D3: REPORT ON LAST-Mile PARCEL DELIVERY BASED ON REAL-ROAD DATA

– Data collection and results analysis

Project acronym :	ECO-TRAFFIC
Project title :	MEDICIÓN Y MODELIZACIÓN DE ECO-DRIVING TÁCTICO Y OPERACIONAL: EFECTOS SOBRE LA REDUCCIÓN DE GEI Y
Funding Scheme :	Plan Estatal
Project start date:	December 2016 / 36 months
Reference:	TRA2016-76485-R
Project web-site :	http://ecotraffic.transyt-projects.es/
Date:	25 October 2020
Status:	**Final**

Research Team of UnEX:

Name	Responsibility
Marta García García	Technical Supervisor and Case Study Collaborator
Jaun Francisco Coloma Miró	Technical assistant and case study Collaborator
Gonzalo Fernández Fernández	Assistant of data analysis

Research Team of TRANSyT-UPM:

Name	Responsibility
Alessandra Boggio-Marzet	Technical assistant and case study collaborator
Andrés Monzón	Project Coordinator

Collaboration Team of CORREOS:

Name	Responsibility
Elena Meruelo	Experiment design and coordination
Raúl Corchado	Experiment Design
Fernando Macarrilla	Director of depot UR1
Juan Antonio Barroso	Director of depot USE
Javier Roberto Montes	Departamento de Operaciones y de Formación
Santiago Muñoz	Experiment design
Santiago Villoria	Experiment Design
Rafael Gosalbez Ortega	Experiment Design

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 8
1.1. NECESIDAD DE LA INVESTIGACIÓN 8
2. OBJETIVOS 17
3. ESTADO DEL ARTE 19
3.1. ECO-CONDUCCIÓN: DEFINICIÓN Y EVOLUCIÓN 20
3.2. ECO-RUTA: DEFICNICIÓN Y EVOLUCIÓN 23
3.3. TRANSPORTE URBANO DE MERCANCÍAS: DESAFÍOS Y CARACTERÍSTICAS 24
3.3.1. Diversidad de actividades 25
3.3.2. Multisectores 26
3.3.3. Varios modos (no motorizados y motorizados) 27
3.3.4. Literatura sobre flotas de mercancías urbanas 31
3.3.5. Vías de investigación 33
4. MATERIAL Y MÉTODO 34
4.1. PRIMERA FASE: RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA ACTIVIDAD DE LOS VEHÍCULOS EN CARRETERA 36
4.1.1. Caso de estudio: Cáceres, España 37
4.1.2. Rutas y condiciones de tráfico 38
4.1.3. Selección de conductores, entrenamiento en eco-driving y fechas 42
4.1.4. Recolección de datos experimentales 43
4.1.5. Medición de variables 43
4.2. SEGUNDA FASE: ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LOS DATOS RECOLECTADOS 45
4.2.1. Creación de la base de datos 46
4.2.1.1. Obtención de datos 46
4.2.1.2. Integración y filtrado de datos 47
4.2.1.3. Cálculo de variables 52
4.2.1.4. Modelo VSP 57
4.2.2. Validación de la base de datos 58
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS 59
5.1. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO GLOBAL 59
5.1.1. Estadísticas generales 59
5.1.2. Parámetros característicos de la conducción. 60
5.1.3. Resultados sobre consumo y emisiones 61
5.1.4. Análisis comparativo por modalidad individual para cada vehículo 62

5.1.5. Estudio de los parámetros característicos de la modalidad de conducción 69
5.2. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO EN MICRO-RUTAS 75
5.2.1. Estadísticas generales en miro-rutas 75
5.2.2. Parámetros característicos de la conducción en micro-rutas 77
5.2.3. Resultados sobre consumo y emisiones relativos a las micro-rutas 78
5.2.4. Análisis comparativo por modalidad individual para cada ruta 78
5.2.5. Estudio de los parámetros de conducción en micro-rutas 83
5.3. ENCUESTA A LOS CONDUCTORES PROFESIONALES PARTICIPANTES 88
5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON EL EXPERIMENTO CON CONDUCTORES NO PROFESIONALES 89
6. CONCLUSIONES 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Resumen de las investigaciones más relevantes sobre eco-conducción (Fuente: "Medición y Modelización de Eco-driving Táctico Y Operacional", Wang, Coloma et al.).* *25*

