-02	2,6E-01	9,1E-02
<b>Turismo eléctrico</b>	1,3E+02	4,1E-03	1,7E-05	1,7E+02	1,4E+02	3,2E+05	8,1E-01	2,3E-01	9,0E-01	4,5E-01
<b>Turismo gas natural</b>	8,9E-01	1,1E-05	1,3E-07	7,4E-01	6,9E-01	8,0E+02	1,5E-03	2,4E-04	2,7E-03	1,0E-03
<b>Motocicletas Madrid gasolina</b>	1,6E+00	4,1E-06	2,6E-07	3,3E+00	1,6E-01	6,9E+02	1,2E-03	6,4E-03	5,4E-03	1,1E-03
<b>Motocicletas Madrid eléctricas</b>	7,5E-01	2,1E-05	7,3E-08	1,0E+00	1,0E+00	2,4E+03	3,3E-03	3,1E-04	5,8E-03	2,6E-03
<b>Autobús urbano diésel</b>	2,2E+01	1,7E-05	1,7E-06	3,1E+00	2,2E+00	4,5E+03	1,6E-02	4,1E-03	1,3E-01	3,5E-02
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	5,6E+01	4,3E-05	4,4E-06	7,8E+00	5,5E+00	1,2E+04	4,1E-02	1,0E-02	3,4E-01	9,0E-02
<b>Autobús urbano gas natural</b>	2,4E+00	1,6E-05	3,3E-07	1,1E+00	1,0E+00	1,3E+03	2,6E-03	4,1E-04	6,4E-03	1,7E-03
<b>Autobús urbano eléctrico</b>	1,2E+01	2,1E-04	1,6E-06	9,7E+00	9,6E+00	2,2E+04	7,8E-02	7,0E-03	7,6E-02	3,5E-02
<b>Metro y metro ligero</b>	4,5E+01	1,2E-04	5,1E-06	2,4E+01	1,4E+01	4,6E+04	1,3E-01	1,2E-02	2,7E-01	9,5E-02
<b>Cercanías Renfe</b>	1,8E+01	1,4E-04	7,4E-06	2,1E+01	1,1E+01	2,6E+04	7,7E-02	6,0E-03	9,4E-02	4,8E-02
<b>Bicicletas eléctricas (Bicimad)</b>	6,6E-02	1,7E-06	1,0E-08	1,6E-01	9,2E-02	4,2E+02	4,4E-04	3,0E-05	5,8E-04	3,0E-04
<b>Total:</b>	5,6E+02	7,9E-03	8,3E-05	4,9E+02	3,9E+02	6,6E+05	1,6E+00	3,4E-01	2,7E+00	1,1E+00

Tabla 21. Energía consumida (MJ/hab) caso futuro C. de Madrid 2030

Demanda Acumulada de Energía	Fuentes no renovables				Fuentes renovables				Total de Energía
	Combustibles fósiles	Nuclear	Biomasa	Total F. no renovables	Biomasa	Eólica, solar y geotérmica	Hidráulica	Total F. renovables	
Unidad:	MJ/ hab	MJ/ hab	MJ/ hab	MJ/hab	MJ/ hab	MJ/ hab	MJ/ hab	MJ/hab	MJ/ hab
<b>Turismos Euro 4 gasolina</b>	3,3E+02	1,1E+01	1,1E-02	3,4E+02	3,1E+00	5,9E-01	3,7E+00	4,3E+00	3,5E+02
<b>Turismos Euro 5 gasolina</b>	3,8E+02	1,3E+01	1,3E-02	3,9E+02	3,6E+00	7,0E-01	4,4E+00	5,1E+00	4,0E+02
<b>Turismos Euro 6 gasolina</b>	7,1E+02	2,5E+01	2,4E-02	7,3E+02	7,0E+00	1,3E+00	8,4E+00	9,7E+00	7,5E+02
<b>Turismos Euro 4 diésel</b>	6,1E+02	2,1E+01	2,4E-02	6,3E+02	6,3E+00	1,1E+00	7,5E+00	8,7E+00	6,5E+02
<b>Turismos Euro 5 diésel</b>	8,7E+02	3,1E+01	3,4E-02	9,0E+02	9,1E+00	1,6E+00	1,1E+01	1,3E+01	9,3E+02
<b>Turismos Euro 6 diésel</b>	1,1E+03	4,1E+01	4,5E-02	1,1E+03	1,2E+01	2,2E+00	1,4E+01	1,6E+01	1,2E+03
<b>Turismos eléctricos</b>	1,8E+03	4,8E+02	1,2E-01	2,3E+03	4,2E+01	8,0E+01	8,7E+01	1,7E+02	2,5E+03
<b>Turismo gas natural</b>	1,5E+01	5,5E-01	4,9E-04	1,5E+01	1,4E-01	2,6E-02	2,0E-01	2,3E-01	1,6E+01
<b>Motocicletas gasolina</b>	2,3E+01	3,6E-01	5,7E-04	2,3E+01	9,3E-02	1,7E-02	1,5E-01	1,7E-01	2,4E+01
<b>Motocicletas eléctricas</b>	9,5E+00	1,4E+00	9,8E-04	1,1E+01	2,5E-01	8,9E-02	5,7E-01	6,6E-01	1,2E+01
<b>Autobús urbano diésel</b>	1,2E+02	5,0E+00	4,9E-03	1,3E+02	1,4E+00	3,2E-01	1,8E+00	2,1E+00	1,3E+02
<b>Autobús metropolitano diésel</b>	3,2E+02	1,3E+01	1,3E-02	3,3E+02	3,7E+00	8,1E-01	4,6E+00	5,4E+00	3,4E+02
<b>Autobús urbano gas natural</b>	3,7E+01	8,6E-01	7,9E-04	3,8E+01	2,2E-01	5,1E-02	3,8E-01	4,3E-01	3,8E+01
<b>Autobús urbano eléctrico</b>	1,6E+02	5,3E+01	1,0E-02	2,1E+02	3,4E+00	9,6E+00	8,0E+00	1,8E+01	2,3E+02
<b>Metro y metro ligero</b>	5,5E+02	1,3E+02	3,7E-02	6,8E+02	1,1E+01	1,9E+01	2,5E+01	4,4E+01	7,3E+02
<b>Cercanías Renfe</b>	1,1E+03	2,8E+02	6,9E-02	1,3E+03	2,5E+01	4,8E+01	5,2E+01	1,3E+02	1,5E+03
<b>Bicicletas eléctricas (BiciMAD)</b>	8,1E-01	3,6E-01	1,2E-04	1,2E+00	2,9E-02	5,9E-03	1,1E-01	1,2E-01	1,3E+00
<b>Total</b>	8,1E+03	1,1E+03	4,1E-01	9,2E+03	1,3E+02	1,7E+02	2,3E+02	4,2E+02	9,7E+03

En la Tabla 20 se muestra el impacto del transporte futuro de la Comunidad de Madrid. Si se compara con la Tabla 18, el resultado de impacto de calentamiento global ha disminuido de 799,38 kg de CO<sub>2</sub> eq/hab en 2016 a 560,75 kg de CO<sub>2</sub> eq/hab en 2030, suponiendo una reducción de casi el 30%. Otros impactos a resaltar es el de agotamiento de la capa de ozono que disminuye un 34,5%, la toxicidad en humanos un 23,8% y la ecotoxicidad acuática de agua dulce un 20%. Sin embargo, se debe resaltar el aumento de la oxidación fotoquímica en un 58%, entre otros que aumentan, pero en menor medida. Posteriormente, se realizarán estas comparaciones en mayor profundidad.

