



# Octava Edición

2019 - 2020

**Trabajo completo**

**Optimización de la gestión ambiental de vehículos  
en carreteras**

**Autores:**

**Marta García García**

**Juan Francisco Coloma Miró**

*Universidad de Extremadura*

**Gonzalo Fernández Fernández**

*Empresa FERNÁNDEZ GARCÍA, VICENTE*

*y Becario de Investigación en la Fundación Agustín de  
Betancourt*

**Alessandra Boggio-Marzet Riccio**

*Universidad Politécnica de Madrid*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1	NECESIDAD Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1	ECO-CONDUCCIÓN: DEFINICIÓN Y EVOLUCIÓN.....	5
2.2	ECO-RUTA: DEFINICIÓN Y EVOLUCIÓN.....	7
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>CAMPAÑA DE RECOPIACIÓN DE DATOS .....</b>	<b>10</b>
4.1	DATOS PREVIOS DEL EXPERIMENTO .....	10
4.2	DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO .....	12
4.3	ENCUESTA A LOS CONDUCTORES AL FINALIZAR EL EXPERIMENTO .....	21
<b>5</b>	<b>CREACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS .....</b>	<b>21</b>
5.1	CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS .....	22
5.2	VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS .....	28
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>29</b>
6.1	EXPERIMENTO CON CONDUCTORES NO PROFESIONALES EN CÁCERES. ....	29
6.2	EXPERIMENTO CON CONDUCTORES NO PROFESIONALES EN MADRID.....	32
6.3	ANÁLISIS MULTIVARIADO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE RELACIONADO CON LA CONDUCCIÓN ECOLÓGICA. ....	35
6.4	ECO-RUTA EN CIUDADES PEQUEÑAS. ....	35
6.5	EFFECTOS DE LA ECO-CONDUCCIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE VÍA RECORRIDA. ....	37
6.6	EFICACIA DE LA CONDUCCIÓN EFICIENTE EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR. ....	37
6.7	INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE UNA CIUDAD EN LA EFICACIA DE LA ECO-CONDUCCIÓN. ....	39
6.8	EXPERIMENTO DE CONDUCCIÓN EFICIENTE CON CONDUCTORES PROFESIONALES EN CÁCERES. ....	42
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Necesidad y objetivos de la investigación

Uno de los aspectos fundamentales que determinan la correcta gestión ambiental de las carreteras es el cálculo de su huella de carbono. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA,2019), la carretera supone el 94% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector del transporte; de esta cantidad, el 27% procede de camiones y autobuses y el 73% restante pertenece a coches y furgonetas. Los profesionales del sector coinciden en que las carreteras además de ser seguras, innovadoras e inteligentes tienen que presentarse como áreas que respeten el medio ambiente y que deben intentar reducir la huella de carbono en todas sus fases: diseño, construcción, explotación y mantenimiento.

Uno de los campos de investigación en la optimización de la gestión ambiental de los vehículos que circulan por la red de carreteras es estudiar el modo de conducción que practican los conductores de vehículos.

Las ciudades se enfrentan a desafíos muy importantes en cuanto al cambio climático y la contaminación del aire. “El 2 de agosto de 2019, la humanidad se abastecía de la naturaleza más que lo que nuestro planeta podía renovar en un año” (Global Footprint Network, 2017). Los mismos expertos explican en su informe que utilizamos más recursos y servicios ecológicos que los que la naturaleza puede regenerar a través de la sobreexplotación pesquera y forestal, y que, además, emitimos más dióxido de carbono a la atmósfera del que nuestros bosques pueden capturar: actualmente el 60% del déficit ecológico se debe a la necesidad de absorción de las emisiones de dióxido de carbono (Hertwich and Peters, 2009).

Está documentado que el dióxido de carbono no es el único gas de efecto nocivo que está causando el cambio climático, más bien el cambio climático se debe a un conjunto de gases, conocidos como GEI, los cuales alteran el balance energético del sistema climático, y los más importantes son, en orden decreciente de concentración: agua, vapor, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono (EPA,2014)

Las emisiones de GEI se producen por diferentes fuentes en toda la economía. La magnitud de las emisiones y la diversidad de las fuentes hace pensar no en una sola tecnología, política o cambio de comportamiento que pudiera “solucionar” el cambio climático, sino más bien en un conjunto de soluciones. (C2ES, 2019)

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2020), las emisiones de GEI del transporte han aumentado cada año desde 2014, estando un 29% por encima de los niveles de 1990 en 2018 como consecuencia de la creciente demanda en el transporte por carretera de pasajeros y mercancías. Además, la proporción de energía renovable utilizada para el transporte en la UE en 2018 fue igual al 8,1%, por debajo del objetivo de la UE del 10% establecido para 2020 por la Directiva de energías renovables de 2009. Esto indica que los esfuerzos actuales para limitar el impacto ambiental del sector y los impactos climáticos no son suficientes para alcanzar el objetivo político a largo plazo de la UE.

Con esta idea, para avanzar en estos objetivos y acelerar la implementación del Acuerdo de París, en 2019 se celebró en Madrid la 25ª edición de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático -COP25-. En esta Conferencia, 73 naciones (España incluida) se han comprometido a convertirse en carbono neutral para el año 2050 (UN,2019). El acuerdo pide un aumento en la ambición de los compromisos de cambio climático, siguiendo el calendario establecido en el Acuerdo de París, cuyo objetivo era reducir las emisiones de GEI en al menos un 40% para 2030 en comparación con 1990.

Los estados miembros de la UE y el Reino Unido anticipan reducciones significativas de emisiones en el sector del transporte de 2018 a 2030, que se lograrán a través de una amplia gama de medidas, como la eficiencia de los vehículos, combustibles y vehículos eléctricos bajos en carbono, cambio modal, etc. Los objetivos de 2030 requerirán políticas nuevas y más amplias para aumentar la eficiencia energética en los estados miembros y que puedan mantener su consumo de energía por debajo de ese límite.

En este contexto, los países pueden actuar en varias áreas clave para reducir las emisiones de GEI del transporte. De acuerdo con una estrategia integral de reducción de GEI del sector del transporte, debería abordar por lo menos las siguientes políticas clave (OECD, 2010):

- 1) Reducir la demanda de transporte: controlar el uso del suelo para evitar la dependencia del automóvil y aumentar las tasas de ocupación.
- 2) Modo compartido: medidas destinadas a promover modos más respetuosos con el medio ambiente como el transporte público y los modos no motorizados.
- 3) Elección de combustible: medidas destinadas a utilizar tecnologías para combustibles alternativos y nuevas fuentes de energía distintas de la gasolina.
- 4) Eficiencia de combustible: promoción de tecnologías eficientes para vehículos y gestión del tráfico, medidas de reducción de la congestión del tráfico y conducción ecológica.

Estas cuatro políticas para reducir los GEI solo se pueden lograr con un compromiso social global. Debe fomentarse y sostenerse mediante acciones de sensibilización, dirigidas a todos los sectores. La cuarta política depende particularmente de las decisiones de viaje individuales y de los estilos de conducción. La conducción ecológica tiene como objetivo mejorar la gestión ambiental de las carreteras modificando el modo de conducción de los conductores y consiguiendo reducciones de consumo de combustible y de CO<sub>2</sub> de alrededor del 10% dependiendo los parámetros de la carretera (incluido el volumen de tráfico y la velocidad máxima permitida de circulación de la vía). Además, con la conducción ecológica se consiguen mejoras significativas en la calidad del aire cuando los conductores utilizan rutas con menores velocidades de circulación máximas permitidas a pesar de aumentar su tiempo de viaje.

Tanto la conducción ecológica como la elección de eco-ruta, aquella por la cual el consumo de combustible es menor, son soluciones eficientes para la gestión ambiental de las carreteras de muy bajo coste.

En la literatura científica se pueden encontrar las ventajas y desventajas de la conducción ecológica, así como gran variabilidad de resultados dependiendo de la heterogeneidad de los conductores y del número de eco-conductores en las vías y de las rutas ecológicas (Xia et al, 2013). Por tanto, en este proyecto de investigación se han analizado los impactos de estos comportamientos desde 3 perspectivas diferentes:

1. En primer lugar, se han tomado medidas reales de numerosos parámetros de conducción a través de una campaña de recolección de datos en distintos itinerarios tanto en conducción convencional como en conducción ecológica.
2. Con estos datos se han analizado las variaciones individuales en el comportamiento de los conductores y en los parámetros de conducción medidos, se han modelizado – a nivel micro y macro – para evaluar el efecto de diferentes niveles de penetración de eco-conductores en las carreteras, así como las diferentes condiciones de tráfico. Los resultados obtenidos en las micro/macro simulaciones destacan variaciones sustanciales en función del tipo de carretera, las condiciones de tráfico y en niveles de penetración de eco-conducción y eco-ruta. Por tanto, es fundamental analizar la viabilidad práctica de la implementación de estas medidas.
3. Finalmente, se ha realizado una campaña de encuestas y un focus group para analizar la aceptabilidad de la conducción ecológica entre los conductores, así como su grado de concienciación y la disposición de las Administraciones a promocionar la implementación de estas medidas.

La base de esta investigación está basada en el potencial de estas medidas para optimizar la gestión ambiental de las carreteras mejorando los patrones de conducción y reduciendo las emisiones de GEI y contaminantes. Así pues, los objetivos generales del proyecto han sido:

**OG1.** Analizar el potencial de reducción de emisiones (tanto GEI como contaminantes) desde el punto de vista del conductor mediante una conducción ecológica y la elección de rutas que minimicen el consumo.

**OG2.** Conocer el grado de aceptabilidad de la conducción ecológica, así como concienciar de los beneficios y desventajas que esta variación en el comportamiento del conductor puede producir.

**OG3.** Proponer recomendaciones que puedan servir para los planificadores y operadores implicados en la gestión de las carreteras.

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre conducción eficiente se han centrado en conductores no profesionales, conduciendo turismos en distintos tipos de carreteras, vehículos o ciudades, pero no se ha estudiado el efecto de la conducción eficiente en empresas de mensajería cuyos conductores son profesionales y tienen como objetivo realizar un reparto en el menor tiempo posible. Conocido este vacío en la literatura científica, en esta investigación se aplicarán también los objetivos anteriores a conductores profesionales. Para ello, se ha contado con la colaboración de la empresa pública de mensajería española Correos.

Las ciudades elegidas para realizar toda la investigación han sido Madrid y Cáceres (España).

## 2 ESTADO DEL ARTE.

La energía que un individuo consume es la suma de su consumo doméstico y de su transporte. Una gestión del transporte que consiga minimizar las emisiones puede enfocarse hacia distintos aspectos: modo de transporte (uso en modo no motorizado), uso vehículos menos contaminantes (vehículos híbridos o eléctricos), reducción de los kilómetros por vehículo (uso compartido de vehículos, transporte público, reubicación de hogares, etc.) y modificación del estilo de conducción.

La conducción ecológica es una de las medidas de gestión medioambiental de una carretera que conlleva un cambio en el modo de conducción de los vehículos y que consigue reducciones en el consumo de combustible mediante el control de las aceleraciones, la anticipación al flujo de tráfico y señalización viaria (de forma que se eviten arranques y paradas bruscas), mantenimiento de un ritmo de conducción con velocidades medias uniformes y eliminando el ralenti excesivo. La investigación reciente de Sanguinetti et al (2017) unificaba las tipologías en seis medidas de conductas de conducción ecológica: conducción, confort, planeamiento de viaje, gestión de carga, repostaje y mantenimiento.

Con estas medidas se concluye que una conducción eficiente tiene grandes ahorros individuales de combustible. La eco-conducción puede ser definida como un cambio en el modo de conducción con el objetivo de reducir el consumo de combustible, pero es diferente al concepto antiguamente utilizado de “hypermiling” en el que la seguridad era secundaria con respecto al ahorro en consumo de combustible.

Esta definición de conducción eficiente incluye algunos conceptos, dependiendo del nivel de decisión (Sivak and Schoettle, 2012):

- Nivel estratégico: Selección de vehículo y mantenimiento
- Nivel táctico (también llamado eco-ruta): Selección de ruta y carga de vehículo.
- Nivel operacional: Comportamiento del conductor. Este nivel es más conocido como eco-conducción.

Esta investigación se centra en los niveles operacional y táctico, los cuales afectan directamente al tráfico actual: eco-conducción y eco-ruta. El nivel estratégico de eco-conducción en relación con la selección del vehículo está fuera del alcance de esta investigación.

### 2.1 Eco-conducción: definición y evolución

A nivel operacional, el comportamiento eficiente se basa en seguir algunos sencillos consejos ecológicos como acelerar y frenar suavemente, cambiar de marcha a bajas revoluciones, mantener una velocidad constante y anticiparse al tráfico para evitar detenerse tanto como sea posible (Barkenbus, 2010). Las ventajas de la eco-conducción, por supuesto, van más allá de la reducción de CO<sub>2</sub> ya que incluyen reducciones en costes de conducción para el individuo y producen beneficios de seguridad tangibles y bien conocidos (con menos accidentes y muertes en carretera).



**Figura 1.** Cambio en el comportamiento de eco-conducción (García, 2016)

En la figura 1 se esquematiza cuatro formas principales de promover que los conductores adopten medidas de conducción ecológica: las campañas en los medios de comunicación (televisión, aplicaciones, juegos virtuales, etc.), autoescuelas, cursos de conducción ecológica y sistemas de asistencia a bordo. Para realizar una gestión operacional eficiente de las carreteras, el conductor debe modificar su estilo de conducción, lo cual se logra con conciencia (ECOWILL, 2013) y cursos de entrenamiento específicos (IDAE, 2011): los videojuegos que involucran habilidades de conducción son cada vez más habituales y pueden tener un impacto positivo en el comportamiento del conductor. En algunos países, como Holanda, el entrenamiento en técnicas de conducción eficiente está muy extendido en las autoescuelas (Wilbers and Wardenaar, 2007). El curso más común de eco-conducción consiste en una prueba de conducción antes del curso teórico-práctico, y una vez aprendidas las técnicas de conducción eficiente, una prueba de conducción posterior. Posteriormente se analiza, mediante la tecnología instalada en los vehículos, la retroalimentación a los conductores donde pueden evaluar y comparar los resultados obtenidos en consumo de combustible y emisiones en ambos tipos de conducción (Hof et al. 2012).

Se utilizan ampliamente dos enfoques para evaluar el impacto de la conducción ecológica: pruebas de campo y simulaciones de tráfico. En la tabla 1 se adjunta el listado de las publicaciones más relevantes sobre la conducción eficiente.

INVESTIGACIÓN	TIPO DE ESTUDIO	VARIABLES	EFECTOS
<b>Johansson et al. (1999)</b>	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible y emisiones	10,9% de reducción de consumo
<b>Hornung (2004)</b>	Pruebas en carretera después de entrenamiento en ruta de eco-conducción	Consumo de combustible	15% a corto plazo y 12% de reducción a largo plazo
<b>Vermuelen (2006)</b>	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible y emisiones	7% de reducción en gasolina y 8-10% en diésel
<b>Taniguchi (2007)</b>	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible	20% de reducción de consumo
<b>Kobayashi et al (2007)</b>	Aceleración moderada y suave. Simulación en red.	Emisiones y tiempo de viaje	Efectos de red. Reducción del 3% en CO2 para tráfico medio y bajo e incremento del 12% en la congestión
<b>Henning (2008)</b>	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible	Reducción media del 25% del consumo de combustible a corto plazo y del 10% a largo plazo
<b>Fiat, Eco-Drive (2010)</b>	Después de la instrucción en eco-conducción. En	Consumo de combustible	6% de media y 16% de máximo

INVESTIGACIÓN	TIPO DE ESTUDIO	VARIABLES	EFFECTOS
	carretera con prueba de retroalimentación.		
<b>Qian y Chung (2011)</b>	Aceleración moderada y suave. Simulación en red.	Consumo de combustible, emisiones de CO <sub>2</sub> y tiempo de viaje.	Efectos de red. Reducción en consumo de combustible del 4% en flujo libre e incremento del 25% en congestión.
<b>Boriboonsomsin y Vu (2011)</b>	Con dispositivo de retroalimentación de conducción ecológica. Prueba en carretera	Economía en el combustible del vehículo	Una media del 6% de reducción en conducción por ciudad y una media del 1% en carretera
<b>Rakha y Kamalanathsharm (2013)</b>	Sistema dinámico V2I. Modelo	Consumo de combustible	Sube al 23,8% la reducción de consumo de combustible
<b>Niu et al. (2013)</b>	Sistema dinámico de eco-conducción. Modelo señalizado	Consumo de combustible y emisiones de CO <sub>2</sub>	25% de reducción en consumo de combustible y en emisiones de CO <sub>2</sub>
<b>Xia et al. (2013)</b>	Sistema dinámico de eco-conducción. Simulación de red	Consumo de combustible y emisiones de CO <sub>2</sub>	10-15% de reducción en vehículos individuales. 1-4% en flota dependiendo de la situación del tráfico
<b>Ma et al. (2015)</b>	Modelo combinado vehículo-motor para conductores de autobuses	Consumo de combustible	10% y alcanza un máximo del 20% en diferentes condiciones de la carretera
<b>Díaz-Ramírez et al (2017)</b>	Flota nacional de mercancías	Consumo de combustible	Reducciones entre el 6,8% y el 5,5%

**Tabla 1.** Resumen de los estudios sobre investigaciones en eco-conducción.

Los resultados de estos estudios muestran una gran variabilidad, desde el 2% hasta el 7% de ahorro medio de consumo, ascendiendo hasta el 20% por ahorro individual. Sin embargo, muy pocos estudios tienen en cuenta los diferentes porcentajes de penetración eco (García-Castro et al. 2014; Orfila et al. 2012), y la primera evidencia sugiere que un alto porcentaje de conductores eficientes no es positivo en escenarios con altos volúmenes de tráfico.

También resulta interesante tener en cuenta que el comportamiento de los conductores es diferente según el tiempo transcurrido desde la formación recibida en conducción ecológica (Stillwater et al. 2017). En los estudios realizados a corto plazo desde la realización del curso de conducción ecológica se ha obtenido un cambio medio mayor en el ahorro de combustible (hasta un 10%) que los estudios realizados después de haber pasado un tiempo mayor.

A pesar de constatarse la eficiencia en eco-conducción en condiciones ideales, para cuantificar los impactos reales de esta técnica en términos de ahorro en consumo, hay que realizar tanto pruebas de campo como simulaciones de tráfico. La conducción ecológica puede ser una buena medida para reducir las emisiones, sin embargo, muy pocas de estas investigaciones se dirigen sobre cómo influye la conducción eficiente en el flujo de tráfico y si esta influencia varía con el nivel de congestión y con el número de conductores que realizan eco-conducción.

## 2.2 Eco-ruta: definición y evolución

A nivel operacional, la eco-ruta implica seguir una ruta recomendada basada en la minimización del impacto ambiental producido. Algunos autores han concluido en sus estudios que la navegación en eco-ruta es una herramienta con mucho potencial en la reducción de consumo de combustible (Boriboonsomsin et al. 2012, 2014; Yao et al. 2013, Guo et al, 2013).