Tabla 2*. Resumen de estudios previos sobre transporte urbano de mercancías (Fuente: "Medición y Modelización de Eco-driving Táctico Y Operacional", Monzón, Wang et al.).* *31*

Tabla 3. *Estudios de caso anteriores en análisis de flotas de mercancías (Fuente: Schliwa et al., 2015)* .. *34*

Tabla 4. *Características técnicas de los vehículos que desarrollaron el experimento.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 5. *Fase, operador y función del procedimiento utilizado en la investigación para la recopilación de datos.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 6. *Muestra de las variables más destacadas obtenidas en la campaña de colección de datos.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 7. *Distancia recorrida, tiempo de conducción y número de repartos realizados.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 8. *Repartos por zona y por edad realizados en la parte experimental de la investigación.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 9. *Parámetros de conducción para los distintos tipos de vehículo y conducción.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 10. *Estadísticas de consumo y estimación de emisiones de CO_2 para cada vehículo y modalidad de conducción.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 11. *Características de las micro-rutas seleccionadas para estudiar la influencia del tipo de vía en el consumo.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 12. *Estadísticas generales de la investigación en micro-rutas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 13. *Resultados de los parámetros caraterísticos a la modalidad de conducción en microtrips.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 14. *Presentación de los resultados de consumo de combustible y emisiones de CO_2 para las micro-rutas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 15. *Encuesta realizada a los conductores participantes en el experimento.* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 16. *Comparación del entorno entre los dos experimentos (Fuente: Green Eco-Driving Effects in Non-Congested Cities, J.F. Coloma, M. García, Y. Wang & A. Monzón, Sustanability).* ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 17. *Comparación de ahorro en combustible entre los dos experimentos (Fuente: Green Eco-Driving Effects in Non-Congested Cities, J.F. Coloma, M. García, Y. Wang & A. Monzón, Sustanability).* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Proceso entre las flotas de transporte de mercancías de larga distancia y urbana.* *17*

Figura 2. *Cambio en el comportamiento de eco-conducción (García, 2016).* *24*

Figura 3. *Dominio del transporte de mercancías (Fuente: Boerkamps et al., 2000)* *29*

Figura 4. *Diagrama de flujo del proceso metodológico (Fuente: "Metodología Y Modelización De Eco-driving Táctico Y Operacional", Monzón et al., 2016).* *38*

Figura 5*. Panorámica del centro histórico de la ciudad de Cáceres (España).* *40*

Figura 6. *Imagen de una calle tipo local en la que se desarrolló parte del experimento (Fuente: GMaps).* *42*

Figura 7. *Calle tipo colector en la que se desarrolló la parte práctica de la investigación (Fuente: GMaps).* *42*

Figura 8. *Captura de una calle tipo perimetral (Fuente: GMaps).* *43*

Figura 9. *Imagen de una vía variante de población (Fuente: GMaps).* *43*

Figura 10. *Vía interurbana en la que se realizó la conducción para la investigación (Fuente: GMaps).* *44*

Figura 11. *Visión global de las rutas realizadas por uno de los vehículos participantes en la investigación en Cáceres.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 12. *Calendario y time-line de la campaña de colección de datos.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 13. *Una de las furgonetas Renault Kangoo, de la empresa Correos, que participó en la fase experimental.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 14*. Esquematización del procedimiento de obtención y almacenamiento de datos.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 15. *Imagen correspondiente al proceso de filtro y cálculo realizado con la aplicación "R Studio".* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 16. *Captura de uno de los ficheros, en formato de hoja de cálculo,o que recogía los datos en una de sus últimas fases del proceso, donde además se realizaban algunos cálculos.****¡Error! Marcador no definido.***

Figura 17. *Captura del programa "QGis" utilizado para la visualización y conocimiento de los datos instantáneos de los recorridos.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 18. *Comparativa entre las rutas realizadas por el vehículo 1 en las dos modalidades de conducción.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 19. *Visualización comparativa entre la conducción en modo no ecológico y ecológico del vehículo 2.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 20. *Comparación "non-eco" y "eco" de las jornadas de conducción del vehículo 3.****¡Error! Marcador no definido.***