En la Tabla 21 de consumo de energía es de destacar que el transporte en la Comunidad de Madrid en el 2030 tendría un valor de 9.698,09 MJ/hab, lo que equivaldría a un total de 72.088,19

TJ, si se considera la población estimada para 2030 por el INE (2018) de 7.433.229 habitantes. Ello supondría una reducción del 14% de consumo de energía con respecto al escenario del 2016 que tenía un valor de 84.070,94 TJ, considerando la población de 6.466.996 habitantes (INE. Instituto Nacional de Estadística, 2016).

A continuación se muestra, en la Figura 19, los resultados de los impactos del transporte esperados para el escenario del 2030 en la Comunidad de Madrid detallados por las diferentes tipologías de transporte.

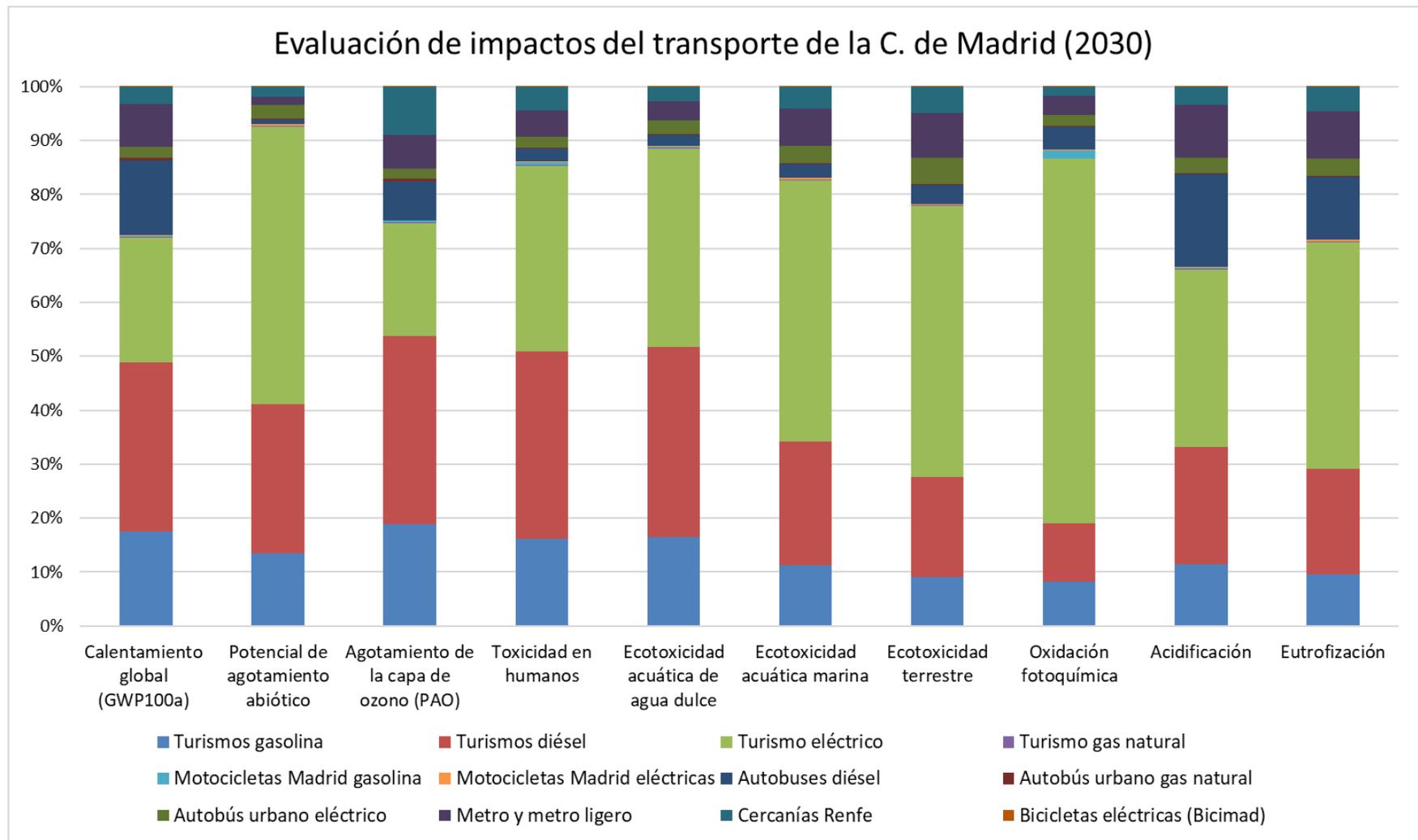


Figura 19. Evaluación del impacto del transporte en la Comunidad de Madrid en el año 2030

Como se puede observar en la Figura 19, el efecto conjunto del avance esperado y apuesta clara por los turismos de otras energías alternativas menos contaminantes, como es el caso de los turismos eléctricos y de gas natural, junto con el fomento del uso del transporte público, posibilitará la reducción de gran parte de las emisiones procedentes del sector de vehículos privados que se daban en la C. de Madrid en el año 2016. De hecho, la reducción total de emisiones de CO<sub>2</sub> referente a la que producían los turismos en 2016 es de un 42% ya que estas emisiones en 2016 sumaban 698,23 kg CO<sub>2</sub> eq/hab y en 2030 pasan a un valor de 404,31 kg CO<sub>2</sub> eq/hab. Sin embargo, y debido precisamente a la mayor utilización de los vehículos eléctricos, al origen de los materiales que los conforman y a la procedencia de la electricidad que consumen, el resto de impactos se ven gravemente afectados.

Con el objeto de presentar un análisis comparativo del escenario futuro respecto al actual, para poder, de esta manera, determinar el resultado y eficacia de las medidas adoptadas sobre el impacto del transporte sobre el calentamiento global en el escenario propuesto, se presentan, a continuación, las distintas figuras donde se analiza dicho impacto en cada tipo de transporte.