La implementación de este concepto es sin embargo más complicada, ya que el perfil de velocidad óptimo para reducir el consumo de combustible, y por tanto de CO<sub>2</sub>, puede producir un incremento en emisiones de algunos tipos de contaminantes, como CO y HC (Bandeira et al, 2013, Mesnsing et al, 2014).

Un estudio realizado en Suecia (Ericsson et al, 2006) concluye que estas emisiones se pueden reducir entorno al 8,2% si se sigue el trayecto de eco-ruta. En línea con este resultado, Kono et al. (2008) estima que la práctica de ruta ecológica puede reducir la producción de emisiones entorno a un 9%, mientras que incrementa los tiempos de viaje en otro 9%. Los hallazgos de Ahn y Rakha (2013) en los casos de Cleveland and Columbia (Ohio) son también consistentes con lo anterior - entre el 3,3% y el 9,3% en la economía de combustible -, pero no necesariamente con el ahorro de tiempo. Sin embargo, Ahn y Rakha (2013) también concluyen que la configuración de la red de carretera es un factor significativo al estimar los beneficios potenciales de eco-ruta.

Perez-Prada et al. (2017) muestran en su investigación como el impacto de la eco-ruta varía sustancialmente con el nivel de tráfico. Además afirman que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el proyecto ITC-emissions (Garcia-Castro et al. 2016) en el que analizan el impacto de diferentes tasas de penetración de eco-rutas en las emisiones de CO<sub>2</sub>, y reconociendo los diferentes impactos los GEI y las emisiones contaminantes, argumentan que la elección de las rutas ecológicas presentan claros beneficios para combatir el cambio climático pero podrían ser ineficientes para reducir la contaminación del aire en entornos urbanos.

En los estudios más recientes sobre la gestión del tráfico de carreteras se investiga sobre sistemas de navegación inteligentes para ayudar a la gestión integral del tráfico (Fiori et al. 2018) mediante la utilización de información en tiempo real recogida mediante teléfonos móviles, GPS... para informar al conductor de la ruta de viaje en la que consuma menor energía.

### 3 METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos generales del proyecto, en la investigación se han abordado dos preguntas principales, brevemente resumidas en:

1. ¿Cómo afectan los diferentes factores externos a la eficiencia de la conducción ecológica?
2. ¿Para distintos entornos de conducción, cuáles son los efectos de la conducción y la ruta ecológica en el consumo de combustible y en las emisiones?

Para responder a estas dos cuestiones, se presenta a continuación la metodología de la investigación empleada (Figura 2) dividida en cinco pasos:

1. La **campaña de recolección de datos**: elección de vehículos para el experimento, selección de conductores y rutas en las ciudades elegidas para la realización de la investigación, dispositivos electrónicos para la recogida de los datos de los vehículos (OBD-key).
2. **Creación de la base de datos**: tratamiento informático de los datos obtenidos con los dispositivos electrónicos OBD-key mediante el programa R y obtención de las bases de datos

de cálculo de las variables medidas en el experimento (velocidades, aceleraciones, revoluciones por minuto, paradas...).

3. **Filtrado de datos y validación de la base de datos:** depuración y detección de errores y/o ausencias de medición de datos en las bases de datos iniciales para obtener las bases de datos definitivas
4. **Análisis de datos:** estudio de las distintas variables en conducción convencional y ecológica para los distintos vehículos y conductores para las dos ciudades del experimento.
5. **Resultados, conclusiones y política de recomendaciones:** se presentan los resultados obtenidos en la investigación y se analizan las conclusiones obtenidas del mismo.

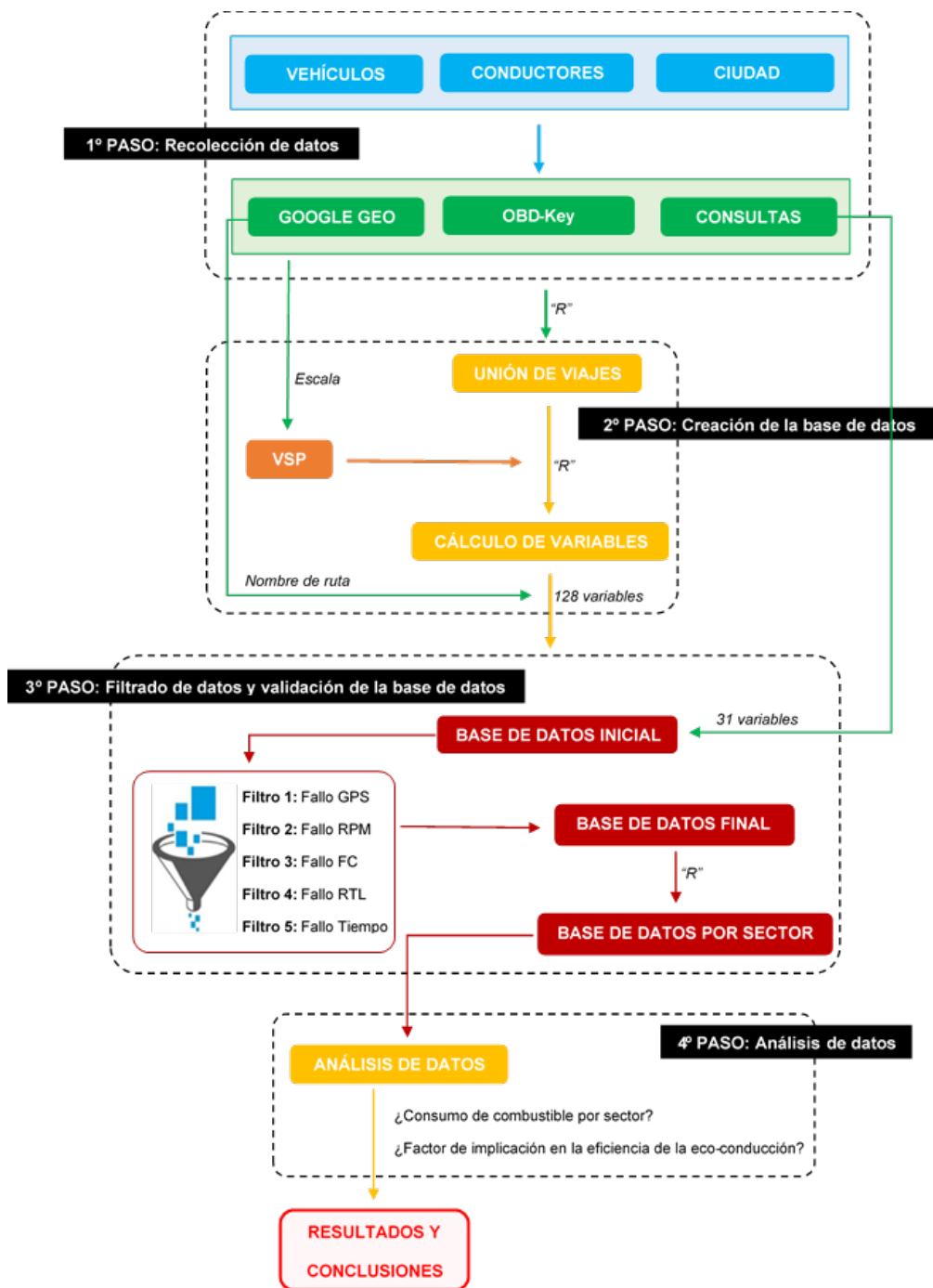


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso metodológico

## 4 CAMPAÑA DE RECOPIACIÓN DE DATOS

El objetivo de la investigación es medir el efecto que tienen tanto la conducción ecológica como las rutas ecológicas en un vehículo individual en condiciones reales de tráfico. Para ello, se llevó a cabo una campaña para toma de datos en diferentes rutas considerando varios tipos de carreteras (vías locales, colectoras, perimetrales, variantes de población) y diferentes condiciones de tráfico. El experimento se ha realizado en dos ciudades (Madrid y Cáceres) de España con características muy diferentes.

### 4.1 Datos previos del experimento

La toma de datos se ha realizado en dos períodos: el primero donde los conductores conducían por diferentes rutas prefijadas en su forma habitual y el segundo en el que conducían por esas mismas rutas en modo de conducción ecológica. Entre el primer periodo de conducción y el segundo, todos los conductores han recibido un curso teórico-práctico de conducción ecológica impartido por una autoescuela.

El diseño previo al experimento tenía como objetivo responder las preguntas de cuándo, dónde y cómo se debería realizar el experimento y qué tipo de datos eran necesarios. Al respecto, se consideraron varios criterios en el diseño.

En primer lugar, se han estudiado las características de las dos ciudades en cuanto a superficie, movilidad y factores geográficos.

El área metropolitana de Madrid es la tercera área metropolitana más grande de la Unión Europea con una población de casi 7,0 millones de habitantes y con una superficie de 2.879 km<sup>2</sup>. La red de carreteras de Madrid comprende cuatro carreteras circulares, ocho carreteras radiales libres y cuatro radiales de peaje. Las tendencias en el uso del automóvil conducen a una mayor congestión en la red de carreteras, particularmente en el área dentro del anillo exterior. Según un informe del Ayuntamiento de Madrid (Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad, 2013), el 68% de los turismos son diésel y el 31% gasolina. En este sentido, la muestra de los dos vehículos usados en el experimento (uno gasolina y otro diésel) es representativa de la composición de la flota madrileña. Además, el 60% de la población reside dentro del anillo interior. La densidad de población media de Madrid es de 805 hab/km<sup>2</sup> mientras que las densidades son altas dentro del anillo interior (4.157 hab/km<sup>2</sup>) y muy bajas en el área exterior (474 hab/km<sup>2</sup>).

La ciudad de Cáceres tiene una población aproximada de 96.000 habitantes con una superficie de 30 km<sup>2</sup>. En 1986 fue declarada por la UNESCO como Ciudad Patrimonio de la Humanidad y la ciudad monumental tiene carácter peatonal protegido. Cáceres se presenta como una ciudad que ha sabido mantener un crecimiento moderado y constante, a pesar de la contracción poblacional que se ha producido en otras ciudades similares y en gran medida provocada por la actual crisis económica. El 55% de todos los movimientos que se realizan en la ciudad se realizan mediante el uso del vehículo privado. El transporte público captura el 10% de la movilidad global y los peatones, a pesar del pequeño tamaño de la ciudad, solo representan un tercio de todos los viajes. La ciudad de Cáceres necesita

implementar medidas que incentiven el uso del transporte público y la movilidad peatonal para convertirla en una ciudad más sostenible. De forma complementaria parece muy conveniente conocer el ahorro de combustible y emisiones que produce la conducción eficiente en ciudad.

En segundo lugar, para recopilar datos de comportamiento del conductor y las rutas ecológicas en diferentes tipos de carreteras, se han estudiado factores externos como el tipo de vehículo, la hora de salida, los participantes del experimento y los tipos rutas.

Esta campaña de recogida de datos se realizó con vehículos de diferente tipología, con el fin de analizar los diferentes impactos entre distintos tipos de combustible (gasolina y diésel) y poder aplicarlos a la composición de la flota de cada ciudad al trasladar los impactos a escala de la ciudad.

Se contrató a los conductores no profesionales para cubrir diferentes rutas a lo largo de diferentes itinerarios, durante diferentes turnos de conducción durante un amplio período del día (12 horas) organizados de tal manera que cubran siempre las horas pico para obtener una muestra de datos suficiente para las diferentes situaciones de tráfico (libre circulación, tráfico moderado y congestión), así como evitar alteraciones en la forma de conducir como consecuencia de la meteorología (lluvias, nieve y neblina, etc).

Además, en la selección de los conductores es fundamental que tengan diferentes perfiles en cuanto a sexo, edad y otras variables significativas.

En el caso de los conductores profesionales, se seleccionó una serie de empleados de la sección de repartos de la empresa Correos que fuera una muestra representativa del sector. La intención fue que, tras obtener los datos de conducción habitual practicada durante un determinado periodo de tiempo por los participantes, instruir a estos conductores en eco-conducción, para analizar posteriormente los datos que arrojaría su cambio en la modalidad de conducción durante un periodo de tiempo similar al que no practicaban este tipo de conducción ecológica. De este modo podríamos comparar los resultados de cada modo de conducción y realizar un análisis sobre ellos para ver las consecuencias de esta práctica en el sector de transportes profesional. Los vehículos comerciales representan aproximadamente el 20% de los automóviles en la ciudad de Cáceres (DGT, 2019).

En cuanto a la recogida de datos para la medida de eco-ruta, se ha determinado una serie de itinerarios, y para cada uno de ellos varias rutas alternativas con el mismo origen y destino. Una de las rutas es en cada caso la de menor tiempo mientras que las otras están determinadas para minimizar su consumo de combustible. Una vez determinados estos itinerarios y rutas, los conductores han realizado estos itinerarios de forma iterativa, siguiendo cada semana una de las rutas previamente establecidas para cada itinerario

Las mediciones de los parámetros que configuran el perfil de conducción (velocidades instantáneas, aceleraciones, RPM, etc) así como los consumos se obtuvieron mediante la instalación en vehículos de un dispositivo a bordo - OBD (Diagnóstico A Bordo) -Key (<http://www.obdkey.com>) - que permite obtener y almacenar esta información con carácter instantáneo, además de la ubicación geográfica del vehículo en cualquier momento.

## 4.2 Descripción del experimento

La campaña de recogida de datos ha sido coordinada por el Centro de Investigación del Transporte TRANSyT de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Escuela Politécnica de Cáceres de la Universidad de Extremadura (UEx). Para el experimento con conductores profesionales, se contó con la coordinación de la empresa pública de mensajería Correos.

### 4.2.1 Tipos de vehículos

Los vehículos empleados en el experimento (figura 3 y tabla 2) para conductores no profesionales han sido un vehículo tipo pequeño (Fiat 500) y otro tipo mediano (Opel Astra), que corresponden aproximadamente al 75% de la flota de vehículos en Madrid y Cáceres. Los coches se alquilaron a la empresa local de coches compartidos Bluemove (<https://bluemove.es/es>). Los dos vehículos están registrados según las normas Euro 5.

CARACTERÍSTICAS	ASTRA	FIAT
Clasificación comercial	Saloon	Mini
Tipo de cambio de marchas	Manual	Manual
Masa máxima autorizada	1393	930
Potencia (CV)	70	77
Dimensiones (LxWxH) (mm)	4419 x 1814 x 1510	3546 x 1627 x 1488
Asientos	5	4
Emisiones (g de CO <sub>2</sub> /km)	109	115
Clasificación por consumo relativo	C	D

**Tabla 2.** Información técnica de los vehículos utilizados por conductores no profesionales.



**Figura 3.** FIAT 500 en conducción y Opel Astra en conducción.

Para el experimento con conductores profesionales se contó con los vehículos expuestos en la tabla 3. Se emplearon automóviles de tipo comercial, en este caso furgonetas diésel, con similitudes en sus características técnicas, 4 de ellas pertenecientes a la gama Kangoo de Renault y la quinta era una Peugeot Partner.

CARACTERÍSTICAS	PEUGEOT	RENAULT
Clasificación comercial	PARTNER 1.6 HDi 75	KANGOO 1.5 DCi 70 CV
Tipo de cambio de marchas	Manual (5)	Manual (5)
Masa máxima autorizada	1960	2956
Potencia (CV)	75	70
Dimensiones (LxWxH) (mm)	4380 x 2890 x 1801	4213 x 2133 x 1799
Asientos	2 – 5	2 – 5
Emisiones (g de CO <sub>2</sub> /km)	143	147
Clasificación por consumo relativo	C	D

**Tabla 3.** Información técnica de los vehículos utilizados por conductores profesionales.



**Figura 4.** Furgonetas Renault de Correos que participaron en el experimento.

#### 4.2.2 Conductores del experimento

En el caso de Madrid, se contó con 12 personas para conducir los vehículos durante los dos períodos de conducción de 9 días cada uno. Por limitaciones contractuales, los conductores fueron estudiantes y personal académico de la UPM, con edades comprendidas entre los 23 y los 50 años. La muestra fue casi equilibrada por género, siendo 8 hombres y 6 mujeres (Figura 5).

En el caso de Cáceres, fueron también 12 personas las que condujeron los vehículos durante los dos periodos de conducción de 4 días cada uno. Los conductores fueron estudiantes y personal académico de la UEx, con edades comprendidas entre 21 y 44 años, siendo 8 hombres y 4 mujeres.

En ambos casos, Madrid y Cáceres, se contrató a los conductores durante 12 horas/día de conducción en tres turnos de cuatro horas cada uno, cubriendo siempre las horas punta del día.

En cada turno iban dos personas por coche, conductor y asistente, que cambiaban alternativamente cada hora de conducción dentro de un mismo turno. Conducían indistintamente por cada una de las rutas prefijadas en cada itinerario.



**Figura 5.** Algunos de los conductores no profesionales en el experimento en Madrid y Cáceres.

Para el experimento con conductores profesionales en Cáceres, se contó con 5 conductores con edades comprendidas entre los 35 y 60 años, todos varones, una muestra representativa en cuanto a la edad, pero no en cuanto género. Las rutas coincidían con las de los repartos que se debían realizar cada día. Los turnos de trabajo eran el turno de mañana de 7:00 a 14:00 horas y el turno de tarde

comprendido entre las 14:00 y las 21:00 horas. Cuatro conductores pertenecían al turno de mañana, y sólo uno era del turno de tarde.

#### 4.2.3 Formación en conducción ecológica

Los 24 conductores no profesionales han recibido formación en conducción ecológica. Este programa formativo ha sido impartido por profesores de dos autoescuelas locales, Autoescuela Abril en Madrid (<http://www.autoeabril.com/autoescuela-Madrid-cursos-conduccion-eficiente.aspx>) y Autoescuela Las Arenas en Cáceres (<https://www.autoescuelalasarinas.com/#inicio>).

La formación constaba de una parte teórica y otra parte práctica, desarrollada con la siguiente estructura:

1. Sesión de conducción convencional: los participantes conducen los vehículos por la ruta establecida y se registran los diferentes parámetros de su conducción, velocidad media, cambios de marcha realizados y consumo fundamentalmente.
2. Clase teórica: se explican los conceptos clave de conducción eficiente.
3. Sesión de conducción ecológica: los conductores repiten la conducción por el mismo recorrido que en la primera sesión, para comprobar la efectividad de la formación que han recibido, recogiendo nuevamente los parámetros de su conducción y comparándolos con los anteriores.
4. Sesión final de análisis de los resultados obtenidos.

Por otro lado, en el experimento con conductores profesionales de la empresa Correos, durante la primera semana se registraron los viajes de estos conductores durante las jornadas de repartos con su conducción habitual. Posteriormente, los conductores seleccionados recibieron un curso teórico acerca de las técnicas de conducción eficiente para poderlas implementar la semana siguiente en sus repartos diarios. Todos los viajes realizados con conducción ecológica fueron registrados de la misma forma que lo fueron los de la primera semana con la conducción habitual.

En el momento de la inscripción, los conductores debían cumplimentar un formato indicando el número de años de experiencia de conducción y el comportamiento típico de conducción, con el fin de darnos la posibilidad de incluir esta información en nuestra base de datos para obtener una gama más amplia de posibles análisis. El hecho de que las personas contratadas tuvieran diferente experiencia de conducción nos permitió hacer un análisis sobre el diferente nivel de penetración de la eco-conducción después de asistir al curso de conducción eficiente, en función de la capacidad del conductor.

#### 4.2.4 Itinerarios y rutas

##### ***Experimento en Madrid***

La campaña de recogida de datos se centró en la conexión entre Madrid y dos municipios del noroeste de Madrid, Pozuelo y Majadahonda. Fueron seleccionados debido al análisis basado en la Encuesta Sintética de Movilidad de la Comunidad de Madrid 2014, en la que se mostraba la cantidad de viajes entre ambos municipios.

La campaña incluyó dos itinerarios entre estos dos municipios y la Escuela de Caminos de la UPM. (figura 6). El itinerario llamado CPi une la Universidad con Pozuelo en ambas direcciones y contiene tres rutas (CP1, CP2 y CP3), y el itinerario llamado MPi une Majadahonda con Pozuelo también en ambas direcciones por tres rutas diferentes (MP1, MP2 y MP3).

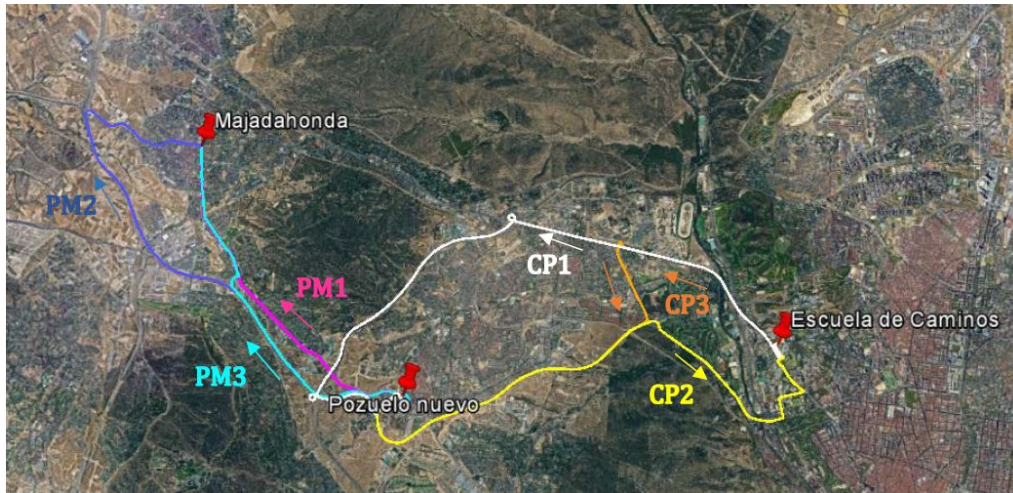


Figura 6. Itinerarios monitoreados en la campaña de recopilación de datos en Madrid.

La figura 7 proporciona, a modo de ejemplo, la monitorización de uno de los itinerarios con la sección de la carretera marcada detallándose en la leyenda la longitud, el tipo de carretera y los límites de velocidad para cada sección.

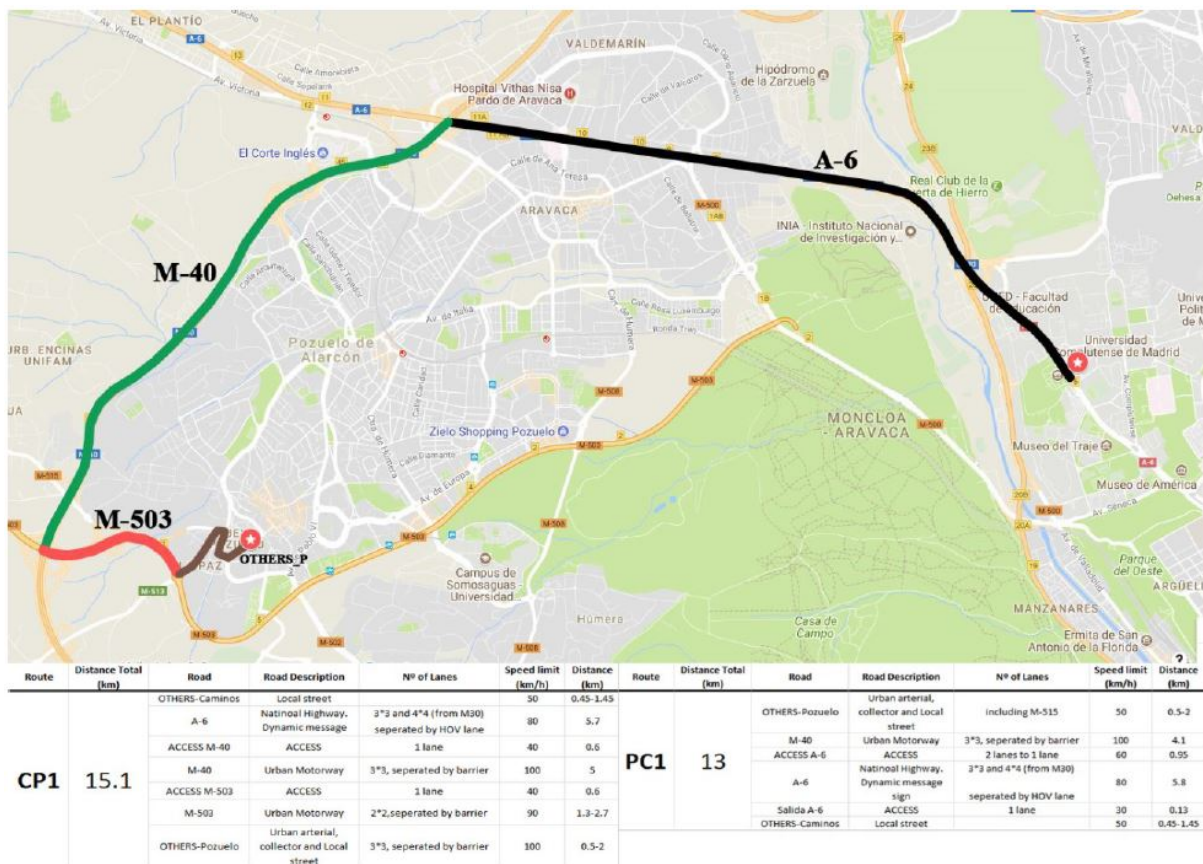


Figura 7. Ejemplo de las rutas CP1-PC1 en Madrid.



La Tabla 4 describe el detalle por tramos de la ruta CP1 (universidad-Pozuelo) en sentido directo e inverso.

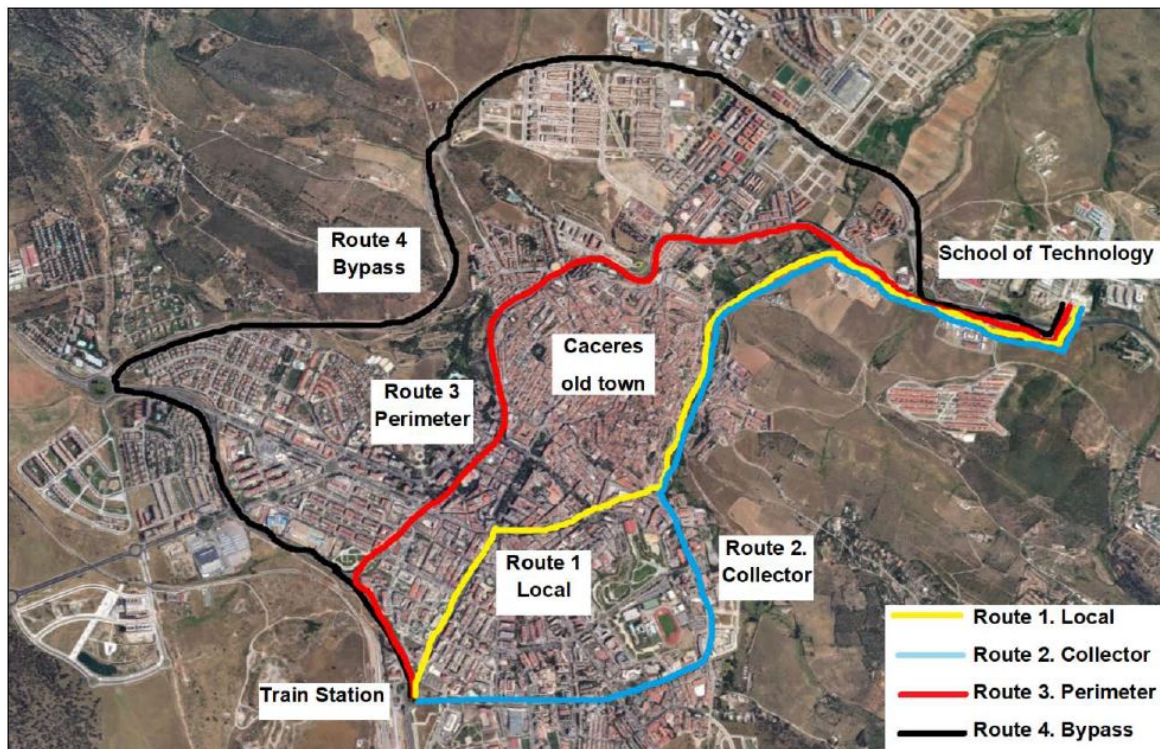
RUTA	DISTANCIA TOTAL (km)	CARRETERA	DESCRIPCIÓN	Nº DE CARRILES	LÍMITE DE VELOCIDAD (km/h)	DISTANCIA (km)	IMD
CP1	15,1	Otras-caminos			50	0,45-1,45	
		A-6	Nacional	3x3 y 4x4 separados por carril HOV	80/120	5,7	130.364
		Acceso M-40	Acceso	1	40	0,6	
		M-40	Interurbana	3x3, separados por barrera	100	5	77.333
		Acceso M-503	Acceso	1	40	0,6	
		M-503	Interurbana	2x2, separados por barrera	90	1,3-2,7	
		Otras-Pozuelo	Derivación, colector y local	3x3, separados por barrera	100	0,5-2	
PC1	13	Otras-Pozuelo	Derivación, colector y local	Se incluye M-515	50	0,5-2	
		M-40	Interurbana	3x3, separados por barrera	100	4,1	77.333
		Acceso A-6	Acceso	De 2 carriles a 1	60	0,95	
		A-6	Nacional	3x3 y 4x4 separados por carril HOV	80	5,8	130.364
		Salida A-6	Acceso	1	30	0,13	
		Otras-caminos			50	0,45-1,45	

**Tabla 4.** Descripción detallada de la ruta CP1 (Universidad -Pozuelo) y PC1 (Pozuelo-Universidad) en Madrid.

### Experimento en Cáceres

En la ciudad de Cáceres se ha seleccionado un único itinerario con cuatro rutas diferentes ya que la ciudad es pequeña y se puede recorrer de lado a lado en menos de 15 minutos. Se parte de la estación de trenes ubicada al oeste y termina en la Escuela Politécnica (UEx) situada en la parte este de la ciudad.

Se han considerado cuatro rutas alternativas con diferentes características y volumen de tráfico, de menor a mayor nivel de servicio: local (ruta 1), colector (ruta 2), perimetral (ruta 3) y variante de población (ruta 4). La figura 8 muestra en el mapa las cuatro rutas diferentes y sus descripciones.



*Figura 8. Mapa de las rutas seleccionadas en Cáceres.*

La ruta 1 (local) recorre las calles urbanas y pasa por el corazón del centro de la ciudad. Tiene una longitud de 6,1 km y el tiempo de viaje es de unos 15 minutos. Tiene dos carriles por sentido con mediana. La velocidad está limitada a 50 km/h. Está regulado por semáforos y sufre picos de congestión.

La ruta 2 (colector) tiene una longitud de 6,7 km y el tiempo de recorrido es de unos 14 minutos. Es una de las avenidas más importantes de Cáceres, ya que da acceso a la estación de autobuses, Palacio de Congresos, polideportivo, tanatorio y hospital, lo que genera problemas habituales de congestión. También cuenta con dos carriles por sentido con mediana, pero por su carácter urbano el límite de velocidad es de 50 km/h, y de 30 km/h en varios tramos.

La ruta 3 (perimetral) es la antigua carretera de circunvalación, que ya está integrada en la ciudad. También tiene de dos carriles por sentido con mediana, o está delimitada por una doble línea continua. El límite de velocidad es de 50 km/h. Tiene una longitud de 6,7 km y el tiempo de viaje es de unos 13 minutos. Casi no tiene congestión.

La ruta 4 (variante de población) sigue la circunvalación exterior de la ciudad conocida como "Ronda Norte". Tiene una longitud de 10,3 km y se puede recorrer en unos 12 minutos. Es la ruta más larga y rápida. Discurre por el norte de la ciudad y su sección es de dos carriles por sentido con mediana. Las intersecciones se realizan mediante rotondas y los pasos de peatones están regulados por semáforos. Los límites de velocidad varían entre 80 km/h y 40 km/h. El tráfico suele ser fluido todo el día.

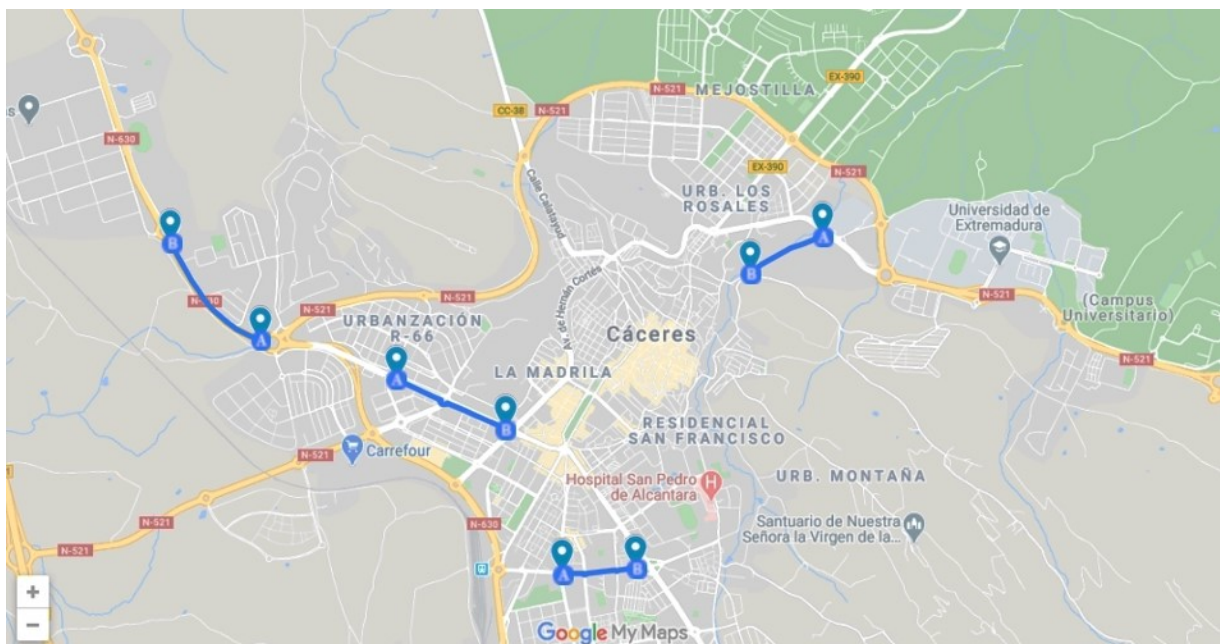
En la tabla 5 se muestra un ejemplo descriptivo de las rutas.

RUTA	DISTANCIA TOTAL (km)	CARRETERA	DESCRIPCIÓN	Nº DE CARRILES	LÍMITE DE VELOCIDAD (km/h)	DISTANCIA (km)	IMD
AP1	5,6	Av. Alemania	Local	2x2 separados por barrera. Aparcamiento a ambos lados	50	1,1	10.562
		Ronda del Carmen-Prof. Hdez. Pacheco, Ronda Vadillo	Local	1	50	2,8	6.858
		Av. de la Universidad	Derivación	2x2 separados por barrera	50	1,1	5.111
		Av. de las Ciencias y Av. de las Letras	Local	1x1 con barrera	40	0,6	
AP2	6,1	Av. de la Hispanidad	Colector	2x2 separados por barrera. Aparcamiento a ambos lados	30	1,7	
		Ronda San Francisco-Ronda Vadillo	Local	1	50	2,7	
		Av. de la Universidad	Derivación	2x2 separados por barrera.	50	1,1	5.111
		Av. de las ciencias y Av. de las letras	Local	1x1 con barrera	40	0,6	

**Tabla 5.** Descripción de rutas en Cáceres.

En la investigación con los conductores de Correos, se analizó también el tipo de vía interurbana para estudiar el comportamiento de los conductores de Correos en carreteras situadas fuera de los límites del casco urbano que conectan con puntos exteriores a este, ya sean núcleos poblacionales de menor entidad, núcleos industriales como puede ser polígonos o con otras carreteras nacionales o autovías. Sus límites de circulación varían entre 50 y 90 km/h.

En la figura 9 se muestran algunas de las micro-rutas estudiadas para los conductores de Correos y en la tabla 6 se muestra su descripción.



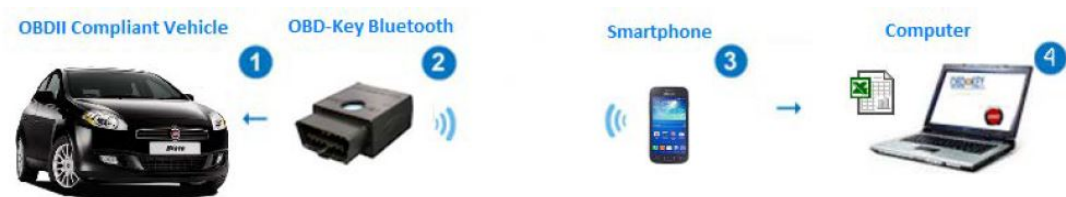
**Figura 9.** Algunas de las micro-rutas estudiadas en Cáceres para conductores profesionales.