## 5.3 Comparación de impactos entre los escenarios de 2016 y 2030

### 5.3.1 Resultados de Calentamiento global

#### 5.3.1.1 Resultados de Calentamiento global de los turismos

En la Figura 20 se aprecia cómo el motivo principal de la reducción de emisiones referentes al calentamiento global en el sector turismos, reducción del 42%, procede de la desaparición en este escenario futuro del 2030 de los turismos pertenecientes a las normas Euro 1, 2 y 3 de gasolina y diésel, pues, en 2016, estos vehículos eran los que aportaban gran parte de las emisiones. Los vehículos de normas Euro 1, 2 y 3 de gasolina representaban el 26% y los de diésel el 21% del total de impacto de calentamiento global de los turismos.

De igual manera influye en el mejor resultado mostrado en el 2030 el que la sustitución de los vehículos anteriormente mencionados se hará, principalmente, por vehículos eléctricos o de gas natural, que producen menos emisiones. El impacto de los turismos eléctricos supone el 32% del impacto del calentamiento global de 2030, frente a la suma del 47% que representaban los turismos de normas Euro 1, 2 y 3 en el del 2016. Otro factor que incide en la misma línea es que se ha estimado que, aunque hasta el momento en que se afiancen y generalicen estas nuevas tecnologías aumentará el uso de turismos diésel y gasolina, estos serán de normas Euro 5 y 6 que producen menos emisiones, colaborando así a que el total de turismos produzca menos emisiones que en el pasado.

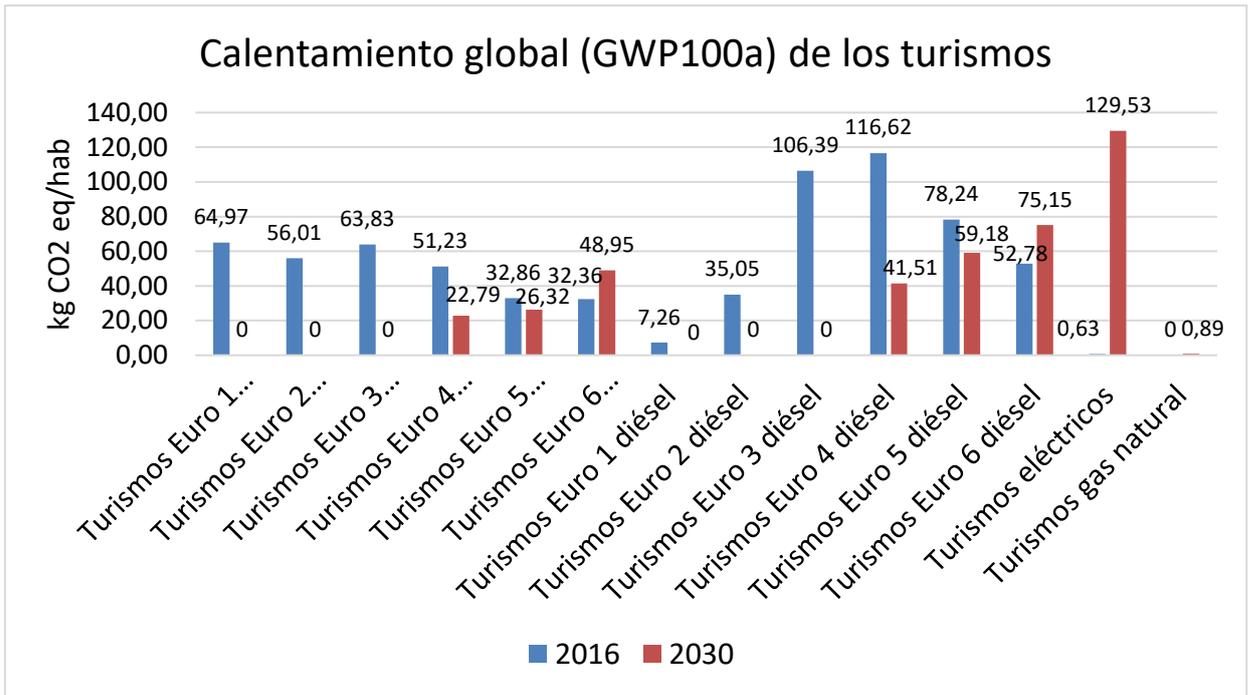


Figura 20. Análisis comparativo del Calentamiento global de los turismos en la C. de Madrid 2016 y 2030.

#### 5.3.1.2 Resultados de Calentamiento global de las motocicletas

En cuanto a las motocicletas, en la Figura 21 se observa cómo la evolución hacia el uso de las motocicletas eléctricas beneficiará la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. El total de emisiones referentes al impacto ambiental de calentamiento global que produce el transporte en motocicleta se verán reducidas en un 6%.

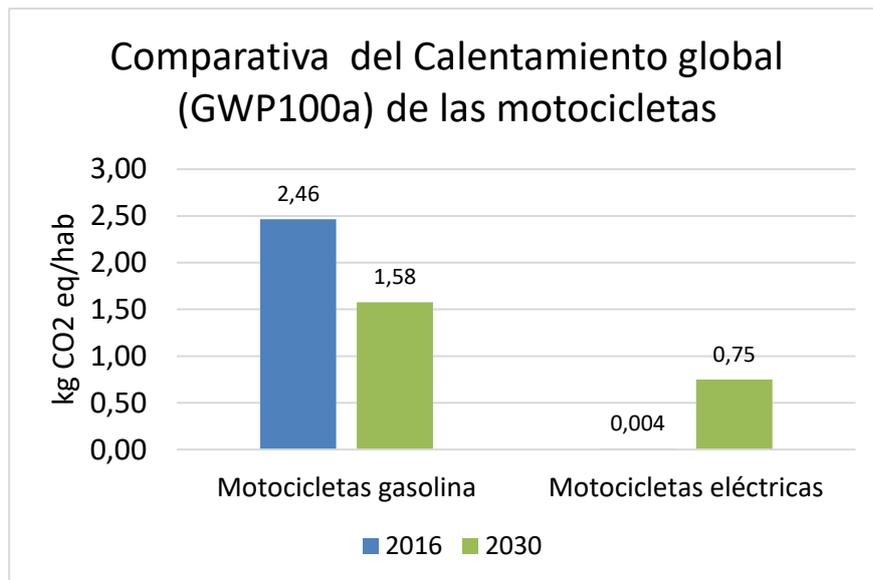


Figura 21. Análisis comparativo del Calentamiento global de las motocicletas en la C. de Madrid en 2016 y 2030.

### 5.3.1.3 Resultados de Calentamiento global del transporte público

Como consecuencia de las restricciones de utilización del vehículo privado en la ciudad y, por consiguiente, el fomento y mayor uso del transporte público, que se ha estimado según los datos de entrada propuestos que aumentará en un 86% para el año 2030, las emisiones de este sector comprensiblemente aumentan en comparación con las del escenario del 2016 (Figura 22).

Este porcentaje de aumento se prevé que, hasta que no se apueste firmemente por otras tecnologías, será el resultado de:

- Un crecimiento del parque de autobuses diésel de última tecnología, pero con una tendencia imparable hacia el uso de autobuses de tecnología eléctrica y de gas natural.
- Un aumento del uso del metro en Madrid y de los trenes de cercanías.

Este aumento de uso, motivado tanto por las razones anteriormente expuestas como por la tendencia a establecer la residencia en las afueras de la ciudad, implica un aumento de los km recorridos por los vehículos y, en consecuencia, un aumento de emisiones que se estiman que sean del 56%. Es importante reseñar que la diferencia entre un aumento del 86% en el uso, pero sólo del 56 % de las emisiones se debe al menor grado de generación de emisiones que tendrá el parque del transporte público del 2030.

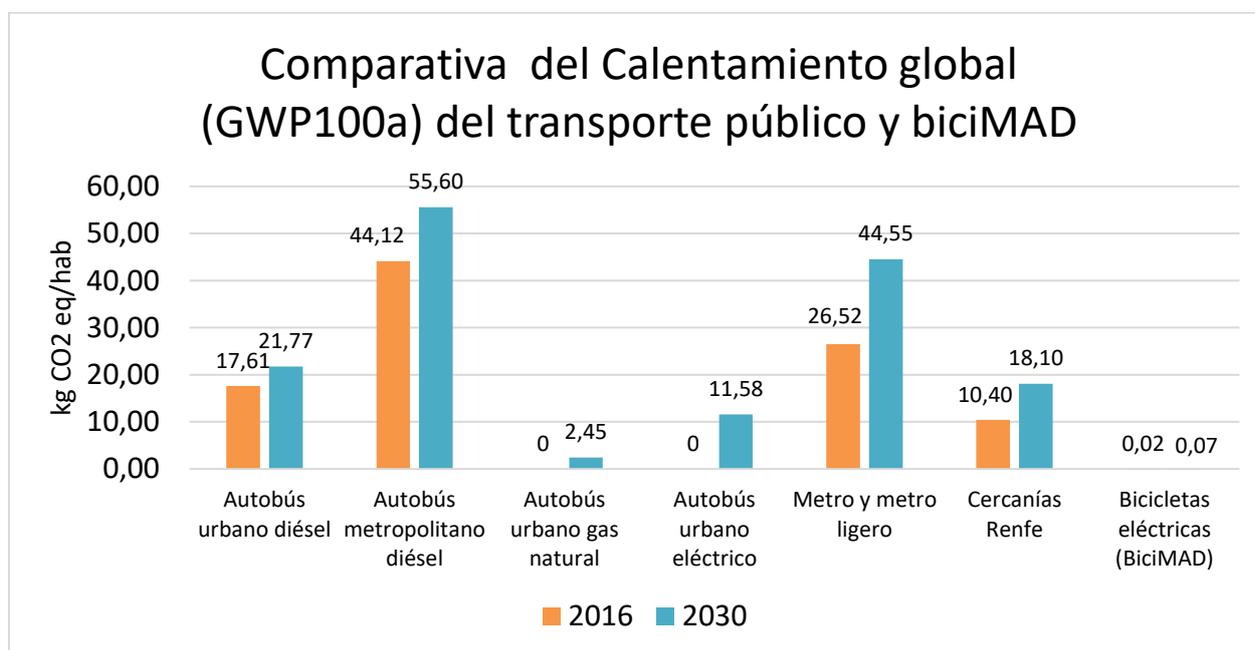


Figura 22. Análisis comparativo del Calentamiento global del transporte público y BiciMAD en la C. de Madrid en 2016 y 2030.

### 5.3.2 Resultados de otros impactos

En los apartados anteriores se ha comparado la influencia en el calentamiento global de los diferentes tipos de transportes entre los escenarios del 2016 y 2030. En las figuras que se presentan a continuación, se presenta la comparación entre dichos dos escenarios respecto al resto de indicadores.

Con respecto al impacto de “Agotamiento de la capa de ozono” indicar que no se presenta su gráfica por lo poco clarificador que resulta la visualización de la representación de los datos de este impacto ya que son, en todos los casos, cercanos a cero, pero exponer que, aun manteniéndose en estos ínfimos niveles, sí se reducen en un 34% en el año 2030 debido, principalmente, a la reducción del uso de turismos de gasolina y diésel.

El impacto del “Potencial de agotamiento abiótico” (Figura 24) y los relacionados con la toxicidad del medio ambiente representados en las Figuras 23, 25 y 26, aunque se sigue manteniendo alto, llegando incluso a superarse en algún tipo de transporte, como es el caso de los autobuses, en general este impacto se ve ligeramente reducido con respecto a los valores que presentaba en el 2016. El aumento de este impacto en algunos transportes se debe a que el cambio de tecnología hacia vehículos eléctricos, que implica mayor utilización de materiales no renovables, acompañado de su mayor uso, que implica mayor consumo de electricidad, provoca que tengan mayores impactos sobre el medio ambiente, sobre todo en el caso de los turismos.

Como se ha observado, el impacto del transporte público representa una pequeña porción de las emisiones representadas en las figuras anteriores. Este dato se justifica porque, como ya expusimos anteriormente, aunque en el año 2030 se ha supuesto que el uso del transporte público aumente en un 86%, el resultado de sus emisiones referentes a los impactos representados no se vería aumentado en ese mismo porcentaje debido a los cambios en la tecnología propulsora utilizada, así como al bajo índice de contaminación de ésta. Esto es una prueba más de que el fomento del uso del transporte público y la dotación a éste de tecnologías eficientes y no contaminantes es esencial para que el impacto del transporte sobre el ecosistema se vea reducido drásticamente.