TIPO DE VÍA	RUTA	ASIGNACIÓN DEL TRAMO	DESCRIPCIÓN	LONGITUD	LÍMITE DE VELOCIDAD
LOCAL	1	RONDA MARQUES DE VADILLO	UN CARRIL POR CADA SENTIDO, ARCÉN A AMBOS LADOS	550 m	50 km/h
COLECTOR	2	AV. HISPANIDAD – INTERSECCIÓN ANTONIO HURTADO	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA, APARCAMIENTOS A AMBOS LADOS	600 m	30 – 50 km/h
	3	AV. RUTA DE LA PLATA	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA CON VEGETACIÓN	1200 m	30 – 50 km/h
PERIMETRAL	4	ROT. HERNÁN CORTÉS – PLAZA DE TOROS	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA, APARCAMIENTOS A AMBOS LADOS	800 m	50 km/h
	5	ROT. C. DIOCESANO – ROT. UNIV. LABORAL	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA, UNA PARTE CON APARCAMIENTOS A AMBOS LADOS	1200 m	50 km/h
VARIANTE DE POBLACIÓN	6	ROT. CASAR DE CÁCERES – GLORIETA G. CORDEL MERINAS	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA CON VEGETACIÓN, LATERALES PROTEGIDOS CON GUARDARAÍLES	1000 m	50 – 80 km/h
	7	RONDA NORTE	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA CON VEGETACIÓN, LATERALES PROTEGIDOS CON GUARDARAÍLES	2200 m	50 – 80 km/h
INTERURBANA	8	ROTONDA CABEZARRUBIA – POL. CAPELLANÍAS	DOS CARRILES POR CADA SENTIDO SEPARADOS POR MEDIANA CON VEGETACIÓN	950 m	80 km/h

**Tabla 6.** Descripción de las micro-rutas en Cáceres (conductores profesionales)

#### 4.2.5 Equipamiento de abordó

Los datos se han recogido mediante la instalación en el puerto de diagnóstico de los vehículos de un dispositivo OBD-Key (sistema de diagnóstico a bordo) que envía los datos a un teléfono móvil a través de wifi con una frecuencia de 1 Hz (Figura 10).



**Figura 10.** Proceso de recopilación de datos.

Los parámetros que se recopilaban tanto en el periodo de conducción convencional como en el periodo de conducción ecológica han sido:

- Posición GPS (longitud y latitud) y distancia recorrida (km)
- Tiempo de viaje (h)
- Velocidad instantánea (km/h)
- Consumo de combustible (l)
- Número de paradas, rpm, aceleración y desaceleración ( $m/s^2$ )

#### 4.2.6 Cronología del experimento

La figura 11 muestra el cronograma de la campaña de recogida de datos en Madrid y Cáceres respectivamente.



Figura 11. Calendario y cronología de la campaña de colección de datos.

#### Experimento en Madrid

El primer periodo de conducción comienza el lunes 17 de abril. Debido a que este día se considera no académico en la ciudad de Madrid, pudiendo alterar significativamente el tráfico en relación con el resto de la semana, se utiliza como día para presentar el proyecto a los conductores. Esta jornada tiene como objetivo concienciar a los conductores con el papel que desempeñarán dentro del proyecto, así como explicar en detalle el funcionamiento del OBD-key, los diferentes itinerarios que realizarán, el punto de repostaje conveniente, etc.

Se han conducido simultáneamente dos vehículos (uno con gasoil y otro con gasolina) por diferentes itinerarios durante dos periodos (18 al 28 de abril y 16 al 26 de mayo) intercalados con un curso de conducción eficiente

Cada día de conducción consta de tres horarios punta de tráfico: de 7:00 a 9:00 h, de 14:00 a 17:00 h y de 17:00 a 20:00 h, que cubren las horas pico del tráfico en los itinerarios marcados. Los turnos tienen una duración de 4 horas y están compuestos por 2 personas, que conducirán dos horas respectivamente, siendo tanto conductor como copiloto durante un mismo turno.

Los turnos de conducción se ajustan de manera que se cubran todas las horas anteriores, siempre comenzando 15 a 20 minutos antes de que comience la hora pico, y terminando la misma, 15 o 20 minutos después de terminar la hora pico. Un ejemplo de un día de conducción sería:

PRIMER TURNO	7:00 – 11:00
SEGUNDO TURNO	11:30 – 15:30
TERCER TURNO	16:00 – 20:00

La pareja de conductores rota entre los dos coches durante las dos semanas de conducción antes del curso de conducción ecológica, conduciendo de forma convencional, y las dos semanas posteriores, conduciendo eficientemente, y asumiendo que el turno/horario de la pareja sigue siendo el mismo durante todo el experimento.

### **Experimento en Cáceres**

Al igual que en el experimento en Madrid, el primer día los participantes se reunieron y se les enseñó a utilizar los equipos de abordaje, así como conocer las rutas diseñadas.

La primera prueba se realizó del 2 al 5 de mayo de 2017, y la segunda la semana siguiente, del 9 al 12 de mayo, tras realizar el curso de formación en conducción ecológica. Cada día de conducción constaba de tres turnos (para cada uno de los coches usados) en función de las condiciones del tráfico local para cubrir todo tipo de situaciones de tráfico:

PRIMER TURNO	7:30 – 11:30
SEGUNDO TURNO	12:00 – 16:00
TERCER TURNO	16:30 – 20:30

Estos turnos se realizaron durante 4 días a la semana sin que los conductores hubieran recibido la formación de conducción ecológica y 4 días de la semana siguiente después de haber recibido esta formación.

#### **4.3 Encuesta a los conductores al finalizar el experimento**

Después de cada turno de conducción, los conductores contestaron una serie de preguntas a través de una encuesta, de manera que se pudiera conocer el estado de ánimo y sentimiento de estos, antes y después de recibir y poner en práctica la formación sobre conducción eficiente. En la tabla 7 se incluye el formato de encuesta utilizada.

PREGUNTAS	MODO CONDUCCIÓN	RESPUESTAS						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>EL MANEJO LE HA RESULTADO:</b>	<i>NO ECO</i>							
FÁCIL (1) – DIFÍCIL (7)	<i>ECO</i>							
<b>EL ENTORNO DE CONDUCCIÓN ERA:</b>	<i>NO ECO</i>							
FÁCIL (1) – DIFÍCIL (7)	<i>ECO</i>							
<b>DURANTE LA CONDUCCIÓN ESTABAS:</b>	<i>NO ECO</i>							
ABURRIDO (1) - ENTRETENIDO (7)	<i>ECO</i>							
<b>DURANTE LA CONDUCCIÓN ESTABAS:</b>	<i>NO ECO</i>							
RELAJADO (1) - ESTRESADO (7)	<i>ECO</i>							

**Tabla 7.** Formato de encuesta diaria realizada después de cada turno de conducción.

## **5 CREACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Este apartado describe con detalle cómo se registran, depuran y validan los datos de conducción para la creación de la base de datos que servirá de base para su posterior análisis. La creación de la base de datos conlleva un proceso de descarga, integración y limpieza de los datos registrados.

Posteriormente, en base a la aplicación de ciertos filtros, se eliminan los datos de conducción erróneos para garantizar la validez de la información registrada.

## 5.1 Creación de la base de datos

Para la creación de la base de datos se procesan todos los datos recolectados en la etapa anterior a través del programa "R" (<https://www.r-project.org/>). Este programa permite ordenar y visualizar de forma amigable los datos registrados en el OBD-key. Además, permite realizar operaciones internas con los datos registrados por lo que facilita las labores de análisis de la base de datos. Esto ha permitido que los datos de conducción se hayan analizado con la misma precisión con la que fueron captados, es decir segundo a segundo.

Unificando todas las variables obtenidas y utilizando el software R, se han unido todos los datos en una única base de datos inicial compuesta por todos los viajes realizados, cada uno caracterizado por 128 variables descritas en el apartado 5.1.3.

Posteriormente, a través de Google Geo, conociendo la posición instantánea registrada por el OBD-key preinstalado en los vehículos, se ha obtenido la pendiente de la ruta y en consecuencia, se ha podido evaluar el consumo de combustible utilizando el modelo Vehicle Specific Power (VSP), descrito en el apartado 5.1.4.

### 5.1.1 Obtención de datos

Primero es necesario descargar todos los datos brutos a los ordenadores locales. A continuación se describen las 3 fuentes de información que contenían los diferentes tipos de datos.

1. OBD-Key. Estos dispositivos están conectados a los automóviles y permiten a los usuarios descargar la información de todos los viajes a través de la aplicación móvil TORQUE (<https://torque-bhp.com/>). En la figura 12 se adjunta una captura de la aplicación TORQUE, donde se puede visualizar la lista de todos los viajes registrados por el dispositivo OBD instalado en los vehículos experimentales.

Date	Vehicle/Profile	Readings	Action
26-May-2017 18:16	&profileFuelType=0	841	⊖
26-May-2017 18:16	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 17:49	&profileFuelType=0	792	⊖
26-May-2017 17:49	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 17:29	&profileFuelType=0	1116	⊖
26-May-2017 17:29	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 17:13	&profileFuelType=0	927	⊖
26-May-2017 17:13	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 16:48	&profileFuelType=0	854	⊖
26-May-2017 16:47	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 16:34	&profileFuelType=0	787	⊖
26-May-2017 16:33	&profileFuelType=0	5	⊖
26-May-2017 16:17	&profileFuelType=0	904	⊖
26-May-2017 16:17	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 16:03	&profileFuelType=0	799	⊖
26-May-2017 16:03	&profileFuelType=0	4	⊖
26-May-2017 15:37	&profileFuelType=0	1443	⊖
26-May-2017 14:28	&profileFuelType=0	1773	⊖
26-May-2017 14:28	&profileFuelType=0	4	⊖

FIGURA 12. Vista en TORQUE de todos los viajes registrados en el OBD.

Seleccionando uno de los archivos se puede tener una visión general del viaje incluyendo la ruta, el punto de inicio y final (Figura 13), y posteriormente se puede descargar el archivo del viaje. Esta visualización permite identificar y limpiar los viajes con pocos datos o datos erróneos.

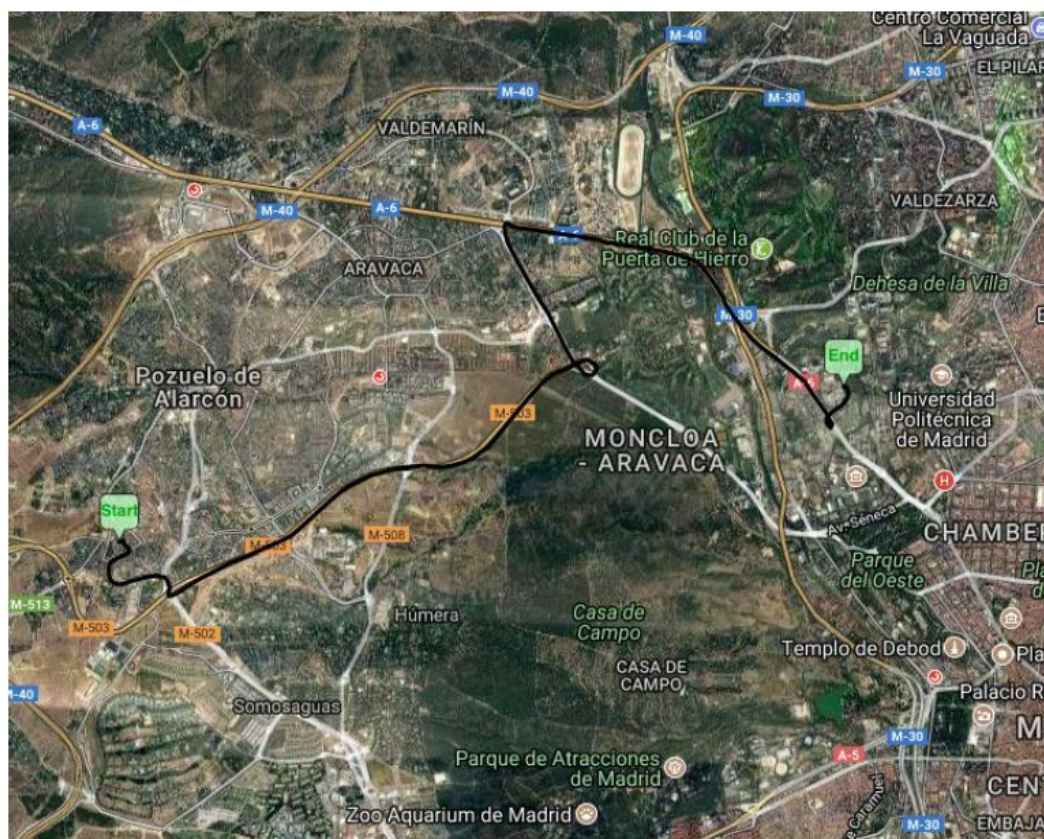


Figura 13. Ejemplo de ruta.



2. Google Geo. Esta herramienta permite obtener datos de la elevación y el nombre de la vía que interviene en cada ruta de conducción, con el fin de evaluar el consumo de combustible mediante el método VSP (<https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/start>)

3. Datos de tráfico. Los datos de tráfico como la intensidad media diaria (IMD) y el porcentaje de vehículos pesados en cada vía se obtuvieron de la Comunidad de Madrid, Ayuntamiento de Cáceres y del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana.

### 5.1.2 Integración y filtrado de datos

Después de descargar los datos de cada viaje, es necesario integrarlos en un solo archivo para seguir procesándolos y limpiándolos. Para realizar esta labor se emplea el software de "R Studio".

La integración de datos se realizó de acuerdo con el tiempo registrado. Cada viaje contiene la información de longitud, latitud, velocidad, GPS, rpm, tiempo de viaje, velocidad, etc. Se creó un solo archivo para investigar todos los datos mencionados y se ordenó por su hora de salida.

Para llevar a cabo la limpieza de los datos y eliminar errores se implantan tres reglas que se deben cumplir de forma simultánea:

i) El rango de tiempo de viaje no debe ser superior a 3 segundos, es decir  $t_{i+1} - t_i \leq 3$  s

ii) El rango de aceleración debe estar entre -3 y 3, es decir  $-3 \text{ m/s}^2 \leq a_{i+1} - a_i \leq 3 \text{ m/s}^2$ .

iii) La diferencia de distancias en el viaje debe ser distinta de cero. Si fuera igual a 0, se elimina el viaje. Por otro lado, si la distancia no es igual a 0, pero la diferencia de velocidad del GPS es 0, también se elimina el viaje, es decir  $d_{i+1} - d_i \neq 0$  m y  $v_{i+1} - v_i \neq 0$  m/s.

### 5.1.3 Cálculo de variables

El archivo integrado registra la posición instantánea, la velocidad, la aceleración, el consumo de combustible (l/s hasta un nivel de precisión de cinco dígitos significativos) y las revoluciones por minuto (rpm) por segundo de cada viaje.

Una vez filtrados los errores de los distintos viajes, se procesaron los registros restantes para obtener los valores de las 128 variables de cada viaje, calculados de acuerdo con la literatura (Ericsson, 2001; Smit et al., 2007; Greenwood et al., 2007 y Beusen et al., 2009).

Partiendo de los valores de velocidad instantánea registrados, se pueden calcular otras variables que caracterizan cada viaje como la velocidad máxima, la velocidad media, la aceleración máxima, la desaceleración máxima, el número de paradas, etc., y otros valores derivados estadísticamente como la desviación estándar, el percentil 95, entre otros. También se calculan los tiempos de parada al ralentí, las rpm promedio y otras variables del motor, útiles para el análisis sobre el consumo de combustible y las emisiones.

En la Tabla 8 se adjuntan algunas de las variables registradas y calculadas en el experimento.

VARIABLES BASE DE DATOS	DESCRIPCIÓN	FORMATO	RANGO DE VALOR	UDS
File ID	ID fichero, tipo de vehículo (A/F), día y tiempo de reparto	NUM		
Vehicle	ID vehículo	NUM	Astra=1; Fiat=2	
Route	ID rutas	NUM		
Roads	Nombre de carreteras	TXT		
Duration	Duración viaje en HH:MM:SS	TIME		s
Error	Fallos en viaje	NUM	1: Fallo GPS 2: Fallo OBD 3: Desvío	
Eco-driving	Si es un día de eco-conducción es 1	NUM	1: eco 0: no eco	
Kilometer	Distancia grabada por OBD	NUM		kilómetro
driver ID	Nombre del conductor	NUM	1 to 12	
copiloto ID	Nombre del copiloto	NUM	1to 12	
Incident	Incidentes como accidente, retención..	TXT		
Weather	Tiempo (clima) en el día de recorrido	NUM	Sol=1; Lluvia=2; Viento=3; Otros=4	
Aire condition	Aire acondicionado activo	NUM	0: Off; 1: On	
Temperature outside	Temperatura fuera del coche	NUM		°C
Temperature inside	Temperatura dentro del coche	NUM		°C
date	Día que se registra	Date		
weekday	Día de la semana	NUM		
start_time_s3	Tiempo de inicio del viaje con datos filtrados	NUM		
end_time_s3	Tiempo de finalización del viaje con datos filtrados	NUM		
max_speed	Velocidad máxima	NUM		km/h
avg_speed	Velocidad media	NUM		km/h
avg_rpm	Rpm medias	NUM		rev/min
max_rpm	Rpm máximas	NUM		rev/min
max_acc_pos	Aceleración positiva máxima	NUM		m/s <sup>2</sup>
ave_acc_pos	Aceleración media positiva	NUM		m/s <sup>2</sup>
V95	Percentil 95 de la velocidad instantánea registrada	NUM		Km/h
sum_fc	Sumatorio de consumo de combustible utilizando el modelo VSP	NUM		litro/s
avg_fc	Promedio de consumo de combustible utilizando el modelo VSP	NUM		litro/s
sum_co2	Sumatorio de CO <sub>2</sub> utilizando el modelo VSP	NUM		g/s
avg_co2	Promedio de CO <sub>2</sub> utilizando el modelo VSP	NUM		g/s
max_slp_pos	Pendiente máxima positiva	NUM		m/m
max_slp_neg	Pendiente máxima negativa	NUM		m/m
avg_slp	Pendiente media	NUM		m/m

**Tabla 8.** Muestra de las variables más destacadas calculadas en la campaña de colección de datos.

El consumo de combustible se ha llevado a cabo a través del modelo VSP. El modelo VSP permite a partir de los parámetros de conducción (velocidad, aceleración y pendiente), calcular la energía total

consumida para a partir de este dato, estimar los consumos de combustible y predecir las emisiones de CO<sub>2</sub>. El empleo de VSP para la caracterización de emisiones fue desarrollado por Jiménez-Palacios (1999) y desarrollado como parte del simulador de emisiones de vehículos de motor (MOVES) de la Agencia de Protección Ambiental estadounidense (ASEPA, 2012).