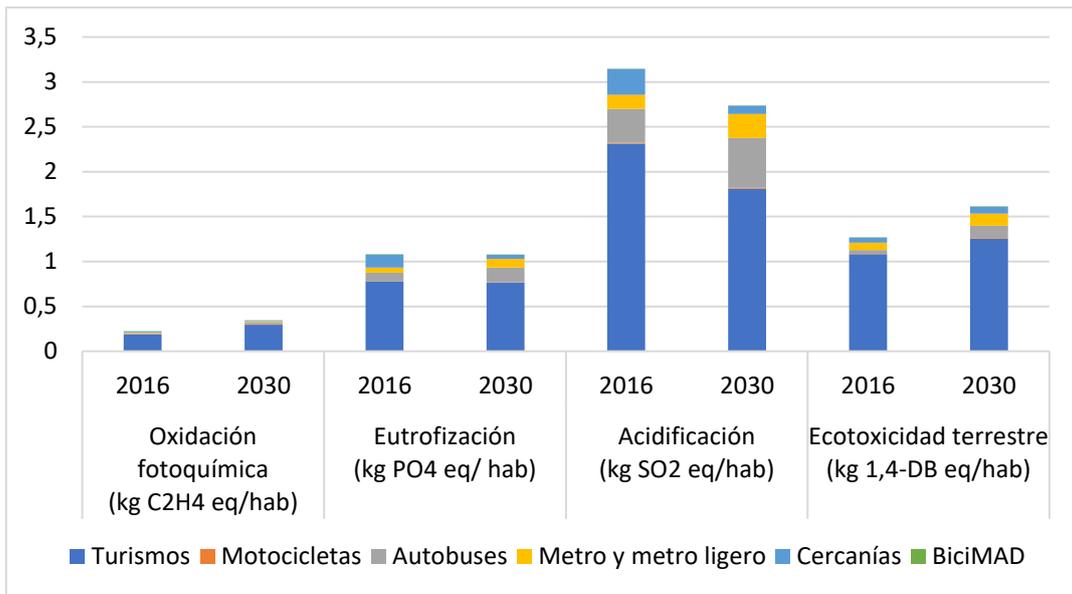


Figura 23. Comparación de la Oxidación fotoquímica, Eutrofización, Acidificación y Ecotoxicidad terrestre de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030

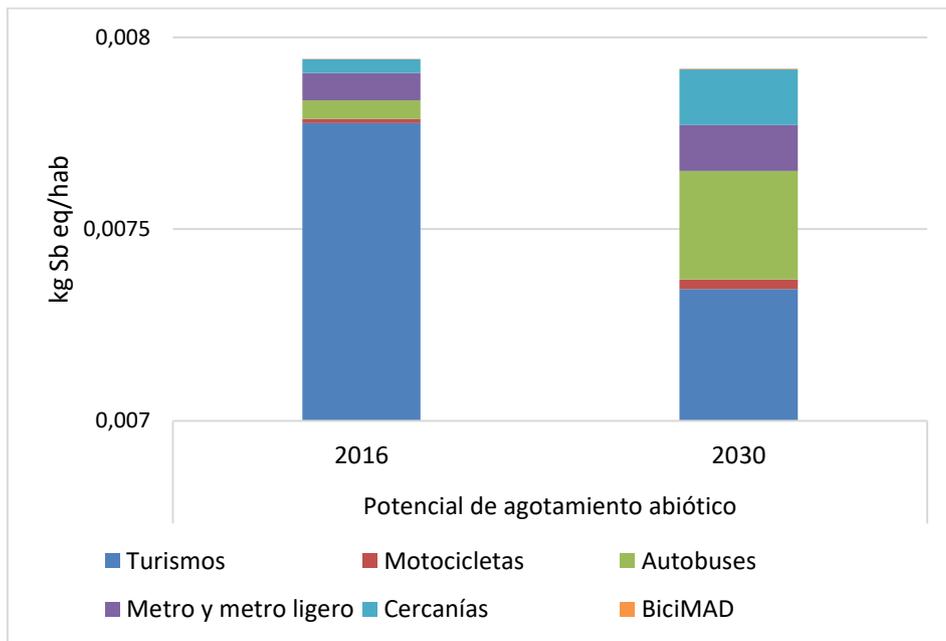


Figura 24. Comparación del Potencial de agotamiento abiótico de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.

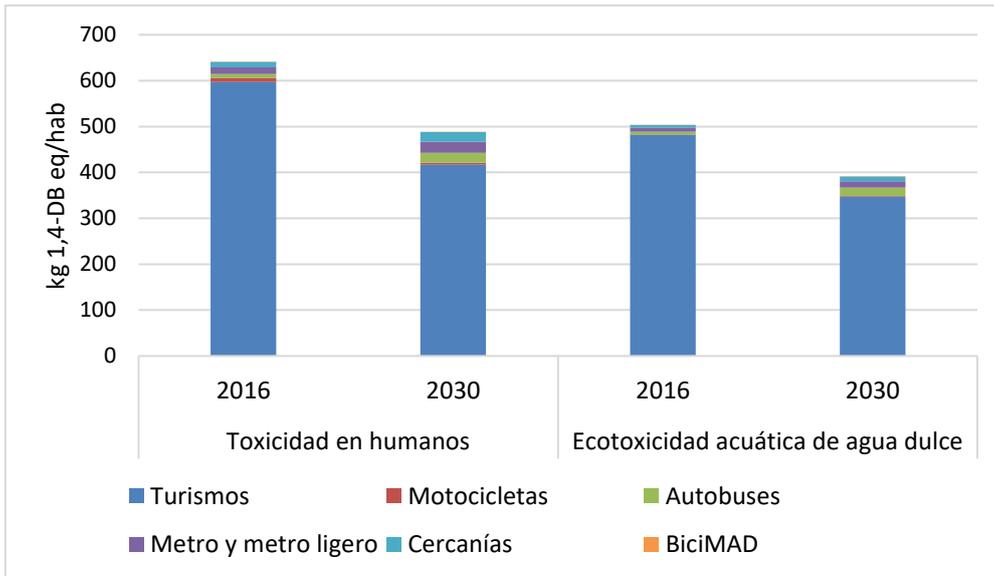


Figura 25. Comparación de la Toxicidad en humanos y Ecotoxicidad acuática de agua dulce de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030.

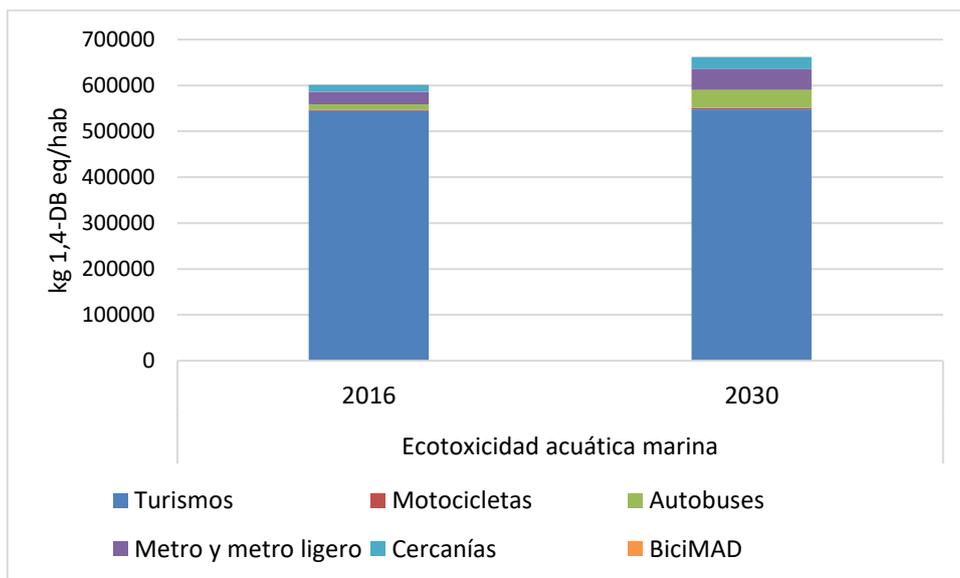


Figura 26. Comparación de la Ecotoxicidad acuática marina de los transportes de la C. de Madrid 2016 y 2030