#### 5.1.4 Modelo VSP

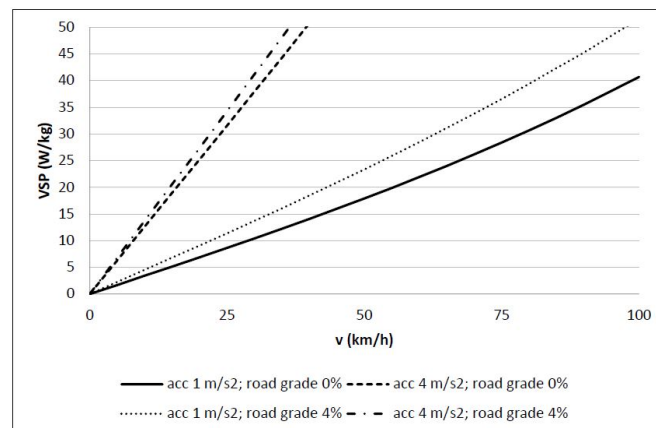
Durante la campaña de recolección de datos, se registraron datos sobre posiciones GPS y velocidad instantánea con la llave OBD preinstalada en cada vehículo. Los valores de consumo obtenidos con este dispositivo resultaron ser diferentes al consumo real registrado con los tickets de las gasolineras. Por lo tanto, después de una etapa inicial de procesamiento de datos con programación “R”, se calculó el consumo instantáneo de combustible sobre la base del modelo VSP-Vehicle Specific Power. El modelo caracteriza vehículos y perfiles de conducción utilizando datos de ensayos reales, por lo que está ampliamente validado. VSP representa la relación entre las demandas de potencia del vehículo y su masa, por lo que se puede utilizar para diferentes tipos de vehículos (diésel, gasolina y eléctricos). Dada la velocidad instantánea, la aceleración y la pendiente de la carretera, este modelo muestra las demandas instantáneas de potencia del vehículo de acuerdo con la Ecuación 1 desarrollada por Jiménez-Palacios:

$$VSP \left[ \frac{W}{kg} \right] = \frac{Power}{Mass} = \frac{\frac{d}{dt} (E_{kinetic} + E_{potential}) + F_{rolling} * v - F_{aerodynamic} * v}{m} =$$

$$= v(1.1 * a + 9.81 * grade + 0.132) + 3.02 * 10^{-4} * v^3 \quad (1)$$

en la que: *VSP* es la potencia específica del vehículo (W/kg), *E<sub>kinetic</sub>* es la energía cinética (J); *E<sub>potential</sub>* es la energía potencial (J); *F<sub>rolling</sub>* es la fuerza de resistencia a la rodadura (N); *F<sub>aerodynamic</sub>* es la fuerza de resistencia aerodinámica (N); *v* es la velocidad instantánea (m/s); *m* es masa (kg); *a* es la aceleración (m/s<sup>2</sup>) y *grade* es la pendiente de la carretera (m/m).

VSP depende por tanto de la velocidad, la aceleración y la pendiente. Como se muestra en la Figura 14, una pendiente superior requiere una mayor potencia y por tanto un mayor consumo. El mismo efecto ocurre con los incrementos en velocidades o aceleraciones. Por otro lado, si la aceleración o la pendiente aumentan para una cierta velocidad, también se requiere un mayor consumo de energía.



**Figura 14.** Valor VSP para diferentes pendientes, velocidades y aceleraciones.

Se calculó el VSP (W/Kg) por segundo de conducción y se asoció a un “modo VSP”, que se corresponde a un cierto intervalo de requerimientos de potencia (Tabla 9), (Faria et al. 2017). El modo VSP define la posible combinación de diferentes condiciones de conducción y de la carretera.

VSP (Potencia Específica del Vehículo)	Modo VSP	Condiciones de conducción y carretera
< -2	1	Pendiente negativa, sin aceleración
[-2, 0)	2	
[0, 1)	3	Baja aceleración para incrementos moderados de velocidad
[1, 4)	4	
[4, 7)	5	Aceleraciones rápidas para alcanzar altas velocidades
[7, 10)	6	
[10, 13)	7	
[13, 16)	8	
[16, 19)	9	
[19, 23)	10	
[23, 28)	11	

**Tabla 9.** Correlación entre VSP (potencia requerida en W/kg) y "modo VSP".

El modo VSP establece rangos de conducción de bajo a alto consumo de energía. Los modos VSP 1 y 2 significan valores VSP negativos. Estos valores se obtienen cuando el automóvil circula por una pendiente negativa y el acelerador no está pisado. El modo VSP 3 significa pequeños valores positivos, lo que rara vez ocurre, ya que las velocidades pequeñas suelen estar relacionadas con grandes aceleraciones/desaceleraciones. El modo VSP 4 es uno de los modos que ocurren con mayor frecuencia, ya que tiene la relación más común entre velocidad y aceleración. Finalmente, los modos VSP 5 a 11 implican mayores aceleraciones y velocidades, por lo que suelen ocurrir con menos frecuencia, al circular por un tramo con pendiente o al adelantar a otro coche o camión.

Una vez obtenido el modo VSP correspondiente por segundo, cada uno de ellos puede correlacionarse con el consumo de energía según el motor del vehículo y su segmentación. A partir de estos valores y los de los vehículos ligeros se puede estimar el consumo de combustible con la relación 1 l gasolina = 32,2 MJ y 1 l diésel = 35,9 MJ (Davis et al., 2019). A la luz de este modo VSP, Coelho et al. (2009), calcularon las tasas de emisión de CO<sub>2</sub> para automóviles de gasolina y diésel similares a los empleados en este experimento. Sus resultados se muestran en la Tabla 10.

Modo VSP	Consumo de energía (10 <sup>-3</sup> MJ/s)	Consumo de combustible instantáneo (10 <sup>-4</sup> l/s)		Emisiones CO <sub>2</sub> (g/s)	
		Petrol	Diesel	Petrol	Diesel
1	4,0	1,244	1,116	0,63	0,21
2	6,0	1,866	1,674	1,015	0,61
3	6,6	2,053	1,841	1,02	0,73
4	20,0	6,220	5,580	2,07	1,50
5	27,0	8,397	7,533	2,79	2,34
6	37,0	11,507	10,323	3,47	3,29
7	46,0	14,306	12,834	4,31	4,20
8	54,0	16,794	15,066	5,19	4,94
9	64,0	19,904	17,856	5,81	5,57
10	73,0	22,703	17,856	6,43	6,26
11	88,0	27,368	20,367	7,37	7,40

**Tabla 10.** Correlación entre modo VSP, consumo de energía, consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>

Utilizando esta metodología y aprovechando la cantidad de datos de conducción reales registrados (recopilados cada segundo), se puede evaluar cómo el comportamiento de la conducción influye en el consumo de combustible y las emisiones. Esto permitió asociar las emisiones con las diferentes rutas involucradas, así como el consumo de combustible y la eficiencia de la conducción ecológica según el tamaño de la ciudad.

## 5.2 Validación de la base de datos

La base de datos incorporada se validó eliminando aquellos viajes que no cumplían con alguno de los siguientes criterios.

- a) Viajes con posición GPS perdidos parcial o totalmente
- b) Viajes con registros de revoluciones por minuto erróneas
- c) Viajes con duraciones reales no registradas por completo
- d) Viajes con fallos en los tiempos registrados

### 5.2.1 Caso en Madrid

Se registraron 1.001 viajes y una realizado todos los filtros, se validaron un total de 797 viajes para el estudio. Por tanto, de la base de datos inicial, se eliminaron un total de 204 viajes (21%):

- 39 viajes se han cancelado debido a un fallo del GPS.
- Se han eliminado 69 viajes por falta de datos de RPM.
- Se han eliminado 57 viajes ya que la duración de los viajes es significativamente mayor o menor que la duración real del viaje.
- Se cancelaron 39 viajes debido a la pérdida de datos.

### 5.2.2 Caso en Cáceres

Después de filtrar todos los 580 viajes registrados debido a varios errores descubiertos, finalmente hay 476 viajes disponibles para su estudio. Por tanto, de la base de datos inicial, se eliminaron un total de 104 viajes (19%):

- Se han cancelado 30 viajes debido a un fallo del GPS
- Se han eliminado 16 viajes ya que faltan los datos de RPM.
- Se han eliminado 24 viajes ya que la duración de los viajes es significativamente mayor o menor que la duración real del viaje.
- Se han cancelado 34 viajes debido a la pérdida de datos.

Aplicando estas cuatro reglas de filtrado diferentes para cada viaje, se actualizó la base de datos. De igual modo se actuó con el caso de los conductores profesionales, realizando un exhaustivo análisis y filtrado de datos. Además, para evaluar la conducción ecológica en diferentes tipos de carreteras, también se crea una base de datos más detallada (Database\_Section) con variables de nombre de la carretera, tipo de carretera y nivel de servicio. Esta base de datos se dividió por sector de ruta según la categoría de carretera definida. En estos términos se pudo responder a la segunda pregunta de investigación: ¿cómo se ve afectada la eficiencia de la conducción ecológica en función del tramo de

la vía y de los estados del tráfico? Hay que tener en cuenta que el nombre de la carretera de cada viaje se obtuvo de Google Geo utilizando el programa R basado en la posición registrada del GPS (sistema de posicionamiento global). Sin embargo, a través de las pruebas empíricas de GPS se ha demostrado que la precisión media de los receptores GPS estándar alcanza aproximadamente los 15 m en áreas urbanas (Modsching et al., 2006). Con frecuencia fue necesario corregir manualmente el nombre de la carretera registrada. Esta tarea fue la que más tiempo necesitó durante el proceso de validación de la base de datos.

## 6 RESULTADOS DEL ANALISIS DE DATOS

Se describen a continuación los principales resultados obtenidos de las distintas investigaciones realizadas. La mayor parte de ellas están ya publicadas en revistas de impacto revisadas por pares e indexadas en el Journal Citation Report- JCR (véase apartado 8).

### 6.1 Experimento con conductores no profesionales en Cáceres.

Tiene lugar en la ciudad de Cáceres (España). Se realiza con 12 conductores no profesionales (distintas edades y sexo) que conducen por rutas determinadas una semana en su forma habitual y tras un curso de formación en conducción eficiente, otra semana de forma ecológica. Se emplean dos turismos con motores diésel y gasolina. Los datos generales del ensayo realizado en la ciudad de Cáceres se resumen en la tabla 11.

	Vehículo	Km totales recorridos	Ruta 1 Local	Ruta 2 Colector	Ruta 3 Perimetral	Ruta 4 Variante	Total	Hombres	Mujeres
<b>No eco</b>	Astra	1.010	39	35	35	39	<b>148</b>	187	103
	Fiat	1.091	40	34	34	34	<b>142</b>		
<b>Eco</b>	Astra	1.022	41	32	34	38	<b>145</b>	190	100
	Fiat	1.045	37	35	37	36	<b>145</b>		
<b>Total</b>		<b>4.168</b>	<b>157</b>	<b>136</b>	<b>140</b>	<b>147</b>	<b>580</b>	<b>377</b>	<b>203</b>

**Tabla 11.** Distancia recorrida (km), número de viajes por ruta, tipo de vehículo y sexo del conductor.

Los datos que caracterizan la conducción de los distintos conductores se adjuntan en la tabla 12:

Parámetros	Modo de conducción	R1 Local	R2 Colector	R3 Perimetral	R4 Variante
Media rpm	No eco	1.439	1.493	1.584	1.811
	Eco	1.246	1.241	1.267	1.330
Max rpm	No eco	3.506	3.406	3.535	3.740
	Eco	2.787	3.001	3.046	2.879
Max aceleración positiva m/s <sup>2</sup>	No eco	2,31	2,07	2,25	2,66
	Eco	1,86	1,80	2,19	2,24
Max aceleración negativa m/s <sup>2</sup>	No eco	-2,35	-2,31	-2,54	-2,95
	Eco	-2,08	-2,13	-2,26	-2,34
Media aceleración positiva m/s <sup>2</sup>	No eco	0,35	0,36	0,44	0,54
	Eco	0,34	0,34	0,37	0,36
Media aceleración negativa m/s <sup>2</sup>	No eco	-0,41	-0,40	-0,48	-0,57
	Eco	-0,38	-0,37	-0,40	-0,39
Media del número de veces por debajo de 5 km/h	No eco	6,54	4,97	4,97	3,01
	Eco	6,27	4,75	5,10	2,31

**Tabla 12.** Parámetros de conducción antes y después del curso de conducción eficiente.

La figura 15 representa la evolución de la velocidad instantánea en las rutas 1 (local) y 4 (variante) con conducción normal y conducción eco, para poder visualizar las diferencias. La conducción eco en ambos casos produce velocidades menores y más homogéneas. El número de paradas y deceleraciones es mayor en la ruta 1 que en la ruta 4 ya que existe un mayor número de intersecciones y semáforos en su recorrido. Las reducciones de velocidad de la ruta 4 se deben a la presencia de las intersecciones que son todas con glorietas.

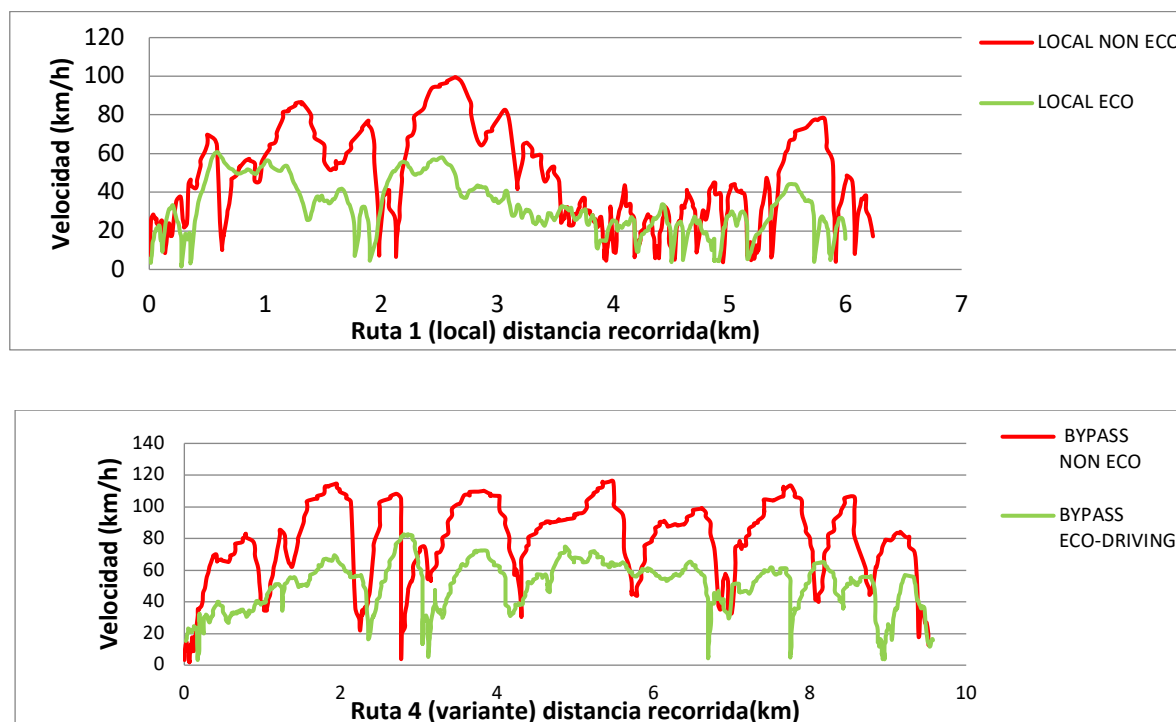


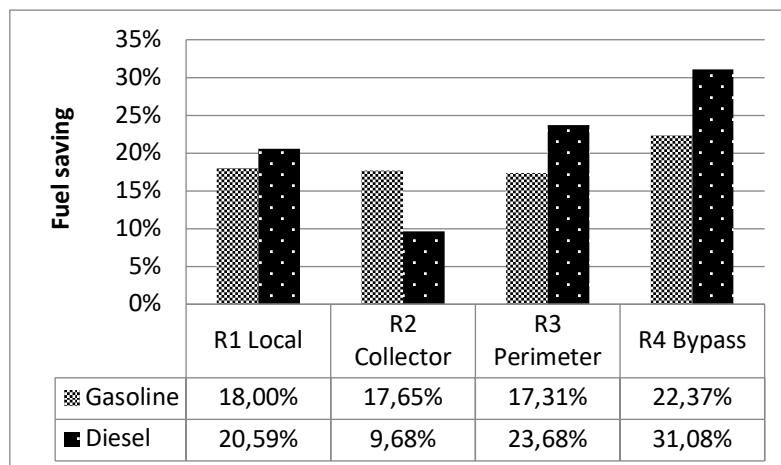
Figura 15. Diferencias entre la velocidad instantánea en dos rutas seleccionadas para los tipos de conducción.

Los datos de consumo validados con los tickets de la gasolinera y las emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas se resumen en la tabla 13:

Vehículo	Parámetro	No-eco				Eco			
		R1 Local	R2 Colector	R3 Perimetral	R4 Variante	R1 Local	R2 Colector	R3 Perimetral	R4 Variante
Fiat (gasolina)	Consumo (l)	0,50	0,51	0,52	0,76	0,41	0,42	0,43	0,59
	Consumo (l/100 km)	8,44	8,03	8,06	7,54	6,96	6,63	6,69	5,84
	Estimación CO <sub>2</sub> (g)	1.173	1.196	1.220	1.783	962	985	1.009	1.384
Astra (diésel)	Consumo (l)	0,34	0,31	0,38	0,74	0,27	0,28	0,29	0,51
	Consumo (l/100 km)	5,76	4,84	5,90	7,39	4,53	4,45	4,56	5,09
	Estimación CO <sub>2</sub> (g)	903	823	1.010	1.966	717	744	770	1.355

Tabla 13. Datos validados de consumo de carburante y emisiones de CO<sub>2</sub>.

Los ahorros obtenidos con la conducción eficiente se incluyen en la figura 16:



**Figura 16.** Ahorro de carburante entre ambos tipos de conducción por ruta y tipo de vehículo.

La conducción eficiente siempre produce ahorros en comparación con la conducción convencional, y más en los vehículos diésel que en los de gasolina. La ruta 4 (variante) muestra la mayor disminución en el consumo, por lo que la conducción ecológica logra mejores resultados con rutas de mayor capacidad y donde se alcanzan mayores velocidades.

Por otro lado, la conducción ecológica provoca una disminución generalizada de las emisiones de CO<sub>2</sub> en todas las rutas. Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen directamente del consumo de combustible, por lo que la mayor disminución corresponde a la ruta 4 (variante) con un ahorro del 31% en diésel y 22% en gasolina. La ruta que menos emisiones de CO<sub>2</sub> produce es la ruta 1 (local) ya que es la ruta de menor consumo de combustible. Por tanto, la ruta local puede considerarse como la ruta más ecológica de las cuatro probadas (eco-ruta). Esto implica que, en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> y para ciudades pequeñas, cuanto más corto es el recorrido, mejores resultados se obtienen tanto en el estilo de conducción ecológico como en la conducción normal.

Por último, se adjunta en la tabla 14 el resultado de las encuestas realizadas a los conductores una vez terminado su turno de conducción.

PREGUNTAS	MODO DE CONDUCCIÓN	RESPUESTAS (%)						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>EL MANEJO LE HA RESULTADO:</b> FÁCIL (1) – DIFÍCIL (7)	Non-eco	72	20	-	4	4	-	-
	Eco	63	31	3	-	3	-	-
<b>EL ENTORNO DE CONDUCCIÓN ERA:</b> FÁCIL (1) – DIFÍCIL (7)	Non-eco	45	29	13	6	7	-	-
	Eco	33	33	14	11	4	4	1
<b>DURANTE LA CONDUCCIÓN ESTABAS:</b> ABURRIDO (1) - ENTRETENIDO (7)	Non-eco	-	1	3	7	13	34	40
	Eco	-	4	8	11	18	31	28
<b>DURANTE LA CONDUCCIÓN ESTABAS:</b> RELAJADO (1) - ESTRESADO (7)	Non-eco	52	27	10	4	6	-	1

**Tabla 14.** Encuestas para conocer la percepción personal de cada conductor.

No hay una diferencia significativa en la dificultad de conducción antes y después de la formación en conducción eficiente. Más del 90% de los conductores consideran que el manejo del vehículo es fácil (puntuaciones 1 y 2). Esto implica que la técnica de conducción eficiente es fácil de aprender y practicar.



El entorno de conducción tiene muy poca influencia, aunque algunos conductores reconocen tener más dificultades en condiciones peores de tráfico y meteorológicas. El 74% de los conductores considera que las circunstancias de conducción son fáciles (puntuaciones 1 y 2) antes de la conducción ecológica, mientras que solo el 66% lo hace después de esta conducción. Alrededor del 5% de los conductores eficientes informaron condiciones de conducción difíciles (puntuaciones 6 y 7).

Los sentimientos de los conductores se modifican con una conducción eficiente. El 74% se siente entretenido antes del entrenamiento ecológico (puntuaciones 6 y 7) frente al 59% después de la conducción ecológica. Por tanto, el 15% de los conductores considera que la conducción ecológica es menos entretenida.

Por último, cabe señalar que la conducción ecológica provoca una disminución del 10% en la relajación de los conductores durante el viaje. El 79% de los conductores están relajados (puntuaciones 1 y 2) antes de la conducción ecológica, en comparación con el 68% que lo están después.

## 6.2 Experimento con conductores no profesionales en Madrid.

Ensayo similar al realizado en Cáceres con los mismos coches diésel/gasolina y otros 12 conductores no profesionales que conducían por rutas determinadas en el extrarradio de Madrid (Pozuelo y Majadahonda). Los datos básicos del experimento se incluyen en las tablas 15, 16 y 17.

SECTOR	VARIABLE	PROMEDIO	DESV. TÍPICA	MÍNIMO	MÁXIMO
<b>CONDUCTORES</b>	<i>Edad</i>	31,7	11,7	23	56
	<i>Años de experiencia</i>	13	11,3	4	38
<b>EXPERIMENTO EN CARRETERA</b> n = 3153	<i>Distancia recorrida (km)</i>	2,33	1,85	0,03	10,27
	<i>Tiempo de viaje (s)</i>	209	157	6	1.533
	<i>Velocidad (km/h)</i>	42,4	24,3	2,8	101,5
	<i>Consumo de combustible (l/100 km)</i>	5,71	1,06	3,98	15,66
	<i>Emisiones CO<sub>2</sub> (g/km)</i>	183,2	33,7	24,2	550,6
	<i>Distancia recorrida (km)</i>	2,36	1,87	0,03	10,27
<b>PERIODO 1 (no Eco)</b> n = 1668	<i>Tiempo de viaje (s)</i>	207	163	6	1.533
	<i>Velocidad (km/h)</i>	43,1	25,0	3,3	101,5
	<i>Consumo de combustible (l/100 km)</i>	5,91	1,24	4,03	12,66
	<i>Emisiones CO<sub>2</sub> (g/km)</i>	189,4	34,6	69,2	550,6
<b>PERIODO 2 (Eco)</b> n = 1485	<i>Distancia recorrida (km)</i>	2,30	1,83	0,09	6,88
	<i>Tiempo de viaje (s)</i>	210	150	15	1383
	<i>Velocidad (km/h)</i>	41,6	23,4	2,8	94,9
	<i>Consumo de combustible (l/100 km)</i>	5,53	0,78	3,97	10,21
	<i>Emisiones CO<sub>2</sub> (g/km)</i>	177,4	33,1	24,2	480,2

**Tabla 15.** Estadísticas descriptivas de datos por sector.

TIPO DE RUTAS	CARRILES Y BARRERAS	VELOCIDAD LÍMITE (km/h)	INTENSIDAD DE TRÁFICO (Vehículos/día)	Nº DE SECTORES DE CARRETERA EN LA BASE DE DATOS
Local	1 o 1x1 sin barrera	30/50	<5.000	1.234
Variante	2x2 separadas con barrera	50	15.000-20.000	330
Interurbana	3x3 o 4x4 con barrera	80/120	45.000-55.000	992
Nacional	4x4 separadas por carril HOV	90/120	>100.000	243

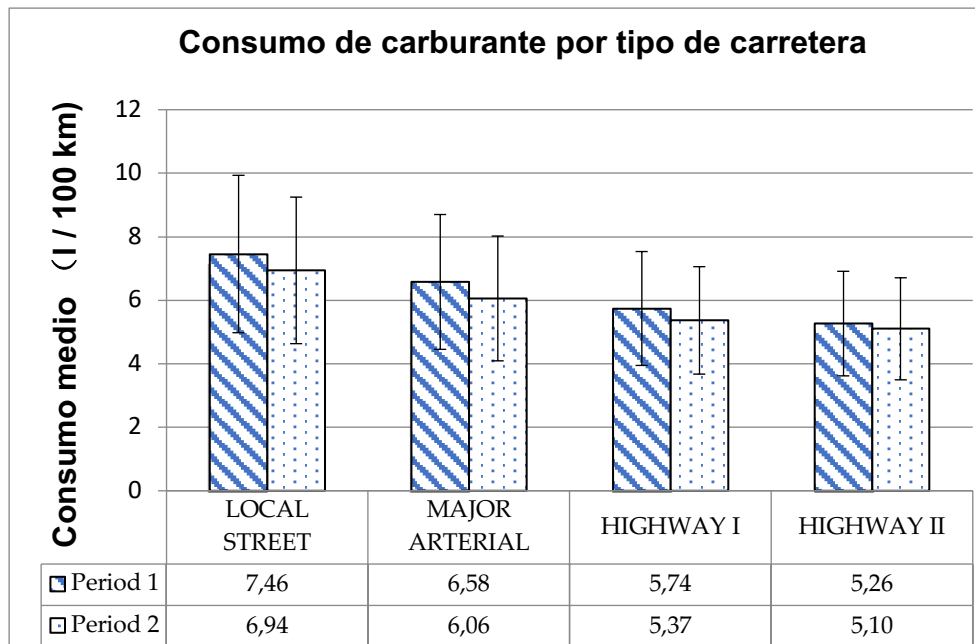
**Tabla 16.** Características de las distintas rutas recorridas.

PERIODO/PARÁMETRO	PERIODO 1 (No Eco)		PERIODO 2 (Eco)		DIFERENCIA
	PROMEDIO	DESV. TÍPICA	PROMEDIO	DESV. TÍPICA	
<b>MUESTRA TOTAL</b>					
Media consumo (l/100km)	5,91	1,24	5,53	0,78	-6,3%
Media emisiones CO <sub>2</sub> (g/km)	189,4	34,6	177,4	33,1	-6,3%
<b>GASOLINA</b>					
Media consumo (l/100km)	6,17	2,43	5,70	2,28	7,6%
Media emisiones CO <sub>2</sub> (g/km)	204,8	68,4	189,2	59,0	7,6%
<b>DIÉSEL</b>					
Media consumo (l/100km)	5,61	2,52	5,35	2,18	4,7%
Media emisiones CO <sub>2</sub> (g/km)	172,6	76,5	164,6	72,2	4,7%

**Tabla 17.** Consumo y emisiones antes y después de la formación en conducción eficiente.

La bibliografía confirma que la selección de vehículos es el factor que más contribuye al ahorro de combustible cuando en comparación con la elección de la ruta y el estilo de conducción; un vehículo puede ser hasta nueve veces más eficiente en cuanto al consumo de combustible que otro (Sivak and Schoettle, 2012). Nuestro estudio utilizó dos vehículos diferentes que se alimentaban de combustibles diferentes pero con una segmentación similar (pequeña y mediana), ambos registrados bajo las normas Euro 5. Sin embargo, se obtuvieron mejores resultados con el coche de gasolina, logrando una reducción media del 7,6% en el consumo medio de combustible, en comparación con un promedio del 4,7% con el vehículo diésel. Con respecto a los conductores, no obstante se cuente solo con 12 conductores, había una cierta heterogeneidad entre los participantes en el experimento: cinco mujeres de entre 24 y 56 años, y siete hombres de entre 23–42. En promedio, los hombres se desempeñaron un poco mejor en la conducción ecológica que las mujeres, logrando un 6% y 4% reducción del consumo medio de combustible, respectivamente, aunque la diferencia de sexo no aparece ser representativo. También comparamos la experiencia de conducción de menos de 7 años con la experiencia de más de 20 años. Mientras que la reducción del consumo medio de combustible fue bastante similar, 5% y 4% respectivamente, los conductores con menos experiencia de conducción en promedio lograron un consumo de combustible instantáneo el 5% menor que los conductores con más de 20 años de experiencia en la conducción, independientemente de si adoptaran la conducción ecológica o no. Por último, es importante subrayar que, siendo una conducta de uso de coche, la conducción ecológica se comporta de forma diferente dependiendo del conductor; considerando los diferentes perfiles de los conductores, el ahorro en el consumo instantáneo de combustible variaba entre el 0 y el 12%. Aunque todos los conductores involucrados en el experimento redujeron su consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>, su comportamiento de conducción cambió positivamente después de participar en el curso de conducción eficiente, adoptando un estilo de conducción más suave y tranquilo.

Por tipo de vía los resultados se representan en la figura 17:



**Figura 17.** Consumo de combustible por tipo de carretera antes y después de la instrucción.

La reducción media en el consumo de combustible que se logró a través de la conducción ecológica fue del 6,3%, lo que por su relación lineal, conlleva la misma caída de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Como muestra la Figura 17, la reducción de combustible que se logró a través de la conducción ecológica varía según el tipo de carretera. Se observan mayores ahorros de combustible y reducción de emisiones a lo largo de las “mayor arterial” (8% de ahorro de combustible). Los conductores tienen un mayor consumo de combustible en las carreteras que en las calles locales como resultado de las altas velocidades. Cuando los conductores tienen menos control del vehículo, hacen que la velocidad y los cambios de marcha varíen frecuentemente para adaptarse a las condiciones de tráfico, lo que explica la mayor desviación estándar del consumo instantáneo de combustible registrado en los sectores de carreteras (tanto en el período 1 como en el Período 2). Las variaciones en el ahorro de combustible entre los cuatro tipos de carretera pueden explicarse por los cambios en los parámetros de rendimiento de la conducción.

La comparativa realizada con los distintos parámetros de conducción registrados antes y después de la formación eco, se adjunta en la tabla 18:

PERIODO/PARÁMETRO	PERIODO 1 (No Eco)		PERIODO 2 (Eco)		DIFERENCIA
	PROMEDIO	DESV. TÍPICA	PROMEDIO	DESV. TÍPICA	
Rpm medias (rpm)	1773	422	1510	365	-14,8 %
Rpm máx. (rpm)	2850	503	2209	428	-22,5 %
Velocidad media (km/h)	43,1	25,0	41,6	23,4	-3,5 %
Velocidad máx. (km/h)	69,1	25,0	63,8	24,0	-7,7 %
Aceleración media (%)	6,50	4,61	4,33	3,24	-33,4 %
Deceleración media (%)	5,69	4,60	3,21	2,70	-43,5 %
V95 (km/h)	65,6	25,0	60,7	23,8	-7 %
V <sub>0</sub> (%)	6,4	11	5,2	10	-18,9 %

**Tabla 18.** Comparativa de los parámetros de conducción antes y después de la formación eco.

Como se puede observar en los resultados de este experimento, la conducción eficiente produce una reducción generalizada de todos los parámetros que influyen en el consumo (velocidades, aceleraciones y rpm).

### 6.3 Análisis multivariado del consumo de combustible relacionado con la conducción ecológica.

El consumo de combustible depende del estilo de conducción y del entorno (tráfico) en cada segmento de la carretera. Para el conjunto de las dos ciudades Madrid y Cáceres, se ha realizado un análisis para identificar los principales factores que influyen en el consumo. La siguiente tabla muestra la asociación de variables y define cuatro factores que explican el 81,7% de las variables de viaje. El primer factor se refiere a las condiciones de "conducción de flujo libre", definidas por mayor velocidad y menor consumo de combustible. El segundo factor, "Comportamiento de conducción ineficiente", se define principalmente por altas desaceleraciones (frenadas) y rpm. El tercer factor corresponde a "situación de congestión", mientras que la cuarta está fuertemente asociada a tramos de carreteras con mucha pendiente y alto consumo de combustible.

VARIABLE	BS	SEs	ts	βs
Velocidad máx.	-0,0019**	0,00	-0.019	-0,20
Velocidad media	0,028**	0,00	-0.028	-0,20
Pendiente media	61,38	1,87	61.38	0,55
Rpm máx.	0,00	0,00	0,00	0,03
Rpm medias	0,00**	0,00	0,00	0,11
Aceleración neg.	-2,37**	0,78	-2,37	-0,12
Nº paradas/km	0,14	0,08	0,14	0,05
Tiempo parada/km	0,02**	0,00	0,02	0,22
Aceleración neg. media	-3,71**	0.61	-3,71	-0,25

\* $p < ,01$

\*\* $p < ,001$

**Tabla 19.** Regresión en el consumo de combustible.

Se utilizó un método de regresión múltiple para examinar el impacto en el consumo de las variables asociadas con los patrones de conducción y las variables externas como la congestión o las pendientes. El análisis reveló una relación fuerte y significativa entre una serie de variables independientes y el consumo de combustible. El análisis de los coeficientes estandarizados beta muestra que el aumento de las pendientes (promedio), la congestión (tiempo de parada por kilómetro) y las rpm (máximas) llevan asociadas un aumento en el consumo de combustible. Por el contrario, una aceleración menor (especialmente la media y en menor medida la desviación estándar) y una mayor velocidad (máxima y media) se asocian con una disminución en el consumo de combustible. El número de paradas por kilómetro, que es otra forma de medir la congestión y las rpm medias no fueron variables significativas.

### 6.4 Eco-ruta en ciudades pequeñas.

En este experimento lo que se analiza es el efecto del tipo de vía atravesada en el consumo de combustible. Todos los registros se refieren a una conducción normal de los conductores no profesionales (sin formación eco) en la ciudad de Cáceres. Los datos del experimento y los parámetros de conducción registrados se adjuntan en las tablas 20 y 21.

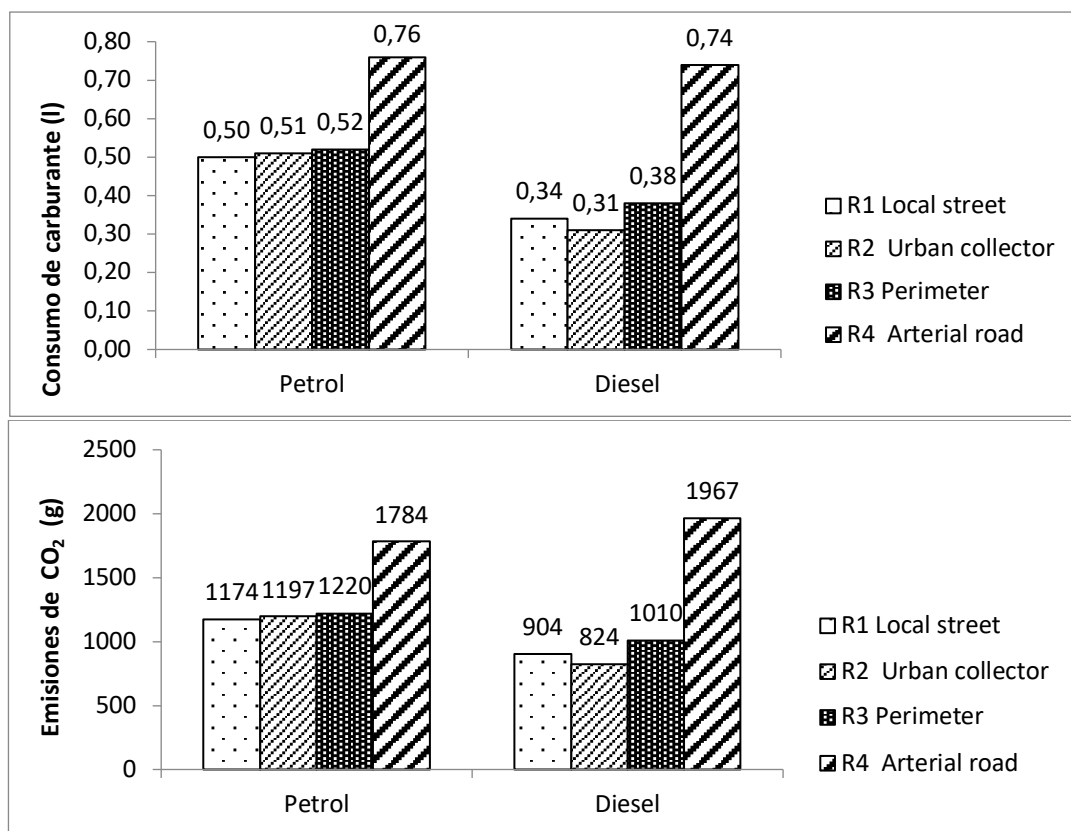
Vehículo	Total km recorridos	Número de viajes				Total	Hombre	Mujer
		R1 Local	R2 Colector	R3 Perimetral	R4 Variante			
Diésel, 1.6 l	1.010	39	35	35	39	148	187	103
Gasolina, 1.2 l	1091	40	34	34	34	142		
Total	2.101	79	69	69	73	290	187	103

**Tabla 20.** Distancia recorrida por tipo de ruta, conductor y vehículo.

Parámetros	R1 Local	R2 Colectora	R3 Perimetral	R4 Variante
Longitud media (km)	6,1	6,7	6,7	10,3
Nº de paradas medio	6,54	4,97	4,97	3,01
Media rpm	1.439	1.493	1.584	1.811
Máx. rpm	3.506	3.406	3.535	3.740
Media de aceleración positiva m/s <sup>2</sup>	0,35	0,36	0,44	0,54
Máx. aceleración positiva m/s <sup>2</sup>	2,31	2,07	2,25	2,66
Media de aceleración negativa m/s <sup>2</sup>	-0,41	-0,40	-0,48	-0,57
Máx. aceleración negativa m/s <sup>2</sup>	-2,35	-2,31	-2,54	-2,95

**Tabla 21.** Parámetros de conducción registrados.

El número de paradas disminuyó con el nivel de servicio de la vía. Esto se debe a que las rutas urbanas tienen numerosos semáforos y pasos de peatones, mientras que la vía arterial (variante) solo tiene algunas intersecciones a nivel con gloriets. Además, las rpm medias y máximas aumentaron con el nivel de servicio, así como las aceleraciones-deceleraciones medias y máximas. Esto puede explicarse por el hecho de que las velocidades de desplazamiento aumentan a medida que aumenta el nivel de servicio. En la figura 18 se adjuntan los resultados de consumo y estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>.



**Figura 18.** Consumo de carburante y emisiones de CO<sub>2</sub> para las diferentes rutas y vehículos.

La figura anterior indica una clara diferencia en el consumo y las emisiones de CO<sub>2</sub> en los recorridos urbanos (calle local, colector urbano y perimetral) con respecto a la circunvalación (vía arterial), ya que

esta alcanza valores superiores en un 34% para el motor gasolina y en un 54 % para el diésel. Además, el consumo en rutas urbanas fue un 27% menor en motores diésel que en gasolina. En la vía arterial (variante) el consumo fue similar para ambos motores.