## 6. Conclusiones

Sobre la situación del escenario 2016 se debe resaltar que, en lo referente al transporte particular de personas, el hecho de que los tipos de vehículos más usados en la Comunidad de Madrid sean los turismos con motores de gasolina (25% de personas transportadas) y diésel (39% de personas transportadas), motorizaciones que producen gran cantidad de emisiones contaminantes en su ciclo de vida (diésel: 55 %, gasolina: 35 % del total de emisiones), junto con la baja ocupación media de los vehículos (1.68 personas/vehículo), son las principales causas del gran impacto que ejerce el sector del transporte de personas sobre el medio ambiente.

Ante esta realidad, y en la búsqueda constante de reducir dicho impacto que nuestra sociedad impone, la implantación de la tecnología eléctrica en estos vehículos que en el 2016 es ínfima y marginal (representan un 0,2% sobre el total de vehículos) dado el bajo número de unidades de esta tipología existentes, puede ser considerada como una opción válida para la reducción de emisiones. Y es que tanto las motocicletas eléctricas (representando un 0,001% del impacto sobre el impacto del calentamiento global y un 0,0005% del impacto sobre la reducción de la capa de ozono) como los turismos eléctricos (representando un 0,08% del impacto sobre el impacto del calentamiento global y un 0,07% del impacto sobre la reducción de la capa de ozono), en comparación con los vehículos de combustión producen menores impactos en el calentamiento global y en la reducción de la capa de ozono (turismos gasolina: representan el 38% tanto de calentamiento global como de reducción de la capa de ozono; diésel: 50% de calentamiento global y 52% reducción de la capa de ozono), aunque, desde una perspectiva global, hay que tener en cuenta que su impacto sobre el agotamiento de recursos del medio, que supone un 0,26%, es mayor debido a los materiales de los que estos vehículos están fabricados.

En lo que atañe al transporte público de personas, pese a utilizarse en este sector vehículos que tienen grandes impactos por unidad (por ejemplo referente al calentamiento global, los autobuses diésel urbanos: 2.110,82 g CO<sub>2</sub>/km, metro: 1.578 g CO<sub>2</sub>/km y cercanías: 1.859 g CO<sub>2</sub>/km), al entrar en consideración su índice de ocupación (autobús urbano: 22 personas/vehículo, metro: 35 personas/unidad y cercanías: 111 personas/unidad), el impacto por viajero se ve muy reducido y es, lógicamente, mucho menor que el de los turismos (autobús urbano: 96 g CO<sub>2</sub>/pkm, metro: 45 g CO<sub>2</sub>/pkm y cercanías 17g CO<sub>2</sub>/pkm frente al turismo de media 210 g CO<sub>2</sub>/pkm). En el año 2016 el transporte público en la Comunidad de Madrid produjo sólo el 14% de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por los turismos pese a haber transportado un 35% de las personas desplazadas en el año 2016 en esta área. De los datos obtenidos se puede inferir que

un aumento del uso del transporte público, fruto de una concienciación de la sociedad, parece ser una de las soluciones para la reducción de emisiones.

En lo que hace referencia al impacto estimado que sobre el calentamiento global produce en el 2016 el transporte de pasajeros de la Comunidad de Madrid, éste es de 800 kg de CO<sub>2</sub> eq/habitante lo que supone 5.169,6 kton de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera por este sector.

Una vez establecido el impacto ambiental que el transporte de pasajeros supone en el 2016 en la Comunidad de Madrid y estimados los resultados para un escenario futuro del 2030 basados en la consideración de medidas y tendencias que se espera produzcan en este sector, la propuesta asume que el efecto combinado del avance en la eficiencia de las tecnologías existentes (gasolina y diésel) junto con el mayor peso que tendrán las nuevas formas de energía que se impondrán en el sector (electricidad) y el cambio de mentalidad en el uso del transporte (crecimiento relativo del transporte público) provocará en el 2030, en relación al 2016, una reducción de un 42% en las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los turismos y de un 6% en el de las motocicletas, produciéndose, por el contrario y debido a su mayor uso, un aumento del 56 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes del transporte público.

El efecto combinado de este cambio en los índices de emisiones dará como resultado un incremento de un 9% en el total de emisiones en el 2030 con respecto a las del 2016 debiéndose matizar en este dato que aunque las emisiones referentes al calentamiento global sufren grandes reducciones (una reducción total del 30%), las referentes a otros impactos ambientales no disminuyen en igual medida sino que aumentan debido al agotamiento de recursos inherente a la implantación de las nuevas tecnologías en el transporte, como el aumento del 10% en la ecotoxicidad acuática marina, el aumento del 28% en la ecotoxicidad terrestre, el del 58% en la oxidación fotoquímica y del 11% en el impacto de eutrofización. Se debe destacar también que los turismos continuarán representando el 80 % de las emisiones del sector a pesar de los cambios modales que se han tenido en cuenta.

El resultado obtenido de que la apuesta por los vehículos eléctricos producirá una reducción de las emisiones relacionadas con el calentamiento global, pero que aumentará otras emisiones debido al alto índice de impacto de su fase de producción, ya lo presentaba también Hawkins et al. (2012). En línea con su conclusión, que coincide con los resultados obtenidos en este proyecto, se debe exponer que, para la alcanzar reducciones significativas en las emisiones futuras, y si se optara por esta tecnología eléctrica, como parece así será según las políticas emprendidas por los distintos gobiernos y las previsiones de fabricación expuestas por los distintos fabricantes del sector del transporte, se debería de incidir en mejorar drásticamente los resultados de la fase de

producción con nuevos planteamientos y desarrollos de la tecnología de baterías para sean fabricadas con materiales menos contaminantes.

Otro factor que contribuirá enormemente a alcanzar los objetivos perseguidos de emisiones es el previsto cambio del mix energético hacia uno que haga uso, mayoritariamente, de fuentes renovables de electricidad (el mix energético de 2016 según REE (2017) estuvo basado en un 23% nuclear, 21% carbón, 19% eólica y 16% ciclos combinados, frente a un cambio previsto para 2030 según KPMG (2018) basado en un 28% eólica, un 20% nuclear, un 20% ciclos combinados y 14% solar) que será la base del abastecimiento de la energía necesaria para la fase de uso de estos medios de transporte y que, por tanto, influirá positivamente en sus emisiones finales totales.