#### 6.5 Efectos de la eco-conducción en función del tipo de vía recorrida.

En el experimento de Cáceres, se realizó una regresión múltiple para por un lado estructurar jerárquicamente los factores de conducción y del entorno de la carretera y por otro, examinar el efecto de estos factores sobre el consumo de combustible. El resumen del modelo y los coeficientes de la regresión múltiple se adjuntan en las tablas 22 y 23.

Sumario del modelo de regresión						
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estimado estándar	Cambio estadísticas R cuadrado corregido	F corregido
1	0.911b	0.830	0.826	0.882	0.830	232.102

**Tabla 22.** Resumen del modelo de regresión.

Coeficientes					
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	
		B	Error estándar	Beta	t
1	(Constante)	7.381	0.388		19.007
	Velocidad máxima	-.030	0.005	-0.225	-6.309
	Velocidad media	-.051	0.010	-0.245	-4.930
	Pendiente media	61.522	1.858	0.708	33.109
	Rpm medias	0.001	0.000	0.169	4.104
	Rpm máximas	0.000	0.000	0.079	2.340
	Desviación típica Ac. Negativa	-4.229	1.008	-0.223	-4.196
	Nº paradas	0.338	0.124	0.107	2.729
	Tiempo de parada superior a 5 s	0.013	0.006	0.094	2.341
	Aceleración negativa media	-5.163	0.922	-0.342	-5.602

**Tabla 23.** Regresión en el consumo de combustible.

El análisis reveló una relación fuerte y significativa entre unas variables independientes y el consumo de combustible. El análisis de los coeficientes estandarizados beta muestra que el consumo de combustible se ve fuertemente afectado por la pendiente de la carretera. Además, el aumento de la congestión (tiempo de parada y número de paradas) y de las rpm (máximas) produce un aumento en el consumo de combustible. Por el contrario, una menor aceleración negativa (especialmente la media y la desviación típica), y una mayor velocidad (máxima y media) lleva asociada una disminución del consumo de combustible a lo largo del viaje en zonas urbanas. El número de paradas por kilómetro y otros parámetros de congestión no fueron variables significativas.

#### 6.6 Eficacia de la conducción eficiente en función de las características del conductor.

Este análisis se lleva a cabo también con los datos de la ciudad de Cáceres. El rendimiento de la conducción se estudia a partir de los siguientes parámetros de conducción que se han registrado en el OBD-Key: rpm máximas (max\_rpm), aceleración negativa media (ace\_acc\_neg), velocidad máxima (max\_speed), coeficiente de variación de velocidad como relación entre la desviación estándar y el % medio (cov) y el consumo medio de combustible con el modelo VSP (avg\_fc).

Estos parámetros se han medido para cada conductor en modo normal y en modo eco, evaluando posteriormente el porcentaje de reducción entre ellos. Los resultados se pueden ver en la tabla 24.

		sex	INCREASE					age	driving experience
			max_rpm	ave_acc_neg	max_speed	cov	avg_fc		
Group1 Easy-Relaxed	Pablo	Male	-9%	-9%	-20%	-5%	-10%	31	3
	Yolanda	Femail	-14%	-32%	-13%	-8%	-10%	41	20
Group 2 Easy-Stressed	Cristina	Femail	-22%	-27%	-21%	-17%	4%	25	6
	David	Male	-29%	-34%	-25%	-17%	-13%	27	7
	Isabel	Femail	-23%	-33%	-22%	-16%	-10%	31	12
	Jose María	Male	-25%	-15%	-19%	-14%	-7%	21	3
	Marta	Femail	-15%	-20%	-15%	-10%	0%	44	22
Group 3 Diff-relaxed	Eduardo	Male	-14%	-28%	-20%	-5%	-10%	24	3
	Ignacio	Male	-36%	-39%	-33%	-17%	-20%	28	8
Group 4 Diff-Stressed	Jesús Oliden	Male	-29%	-17%	-18%	-6%	-7%	23	5

**Tabla 24.** Variación de parámetros de conducción en función del tipo de conductor.

Estos resultados se han agrupado para los cuatro grupos de conductores que se muestran en la tabla 25:

	max_rpm	ave_acc_neg	max_speed	cov	avg_fc	avg_age	avg_driving experience
Group 1 Easy-Relaxed	-12%	-21%	-17%	-7%	-10%	36	12
Group 2 Easy-Stressed	-23%	-26%	-20%	-15%	-5%	30	10
Group 3 Diff-relaxed	-25%	-34%	-26%	-11%	-15%	26	6
Group 4 Diff-Stressed	-29%	-17%	-18%	-6%	-7%	23	5

**Tabla 25.** Valores medios de cada variable para cada grupo de conductores.

A continuación, se analiza la variación de cada uno de los parámetros de conducción para los diferentes grupos entre el estilo de conducción normal y la conducción ecológica.

1. Revoluciones máximas por minuto. Existe una disminución de las revoluciones máximas en todos los grupos, siendo mucho más significativa en los grupos que tienen mayor dificultad para conducir el vehículo y consideran más difíciles las circunstancias de conducción. Además, esta disminución de las revoluciones máximas es mayor en grupos con conductores más jóvenes y con menos años de experiencia de conducción.

2. Aceleración negativa media. Las aceleraciones negativas (frenadas) se reducen en todos los grupos, en valores cercanos al 25% ya que una conducción eficiente evita en la medida de lo posible el uso del freno y siempre que las condiciones de seguridad vial lo permitan. La reducción en la tasa de frenado entre los 4 grupos es bastante uniforme, excepto para el grupo difícil-relajado que frenaron un 34% menos. Los dos conductores de este grupo mostraron una menor dificultad en el segundo período por estar más familiarizados con el vehículo y las condiciones de conducción.

3. Velocidad máxima. La velocidad máxima es otro factor clave que se correlaciona con el consumo de combustible. Todos los grupos redujeron la velocidad máxima en el período de conducción ecológica y la diferencia entre los grupos es relativamente pequeña.

4. Coeficiente de variación de velocidad (cov). El cov es la variación de velocidad comparada con la velocidad promedio durante el viaje y disminuye con los conductores que son capaces de mantener la

velocidad constante. Considerando los cambios entre los cuatro grupos, el grupo “fácil” obtuvo un mejor resultado para mantener una velocidad constante en comparación con los grupos “difíciles”.

5. Consumo medio de combustible con el modelo VSP. Este parámetro utilizado para el análisis es el consumo medio de combustible por segundo que no tiene en cuenta la influencia del tráfico actual. Los resultados muestran que los conductores relajados reducen el doble de consumo de combustible cuando practican la conducción ecológica que el grupo estresado.

#### 6.7 Influencia del tamaño de una ciudad en la eficacia de la eco-conducción.

Se trata de una investigación que compara los resultados de las 2 ciudades (Madrid y Cáceres) para ver el efecto del tamaño de una ciudad en la conducción eficiente. Para ello se seleccionaron solo los tramos de ruta que eran comunes a ambas ciudades, es decir las rutas locales y las arteriales. El cuadro resumen de los datos analizados se incluye en la tabla 26.

Tipo de carretera	No eco (periodo 1)			Eco (periodo 2)		
	Diésel	Gasolina	Total km	Diésel	Gasolina	Total km
Local	1.592	1.802	3.394	1.698	1.616	3.314
Arterial	758	773	1.531	829	692	1.521
Total km por periodo			4.925			4.835
Total km conducidos				9.760		

**Tabla 26.** Km recorridos por vehículo, tipo de carretera y periodo de conducción.

Los 9.760 km recorridos se han distribuido de forma homogénea entre estilos de conducción eco y non eco. Sin embargo, este equilibrio no se mantiene en el tipo de carretera recorrida ya que el 69% se ha hecho en calles locales y el 31% en arteriales. Esta diferencia se debe a que Madrid tiene una mayor proporción de autovías urbanas que Cáceres, que es una ciudad pequeña, donde la mayoría de los itinerarios son locales. Para que la comparación sea correcta y no tenga sesgos, solo se han seleccionado los tramos de carretera que son comunes a ambas ciudades para comparar la eficacia de la conducción ecológica entre ambas.

La figura 19 muestra los perfiles de VSP promedio desglosados por ciudades y tipos de carreteras en el experimento. Los conductores en ambas ciudades estuvieron la mayor parte del tiempo de conducción en los modos VSP 1-4.



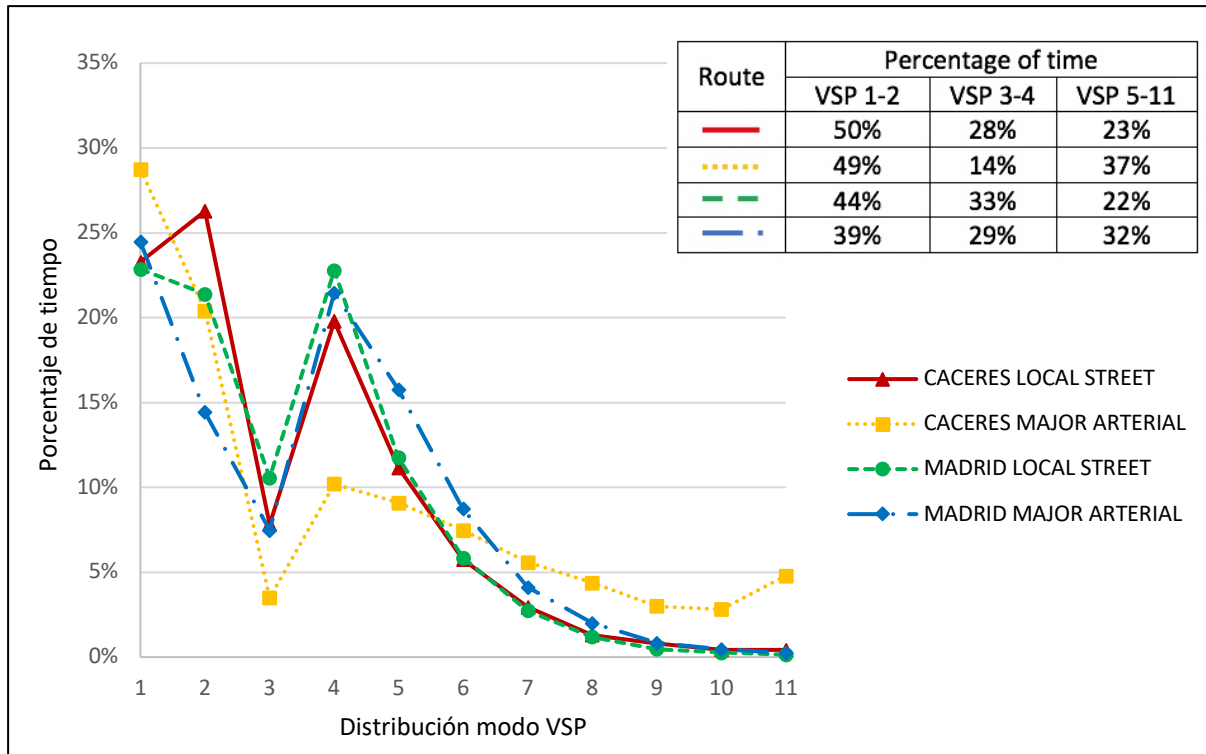


Figura 19. Distribución del modelo VSP para las diferentes rutas y ciudades seleccionadas.

La vía arteria principal de Cáceres muestra un comportamiento diferente al resto de vías, ya que no hay un pico marcado en el modo VSP 4 y hay mayores porcentajes de tiempo en los modos VSP altos (bandas 7-11). Esta diferencia se debe a los límites de velocidad en esta ruta. Las velocidades máximas registradas son superiores al límite de velocidad de la vía (80 km / h).

La figura 20 muestra el consumo medio de energía por kilómetro y la velocidad media para cada vía y tipo de ciudad.

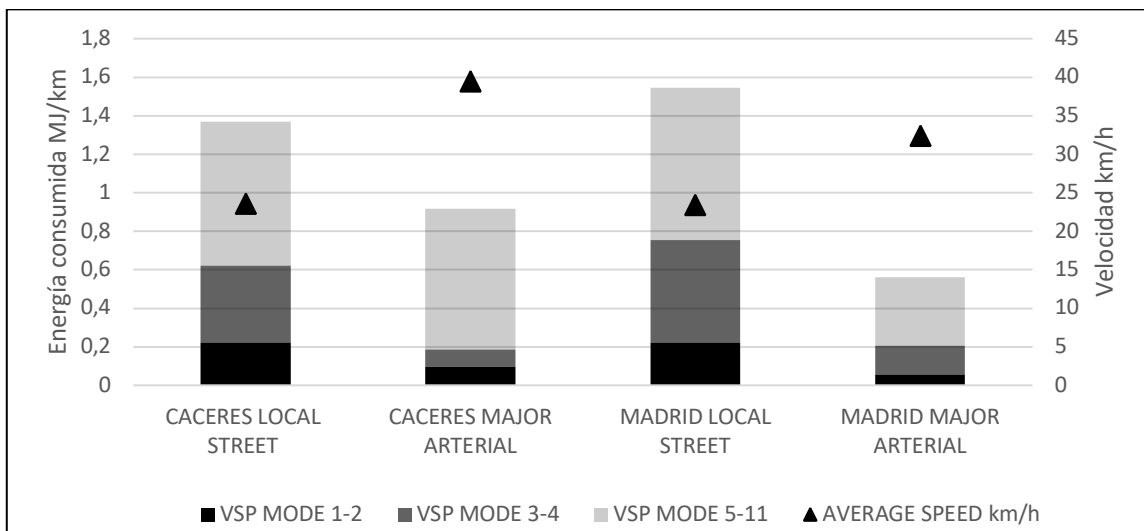


Figura 20. Consumo de energía medio (MJ/km) y velocidad media (km/h) para la ciudad y tipo de ruta.

La figura anterior muestra que las carreteras donde la velocidad media es mayor, se obtienen mejores resultados en el consumo medio de energía. Esto se debe a que una velocidad más baja significa más congestión y, por lo tanto, un mayor consumo de energía.

La arteria principal de Cáceres presenta un alto porcentaje de tiempo (casi un 30%) en modo VSP 1, por lo que los valores medios finales obtenidos para el consumo energético son inferiores a los de las dos rutas locales de Madrid y Cáceres. Sin embargo, mostró un consumo de energía superior al registrado en la arteria principal de Madrid donde el límite de velocidad era de 50 km/h. Por lo tanto, desde una perspectiva de ahorro de energía, restringir la velocidad en carreteras de alta capacidad parece ser una medida eficaz.

Los impactos sobre la conducción ecológica se recogen en la figura 21.

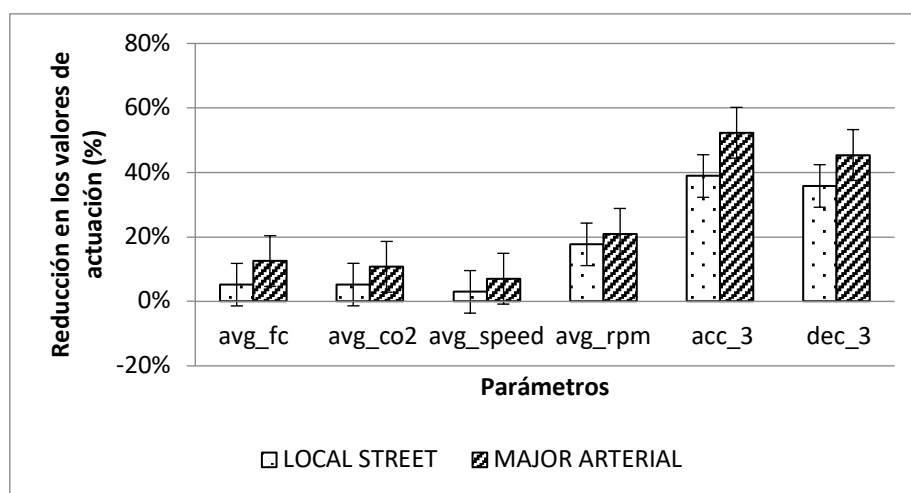


Figura 21. Efectos de la eco-conducción en distintas variables de conducción.

La conducción ecológica provocó importantes reducciones en todos los parámetros de conducción analizados en esta investigación. Los mayores ahorros volvieron a estar vinculados a tramos de mayor capacidad vial, siendo las “arterias principales” las que logran mayores valores de reducción y, por el contrario, las “calles locales” las que obtienen los valores más bajos. Comparando ambas ciudades el consumo y emisiones se refleja en la figura 22.

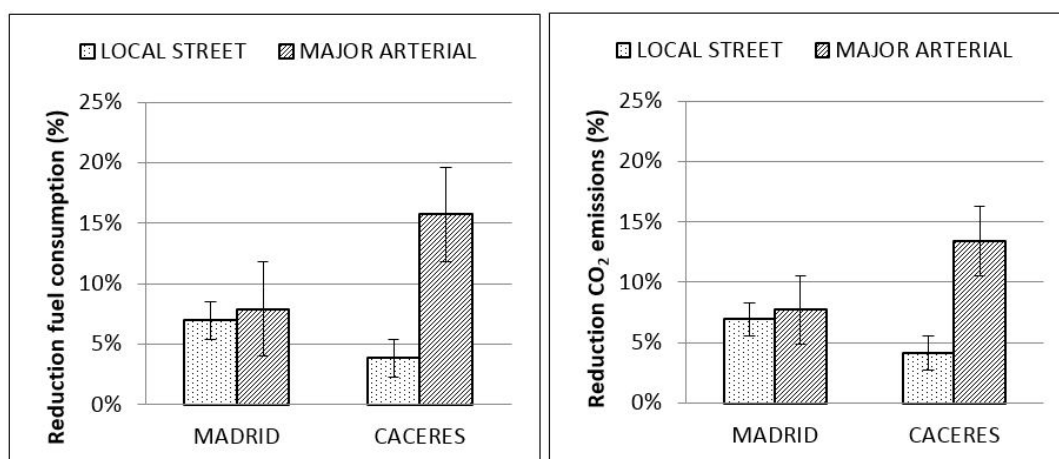


Figura 22. Impacto de la eco-conducción en el consumo de combustible y en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Madrid y Cáceres mostraron reducciones en el consumo y las emisiones de CO<sub>2</sub> para todo tipo de carreteras obteniendo mayores ahorros en las vías de mayor capacidad. Los resultados indican que la conducción ecológica es menos eficaz con el aumento de la congestión urbana. Además, las calzadas

dobles tienen muy buen comportamiento en términos de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> para las principales vías arteriales.