En referencia a las emisiones totales, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima establecía como objetivo para España en el sector del transporte una reducción media del 35% de emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030 respecto a los datos de emisiones del 2017.

Centrándonos en la Comunidad de Madrid, en el escenario futuro del 2030 propuesto en este proyecto esta comunidad alcanzará una reducción en las emisiones por habitante de CO<sub>2</sub> originadas por el transporte de viajeros del 30% respecto a las emitidas en el 2016. Este dato contrasta con el del 20% de reducción del valor total de las emisiones propuestas de CO<sub>2</sub> procedentes del transporte de viajeros que pasan de 5.169,6 kton de CO<sub>2</sub> en el 2016 a las 4.168,20 kton de CO<sub>2</sub> en el 2030. Este cambio de valor del 30% de reducción en las emisiones por habitante al del 20% de reducción cuando se analizan los valores totales tiene su origen en el previsto aumento de la población en la Comunidad de Madrid durante este periodo.

Con objeto de poder comparar los resultados obtenidos en este estudio con el objetivo de reducción que presenta el PLAN Nacional Integrado de Energía y Clima PNIEC se han de trasladar los resultados del escenario del 2016 al año 2017. Para ello se recogen las emisiones de CO<sub>2</sub> del total del transporte de la Comunidad de Madrid que en el 2016 representaron 9.099,77 kton, y el valor del año 2017 que fueron 9.876,05 kton según la Comunidad de Madrid (2018), lo que supuso un 8% de incremento de un año respecto al otro. Igualmente se toma en consideración que el transporte de viajeros por carretera representa un 48% del transporte total en la Comunidad de Madrid (Ministerio de Fomento, 2017). De estos datos se desprende que las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte por pasajeros en el escenario del 2030 supondrán una reducción del 25% respecto a los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> del 2017 del estudio de este proyecto. Este resultado, por tanto, plantea que con las medidas propuestas por el PNIEC y con las presunciones presentadas en el escenario futuro analizado, el transporte de viajeros en la Comunidad de Madrid no superaría el

objetivo de media de reducción del 35% las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030, aunque se aproximaría bastante.

Finalmente como limitaciones de este proyecto, habría que añadir que los resultados que en él aparecen se acercaría más a la realidad y serían aún más favorables si se considerara un posible cambio en el mix energético ya que se espera que en el 2030 estará compuesto, en gran medida, y como se mencionó con anterioridad, por recursos renovables que provocarían una gran reducción en el resultado de emisiones en todos los impactos medioambientales.

Otros factores a tener en cuenta serían las presunciones relacionadas con el desarrollo futuro de la eficiencia de los vehículos y el desarrollo de nuevas baterías y tecnologías como las pilas de combustible, que no se han tenido en cuenta en el escenario propuesto y que también contribuirían a una mayor reducción de las emisiones. Igualmente, también se debe mencionar que en este proyecto se trata del análisis del impacto ambiental del ciclo de vida de un área específica, como es la Comunidad de Madrid, lo cual implica las limitaciones de análisis de las características de esta comunidad y el contexto que la rodea.

Otras limitaciones que se deben tener en cuenta en lo referente a este proyecto son la posible evolución en las presunciones de ocupación de los vehículos, tipos de vehículos, tecnología y medidas de futuro que se han tenido en cuenta tanto en el escenario del año 2016 como en el escenario de 2030.

La influencia combinada de todas estas limitaciones pudiera provocar que los resultados obtenidos no pudieran ser trasladables a otros contextos o proyectos.

Como oportunidades futuras de mejora de este proyecto o proyectos similares se podrían incorporar al estudio otro tipo de tecnologías de vehículos, incipientes en la actualidad, que no se han tenido aquí en cuenta, así como tomar en consideración el mix energético futuro.

Igualmente habría que dejar abierta la posibilidad a que, pese a la profundidad y rigor del tratamiento dado al escenario futuro y estar el 2030 relativamente cercano, puede que la aparición en este escenario de un avance tecnológico relevante nos sorprenda y proporcione un salto significativo en la tan deseada reducción de emisiones contaminantes que tanto bien proporcionaría al planeta.

## 7. Bibliografía

AEMA. Agencia Europea de Medio Ambiente. (2006). Conjunto básico de indicadores de la AEMA. Disponible en [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/ConjuntoBasicoIndicadores\\_tcm30-185692.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/ConjuntoBasicoIndicadores_tcm30-185692.pdf)

ANFAC. (2017). Informe annual 2017. Disponible en <http://www.anfac.com/documents/tmp/MemoriaANFAC2017.pdf>

AUDI AG. (2011). Life cycle assessment. Disponible en [http://www.audi.nl/content/dam/ngw/company/Corporate\\_Responsibility/PDF/A3%20Umweltbilanz.pdf](http://www.audi.nl/content/dam/ngw/company/Corporate_Responsibility/PDF/A3%20Umweltbilanz.pdf)

Ayuntamiento de Madrid (2018). Protocolo de actuación para episodios de contaminación por dióxido de nitrógeno en la ciudad de Madrid. Disponible en [https://www.esmadrid.com/sites/default/files/protocolo\\_anticontaminacion\\_08102018.pdf](https://www.esmadrid.com/sites/default/files/protocolo_anticontaminacion_08102018.pdf)

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159-175. Disponible en [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1135-57272005000200005&lng=es&tlng=es](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200005&lng=es&tlng=es). C. Mensink, I. De Vlieger, & J. Nys. (2000). [An urban transport emission model for the Antwerp area.](#)

Bloomberg New Energy Finance (2016). Para el año 2022 está programada la revolución del coche eléctrico. Disponible en [Híbridosyeléctricos.com](http://hibridosyeléctricos.com)

Chester, M., Pincetl, S., Elizabeth, Z., Eisenstein, W., & Matute, J. (2013). Infrastructure and automobile shifts: Positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. *Environmental Research Letters*, 8(1), [015041]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015041>

Comisión de Expertos de Transición Energética (2018) Análisis y propuestas para la descarbonización. Disponible en [http://www6.mityc.es/aplicaciones/transicionenergetica/informe\\_cexpertos\\_20180402\\_veditado.pdf](http://www6.mityc.es/aplicaciones/transicionenergetica/informe_cexpertos_20180402_veditado.pdf)

Comunidad de Madrid (2016). Instituto de estadística. Disponible en [http://www.madrid.org/iestadis/fijas/otros/estructu\\_cen.htm](http://www.madrid.org/iestadis/fijas/otros/estructu_cen.htm)

Comunidad de Madrid (2018). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero. Disponible en <http://www.comunidad.madrid/servicios/urbanismo-medio-ambiente/emisiones-gases-efecto-invernadero>

Confibus (2019). La clave de la movilidad. *Revista de información sobre el transporte de viajeros por carretera*. Disponible en [http://docs.confibus.org/11\\_low.pdf](http://docs.confibus.org/11_low.pdf)

Consorcio Regional de Transportes de Madrid (2019). <https://transparencia.crtm.es/>

Cuéllar, Y., Buitrago-Tello, R., & Belalcazar-Ceron, L. C. (2016). Life cycle emissions from a bus rapid transit system and comparison with other modes of passenger transportation. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 6(3), 123-134.

Demographia (2006). Lyon: Europe personified. Disponible en <http://www.demographia.com/rac/rac-lyon.pdf>

Dirección General de Tráfico, DGT. (2017). Parque de vehículos. Disponible en <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>

Dreier, D., Silveira, S., Khatiwada, D., Fonseca, K. V., Nieweglowski, R., & Schepanski, R. (2018). Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 122-138.

EAF0. European Alternative Fuels Observatory (2018) Disponible en [www.eafo.eu](http://www.eafo.eu)

Ecodes, & Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2010). Calidad del aire y salud: Monográfico ciudad y transporte. Disponible en <http://www.ecodes.org/salud-calidad-aire/Monografico-Ciudad-y-Transporte>

Ecoinvent (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Disponible en [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)

European Environment Agency (2018). TERM 2018: Transport and environment reporting mechanism. *EEA Report No 13/2018*. ISSN 1977-8449.

François, C., Gondran, N., Nicolas, J. P. & Parsons, D. (2017). Environmental assessment of urban mobility: combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling—application to Lyon (France). *Ecological Indicators*, 72, 597-604.

Fundación Adecco. (2013). 3er informe anual el ciudadano español y la responsabilidad corporativa. Disponible en [http://www.earthgonomic.org/biblioteca/2013\\_ADECCO\\_El\\_Ciudadano\\_y\\_RC.pdf](http://www.earthgonomic.org/biblioteca/2013_ADECCO_El_Ciudadano_y_RC.pdf)

General Motors Corporation (2001). Well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems. Disponible en <https://publications.anl.gov/anlpubs/2001/04/39097.pdf>

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53-64.

Iglesias Gómez, G. (2017). Análisis del ciclo de vida (acv) de automóviles con diferentes sistemas de propulsión. Trabajo fin de grado Ingeniería electromecánica. Repositorio de la Universidad Pontificia de Comillas.

INE. Instituto Nacional de Estadística (2016). Población Comunidad de Madrid 2016

INE. Instituto Nacional de Estadística (2018). Proyecciones de población Comunidad de Madrid

INCYT- Instituto de investigación y proyección sobre ciencia y tecnología (2016). Matriz energética de Guatemala 2016. Disponible en [incyt.org](http://incyt.org)

ISO (2006 a). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006).

ISO (2006 b). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006).

KPMG (2018). Perspectiva para la reducción de emisiones de CO2 en España a 2030. Disponible en <https://www.aop.es/media/1755/informeap-kpmg-marzo-2018.pdf>

La Picirelli de Souza, L., Silva Lora, E. E., Escobar Palacio, J. C., Rocha, M. H., Grillo Renó, M. L. & Venturini, O. J. (2018). Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of cleaner production*, 203, 444-468.

Le Petit, Y. (2017). Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability. *Transport & Environment*. Disponible en [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017\\_10\\_EV\\_LCA\\_briefing\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_10_EV_LCA_briefing_final.pdf)

López, J. M., Gómez, Á., Aparicio, F., & Sánchez, F. J. (2009). Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. *Applied Energy*, 86(5), 610-615.

Metro de Madrid (2018). Resumen Demanda Anual 2018. Disponible en <https://www.metromadrid.es/es/transparencia/informacion-economica-presupuestaria-y-estadistica/datos-estadisticos>

Midwest Research Institute (1969). Resources and environmental profile analysis (REPA)

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017). Plan Nacional de Calidad del aire 2017-2019. Disponible en [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/planaire2017-2019\\_tcm30-436347.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/planaire2017-2019_tcm30-436347.pdf)

Ministerio de Fomento (2017). Anuario estadístico 2016. Disponible en <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BOW045>

Ministerio de Fomento (2018). *Los transportes y las infraestructuras. Informe anual 2017*. Disponible en

<https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BTW036>

Ministerio para la Transición Ecológica (s.f.). Problemática ambiental y contaminantes.

Disponible en <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/>

Ministerio para la Transición Ecológica (2019). Las emisiones de CO2 disminuyen en España un 2,2% en 2018 con respecto al año anterior. Disponible en

<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/>

Ministerio para la Transición Ecológica (2019). Borrador del Plan Nacional Integrado De Energía y Clima 2021-2030. Disponible en [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

NU. Naciones Unidas (2015). «Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos,». Disponible en

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312.

PNUMA SETAC (2003). ¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida? Disponible en [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1731Why take a life cycle approach ES.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1731Why%20take%20a%20life%20cycle%20approach%20ES.pdf)

PwC (2018). En 2030, Europa tendrá 80 millones de coches menos como consecuencia del transporte compartido y de la digitalización. Disponible en [www.pwc.es](http://www.pwc.es)

REE (2017). Informe del Sistema Eléctrico Español 2016

Romanillos, G. Moya-Gómez, B. Zaltz-Austwick, M. and Lamíquiz-Daudén, P.J. (2018). The pulse of the cycling city: visualising Madrid bike share system GPS routes and cycling flow. Disponible en [www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com)

Ruiz, J. M. (2006). *Transporte por carretera*. Barcelona, España: Marge Books.

S.G. de Explotación y Gestión de Red (2014) Encuestas de viajeros. *Dirección General de Carreteras de España*.

Sánchez Criado, C. (2019). 2018 finaliza con récord de ventas de vehículos eléctricos. Disponible en [Movilidadeléctrica.com](http://Movilidadeléctrica.com)

Sánchez Fernández, C. (2018). Más de 14 muertes al día por contaminación en la Comunidad de Madrid. Disponible en [www.nuevatribuna.es](http://www.nuevatribuna.es)

Siemens (2017). Madrid 2020 – 2030. *City performance tool*. Disponible en <https://ciudadesdel futuro.es/80-emisiones-transporte-madrid-culpa-coches.php>

TRANSyT (2018). Observatorio de la Movilidad Metropolitana. Disponible en [http://www.observatoriomovilidad.es/images/stories/05\\_informes/informe\\_omm\\_2016\\_final.pdf](http://www.observatoriomovilidad.es/images/stories/05_informes/informe_omm_2016_final.pdf)

Turconi, R., Boldrin, A., & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 555-565.

Viñoles-Cebolla, R., Bastante-Ceca, M., Lopez-Garcia, R., Vivancos-Bono, J., Capuz-Rizo, S. (2003). Análisis del impacto medioambiental de un automóvil a lo largo de su ciclo de vida. *DYNA*, 79(1). 6-10.