#### 6.8 Experimento de conducción eficiente con conductores profesionales en Cáceres.

Se seleccionan 5 conductores profesionales que conducen 4 furgonetas diésel de la Sociedad Estatal de Correos y Telégrafos S.A. y realizan su trabajo de reparto diario por la ciudad de Cáceres. La primera semana se conduce como lo vienen haciendo de forma habitual y tras una formación en conducción eficiente, la semana siguiente se conduce de forma eco. Los resultados obtenidos se incluyen en la tabla 27:

	<b>Modo conducción</b>	<b>Vehículo 1M</b>	<b>Vehículo 1T</b>	<b>Vehículo 2</b>	<b>Vehículo 3</b>	<b>Vehículo 4</b>
<b>Consumo (l/100km)</b>	<b>No Eco</b>	6,71	6,16	6,15	8,93	5,99
	<b>Eco</b>	6,26	6,18	5,54	8,48	6,95
<b>Ahorro en consumo (%)</b>		6,6	-0,3	9,8	5,0	-16,0

**Tabla 27.** Consumos por conductor profesional y tipo de conducción.

La conducción eco de forma general produjo reducciones de la velocidad media, rpm y aceleraciones/deceleraciones, sin embargo, se redujeron muy poco los valores de consumo instantáneo, por lo que el consumo medio de l/100 km se aumentó con este tipo de conducción. Los conductores que ahorraron combustible registraron patrones de conducción muy similares a la conducción habitual, por tanto, no se puede afirmar que condujeran de forma eficiente.

Se hizo también un estudio por tipo de ruta para ver la influencia de esta en el consumo. En la tabla 28 se representan los resultados obtenidos.

		<b>Local</b>	<b>Colector</b>		<b>Perimetral</b>		<b>Variante</b>		<b>Interurbana</b>
		<b>Ruta 1</b>	<b>Ruta 2</b>	<b>Ruta 3</b>	<b>Ruta 4</b>	<b>Ruta 5</b>	<b>Ruta 6</b>	<b>Ruta 7</b>	<b>Ruta 8</b>
<b>Consumo (l/100km)</b>	<b>No Eco</b>	2,1	2,2	8,8	6,1	8,4	4,6	2,7	4,5
	<b>Eco</b>	2,9	3,1	10,1	6,0	8,4	4,4	2,6	4,2
<b>Ahorro en consumo (%)</b>		-41,3	-36,9	-14,4	1,6	0,0	3,8	0,8	7,4

**Tabla 28.** Consumos por ruta y tipo de conducción.

Las rutas en variante e interurbana son las que arrojan mejores resultados de ahorro de combustible lo que indica que la capacidad de la vía mejora la eficacia de la conducción eficiente.

## 7 CONCLUSIONES

El sector del transporte es el responsable del 20,3% del total de las emisiones de los gases de efecto invernadero en Europa. Se estima que las ciudades representan dos tercios del consumo de combustible en todo el mundo lo que representa un 70% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial. Es previsible que a medida que aumente la población urbana, esta contribución vaya a su vez aumentando. Por lo tanto, es clave fomentar una gestión eficiente de las carreteras potenciando el uso

de tecnologías que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero en las ciudades, implementando modos de conducción de los conductores y decisiones de viaje que tiendan hacia la sostenibilidad. Las ciudades disponen de distintos métodos para conseguir estos objetivos ambientales, pero ninguno de ellos se podrá llevar a cabo con éxito sin la cooperación de los conductores. Las políticas ambientales deben ser aceptadas por los ciudadanos, y algunas de ellas dependen fundamentalmente de su forma de conducir y de la planificación de su viaje. En esta investigación se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, la conducción eficiente o ecológica es una medida de gran potencial para gestionar el tráfico de una carretera en una ciudad, consiguiéndose reducciones importantes en el consumo de combustible.

Las investigaciones realizadas hasta la fecha sobre conducción eficiente se han centrado generalmente en grandes ciudades debido a sus graves problemas de congestión. Sin embargo, las pequeñas ciudades también tienen problemas y deben contribuir al objetivo global de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, en esta investigación se ha analizado tanto el impacto de la conducción eficiente en una gran ciudad como Madrid, como el efecto en una ciudad pequeña como Cáceres, donde los flujos de tráfico no se ven afectados por las horas punta o por la congestión.

Respecto a los resultados obtenidos del experimento para grandes ciudades, en nuestro caso la ciudad de Madrid, se puede concluir que el ahorro de combustible obtenido es de hasta un 6.3% independientemente del tipo de combustible y de la carretera, por lo que se puede afirmar que los cursos de formación de corta duración en conducción ecológica sí tienen efectos significativos en los hábitos de los conductores. Sin embargo, no se puede asegurar que estos efectos inmediatos persistan en el tiempo, ya que los conductores pueden volver, pasado el tiempo, a sus hábitos de conducción convencional.

Los parámetros de conducción analizados en el estudio (revoluciones por minuto máximas y medias, velocidades máximas y medias, máximas aceleraciones y desaceleraciones) varían significativamente entre la conducción convencional y la conducción ecológica. Se comprueba que los conductores conducen más suavemente, aceleran y desaceleran menos agresivamente y se reducen las paradas innecesarias a lo largo del recorrido.

Los mayores ahorros de combustible se producen en las carreteras de circunvalación (8%). En vías locales con alta intensidad de tráfico los conductores tienen más dificultades para aplicar las técnicas de conducción eficiente, ya que ésta depende en gran medida de causas externas que a menudo no se pueden controlar. Pero ya que el coste de implementación de las técnicas de conducción eficiente es muy pequeño, es necesario que en la planificación del transporte por carretera se tenga en cuenta esta medida. Basándonos en los resultados positivos que se han obtenido en este experimento, se hace necesario crear una mayor conciencia del papel que desempeñan los conductores en la limitación de las emisiones de sus vehículos en las diferentes condiciones de tráfico.

De los resultados obtenidos para ciudades pequeñas (Cáceres), se concluye que la conducción eficiente reduce la velocidad máxima de circulación, el número de paradas y aceleraciones en las distintas rutas, manteniéndose los valores de velocidad mucho más uniformes que en la conducción

convencional, lo que lleva a una reducción del consumo de combustible de alrededor del 25% en variantes de población.

Los ahorros son claramente mayores en rutas de circunvalación ya que son más largas y menos dependientes de semáforos y pasos de peatones que las rutas urbanas. Estos ahorros relativos son más altos que los obtenidos en grandes ciudades, debidos fundamentalmente a la menor congestión de las vías. Por el contrario, cuando el conductor está conduciendo de forma ecológica, el tiempo de viaje aumenta de media en un 7.5%. Los resultados son muy diferentes entre las rutas de circunvalación y las otras rutas estudiadas (local, perimetral y colectora). Las rutas de circunvalación son las más rápidas y tienen los niveles más altos de consumo y emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, la conducción eficiente es más efectiva en estas rutas y produce el mayor ahorro de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.

La ruta más ecológica en ciudades pequeñas es la más corta, indicando esto que en ciudades pequeñas no congestionadas el principal parámetro para evaluar la ruta ecológica es la distancia recorrida y no el número de paradas o el tiempo empleado.

En las ciudades pequeñas, eliminar los vehículos del centro de la ciudad mediante vías de circunvalación, mejora la capacidad de servicio de las vías locales e implica reducir el tiempo de viaje por las mismas. Sin embargo, el tráfico por vías de circunvalación conlleva un mayor consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que no son positivos desde un punto de vista estrictamente energético. Se podría plantear la pregunta de qué pasaría si pasaran todos los vehículos por el centro de la ciudad. Para responder a esta pregunta se necesitarían investigaciones que modelen estos efectos tanto a nivel micro como macro. Por tanto, aunque en ciudades no congestionadas la ruta ecológica corresponde a la ruta más corta independientemente del tipo de vehículo o del tiempo empleado, esto podría generar más congestión y empeorar la capacidad de circulación por el centro de la ciudad.

Se ha comprobado mediante las encuestas realizadas a los conductores participantes en el experimento que la conducción eficiente provoca aburrimiento en los conductores, lo que puede hacer que no lo tomen con agrado a pesar del ahorro de combustible y de emisiones de CO<sub>2</sub> que produce.

Los resultados de esta investigación muestran claramente que la gestión eficiente de una carretera pasa por gestionar su tráfico de tal forma que se reduzca el consumo de combustible y consecuentemente las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas. Con una conducción eficiente se obtienen estos objetivos, por lo que las autoridades competentes en gestión de tráfico de las carreteras deberían promover este tipo de conducción entre los ciudadanos, destacando sus efectos beneficiosos. Llevar a cabo acciones de sensibilización para promover la conducción ecológica y seleccionar rutas por las que se emitan menos gases contaminantes a la atmósfera, junto con reducir el acceso de automóviles y las plazas de aparcamiento en el centro de las ciudades, son acciones de gran potencial para alcanzar los objetivos de una ciudad sostenible.

Del análisis realizado en esta investigación respecto a las características del conductor y los resultados obtenidos en los distintos parámetros analizados para valorar la conducción eficiente, se concluye que se reducen los parámetros convencionales fundamentales de conducción de forma generalizada en

todo tipo de conductores, pero se constata que esta reducción es más relevante en aquellos conductores que tienen una menor experiencia de conducción. Por tanto, sería conveniente establecer políticas de formación en conducción eficiente en las autoescuelas para implementar estas medidas en los conductores noveles cuya capacidad de aprendizaje es mucho mayor que en conductores ya experimentados.

En la investigación se han analizado también los efectos de la implementación de la conducción ecológica en conductores profesionales de empresas de reparto de paquetería. Los resultados obtenidos constatan que la conducción eficiente en este tipo de profesionales no supone, de forma generalizada, un ahorro de combustible medio por vehículo. El estrés del trabajador a la hora de realizar la entrega a tiempo en su jornada laboral y los hábitos de conducción previos ya adquiridos podrían ser los factores fundamentales para que los resultados en este tipo de conductores no hayan sido satisfactorios. Sin embargo, cuando los repartos se realizan por vías de mayor capacidad (interurbanas), el análisis de estos micro viajes refleja una tendencia al ahorro de combustible, concluyendo que siempre que sea posible realizar repartos por este tipo de vías, la conducción eficiente sí consigue ahorros en consumo de combustible.

## 8 REFERENCIAS

- Ahn, K.; Rakha, H. Network-wide impacts of eco-routing strategies: a large scale case study. *Transportation Research Part D*, 25, 119-130. 2013.
- Bandeira, J.M.; Almeida, T.G.; Khattak, A.J.; Roupail, N.M.; Coelho, M.C. Generating Emissions Information for Route Selection: Experimental Monitoring and Routes Characterization. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17, 3–17. 2013.
- Barkenbus, J. N. Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy policy*, 38(2), 762-769, 2010.
- Beusen, B.; Broekx, S.; Denys, T.; Beckx, C.; Degraeuwe, B.; Gijsbers, M.; Scheepers, K.; Govaerts, L.; Torfs, R.; Panis, L.I. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transp. Res. Part D Transp. Environ*, 14, 514–520. 2009.
- Boriboonsomsin, K.; Barth, M.J.; Vu, A. Evaluation of driving behavior and attitude toward eco-driving. In *Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, Washington, DC, USA, 23–27 January 2011.
- Boriboonsomsin, K.; Barth, M.J.; Zhu, W.; Vu, A. Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (4), 1694–1704. 2012.
- Boriboonsomsin, K.; Dean, J.; Barth, M. Examination of attributes and value of ecologically friendly route choices. *Transp. Res. Rec.: J. Transportation Research Board*, 2427 (1), 13–25. 2014.
- C2ES, Center For Climate and Energy Solutions. Carbon Capture, 2019. Disponible en: <https://www.c2es.org/content/carbon-capture/>
- Coelho, M.C, Frey, H.C, Roupail, M.N, Zhai,H. and Pelkmans,L. “Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale

measurements". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14, pp. 91–99. 2009.

- Davis, S.C and Boundy, R.G. "Energy Data Book 2019. Edition 37.2". Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. 2019.
- Díaz-Ramirez, J., Giraldo-Peralta, N., Flórez-Ceron, D., Rangel, V., Mejía-Argueta, C., Huertas, J. I., & Bernal, M. Eco-driving key factors that influence fuel consumption in heavy-truck fleets: A Colombian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 258-270, 2017.
- Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad, Ayuntamiento de Madrid. Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid. Disponible en: <https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspeInf/Energia/CC/03Energia/3bMovilidad/ParqueCirculante/Ficheros/EstudioPCMad2013.pdf>
- DGT, Dirección General de Tráfico. Parque de Vehículos por Provincias 2019. Disponible en: [http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/parque\\_2019\\_anuario.xlsx](http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/parque_2019_anuario.xlsx)
- ECOWILL. The golden rules of eco-driving, 2013. Disponible en: [http://cieca.eu/sites/default/files/documents/projects\\_and\\_studies/ECOWILL\\_FINAL\\_REPORT.pdf](http://cieca.eu/sites/default/files/documents/projects_and_studies/ECOWILL_FINAL_REPORT.pdf)
- EEA, European Environment Agency, "National action across all sectors needed to reach greenhouse gas Effort Sharing targets", 2019. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/national-action-across-all-sectors>
- EEA, European Environment Agency, "Transport: increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives", 2020. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/transport/term/increasing-oil-consumption-and-ghg>
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2012. *The Air Pollution Consultant*; New York, 24(3), 1\_17-1\_22. 2014.
- Ericsson, E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transp. Res. Part D Transp. Environ*, 6, 325–345. 2001
- Ericsson, E.; Larsson, H.; Brundell-Freij, K. Optimizing route choice for lowest fuel consumption—potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14 (6), 369–383. 2006.
- Faria, M, Farias, T and Baptista, P. "Driving behavior patterns: Impacts on emissions and safety performance". In *Proceedings of the NECTAR 2017 International Conference*, Madrid, Spain. 2017.
- Fiat, Eco-Drive. "Eco-Driving Uncovered—The Benefit and Challenges of Eco-Driving, Based on the First Study Using Real Journey Data. 2010". 2010.
- Fiori C, Ahn K, Rakha HA. Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: model development and validation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* ; 63:175- 85. 2018.

- Garcia-Castro, A.; Monzon, A. Using Floating Car Data to Analyse the Effects of ITS Measures and Eco-Driving. *Sensors*, 14(11), 21358-21374. 2014.
- Garcia-Castro, A.; Monzon, A.; Valdes, C.; Romana, M. Modelling different penetration rates of eco-driving in urban areas. Impacts on traffic flow and emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 11, no 4, p. 282-294. 2017.
- Greenwood, I.; Dunn, R.; Raine, R. Estimating the effects of traffic congestion on fuel consumption and vehicle emissions based on acceleration noise. *J. Transp. Eng.*, 133, 96–104. 2007.
- Guo, L., Huang; S., Sadek, A.W. An evaluation of environmental benefits of time-dependent green routing in the greater Buffalo–Niagara region. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17 (1), 18–30. 2013.
- Henning, W. Ford-Eco-Driving–Best Practice Training & Evaluation, Improving Fuel Economy, Reducing CO<sub>2</sub>. In *Proceedings of the Ecodriven Final Conference*, Prague, Czech Republic, 12–13 November 2008.
- Hertwich, E. G., & Peters, G. P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis. *Environmental science & technology*, 43(16), 6414-6420. 2009.
- Hornung, W. Summary: Evaluations of Eco-Drive Training courses. Quality Alliance Eco-Drive and Swiss Energy report. Bern, Switzerland. 2004
- IDAE, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. 2011. Disponible en: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11905\\_PAEE\\_2011\\_2020.\\_A2011\\_A\\_a1e6383b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11905_PAEE_2011_2020._A2011_A_a1e6383b.pdf)
- Jimenez-Palacios, J.L.. “Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing”. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, MA, USA, 1998. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/3219/147b53fafde8d4cb816ecf307a1e3eb665d6.pdf>
- Johansson, H. Impact of Ecodriving on Emissions and Fuel Consumption: A Pre-Study; Swedish National Road Administration: Borlange, Sweden. 1999.
- Kobayashi, I., Tsubota, Y. and Kawashima, H. Eco-driving simulation: evaluation of eco-driving within a network using traffic simulation. *WIT Transport on the Built Environment*, Vol 96. 2007.
- Kono, T.; Fushiki, T.; Asada, K.; Nakano, K. Fuel consumption analysis and prediction model for “Eco” route search. In: *15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America’s 2008 Annual Meeting*. 2008.
- Ma, H., Xie, H., Huang, D., & Xiong, S. Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 205-216. 2015.
- Mensing, F.; Bideaux, E.; Trigui, R.; Ribet, J.; Jeanneret, B. Eco-driving: An economic or ecologic driving style? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 110-121. 2013.



- Modsching, M., Kramer, R., & ten Hagen, K. Field trial on GPS Accuracy in a medium size city: The influence of built-up. In 3rd workshop on positioning, navigation and communication (Vol. 2006, pp. 209-218). 2006.
- Network, G. F. Global Footprint. 2017. Disponible en de <http://www.footprintnetwork.org>
- Niu, Dening, and Jian Sun. "Eco-driving versus green wave speed guidance for signalized highway traffic: a multi-vehicle driving simulator study." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 96: 1079-1090. 2013,
- OECD, Organisation for Economic Cooperation and Development and International Transport Forum Working Group. "Greenhouse Gas Reduction Strategies in the Transport Sector". 2010. Disponible en: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/10ghgtrends.pdf>
- Orfila, O., Saint Pierre, G., & Andrieu, C. Gear shifting behavior model for ecodriving simulations based on experimental data. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 341-348. 2012.
- Perez-Prada, F., Monzon, A., & Valdes, C. Managing Traffic Flows for Cleaner Cities: The Role of Green Navigation Systems. *Energies*, vol.10(6), 791. 2017
- Qian, Gongbin, and Edward Chung. "Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation." *Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation* 1-11. 2011.
- Rakha, Hesham A., Ismail Zohdy, and Raj K. Kamalanathsharma. "Agent-based game theory modeling for driverless vehicles at intersections." 2013.
- Sanguinetti, A., Kurani, K., & Davies, J. The many reasons your mileage may vary: Toward a unifying typology of eco-driving behaviors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 73-84. 2017.
- Sivak, M., & Schoettle, B. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, 22, 96-99. 2012.
- Smit, R.; Smokers, R.; Rabé, E. A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. *Transp. Res. Part D Transp. Environ*, 12, 414-422. 2007.
- Stillwater, T., Kurani, K. S., & Mokhtarian, P. L. The combined effects of driver attitudes and in-vehicle feedback on fuel economy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 277-288. 2017.
- Taniguchi, M. A Study on the Effect of Eco-driving Trainings to Fuel Consumption. In *JSAE Autumn Convention Proceedings*, pp. 9-12. 2007.
- UN, United Nations. "Climate Change Conference COP 25". 2019. Disponible en: <https://unfccc.int/cop25>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES): User Guide Version, MOVES2010b (EPA-420-B-12-001b, June 2012) (p. 202). 2012. Disponible en <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/#generalinfo>
- Vermeulen R.J. The effects of a range of measures to reduce the tail pipe emissions and/or the fuel consumption of modern passenger cars on petrol and diesel. TNO report, IS-RPT-033-DTS-2006- 01695. 2006.

- Xia, H.; Boriboonsomsin, K. and Barth, M. “Dynamic eco-driving for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits”. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol 17, no 1, pp. 31–41. 2013.
- Yao, E.; Song, Y. Study on eco-route planning algorithm and environmental impact assessment. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 2014, 17 (1), 42–53. 2013.