Figura 21. *Comparativa de las modalidades de conducción del vehículo 3. .* ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 22. *Captura y resultados que muestran la comparación del experimento realizado por el vehículo 5* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 23. *Gráfica que representa la media de consumo en l/100 km y el ahorro en combustible de cada vehículo en cada modalidad de conducción.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 24*. Gráfico comparativo sobre las emisiones de CO_2 de los diferentes vehículos en cada modalidad.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 25. *Ficha-resumen comparativa de las modalidades de conducción non-eco y eco-driving en la investigación.*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 26. *Gráfica que representa la V95 de cada vehículo y diferencia entre las modalidades de conducción.*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 27. *Representación comparativa de los valores de velocidad media de cada vehículo en modos non-eco y eco.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 28. *Gráfica con los valores de RPM medias de los diferentes automóviles.****¡Error! Marcador no definido.***

Figura 29. *Gráfica sobre las RPM máximas en cada modalidad de conducción por vehículo participante.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 30. *Gráfico que muestra cada uno de los registros promedio de la aceleración media positiva de cada vehículo.*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 31. *Gráfica representativa del parámetro de aceleración máxima positiva.****¡Error! Marcador no definido.***

Figura 32. *Gráfica de consumo de combustible para cada modalidad de conducción en l/100 km.* .. ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 33. *Gráfico sobre las emisiones de CO_2 de cada vehículo.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 34. *Ilustración del recorrido de la micro-ruta 1 (R1) y ficha de resultados (Fuente: GMaps).* . ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 35. *Captura correspondiente a la micro-ruta 2 (R2) y resultados relativos al consumo (Fuente: GMaps).*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 36. *Imagen de la ruta seleccionada 3 (R3) para analizar su influencia en el consumo (Fuente: GMaps).*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 37. *Imagen sobre el plano de Cáceres de la micro-ruta R4 y ficha d resultados (Fuente: GMaps).* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 38. *Captura sobre la micro-ruta R5 y resultados sobre consumo (Fuente: GMaps).*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 39. *Ilustración del recorrido de la ruta R6 y ficha de resultados (Fuente: GMaps).****¡Error! Marcador no definido.***

Figura 40. *Micro-ruta 7 (R7) sobre el plano de Cáceres y resultados de consumo (Fuente: GMaps).* . ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 41. *Recorrido de la micro-ruta R8 sus resultados relativos a consumo (Fuente: GMaps).*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 42. *Gráfica que muestra los valores en consumo de combustible (l/100 km) y ahorros en consumo de cada ruta.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 43. *Gráfica que representa los valores para el parámetro V95.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 44. *Representación comparativa de los valores de velocidad media para las dos modalidades de conducción.*..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 45. *Gráfico representativo de los valores para las RPM medias obtenidos en el experimento.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 46. *Valores representados en gráfico de barras para el parámetro de las RPM máximas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 47. *Representación de los valores de aceleración media positiva en las diferentes micro-rutas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 48. *Gráfica para los valores de aceleración máxima positiva para las diferentes micro-rutas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 49. *Visualización gráfica de la comparación entre los valores de consumo de las rutas seleccionadas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Figura 50. *Gráfica para los valores de las emisiones de CO_2 de cada una de las micro-rutas.* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

RESUMEN

El sector logístico del transporte representa del 20 al 30 por ciento de las emisiones totales del tráfico europeo, suponiendo el 21% de las emisiones de CO_2. La flota de transporte urbano es más contaminante que el transporte de mercancía de larga distancia debido a la frecuencia de viajes cortos y paradas y a la edad de los automóviles utilizados, además entra en juego la entrega de último kilómetro, que va dirigida directamente a l consumidor y llega a producir unos costes logísticos notablemente elevados.

Una de las vías de investigación es la instrucción en técnicas de conducción ecológica y selección de ruta a los conductores profesionales de las empresas comerciales. La conducción ecológica consiste en practicar algunas directrices a la hora del manejo del vehículo, como son acelerar y frenar suavemente, cambio de marchas a bajas RPM, mantener una velocidad constante o anticiparse a los obstáculos que el tráfico nos propone en los trayectos. La selección de ruta consiste en seguir una ruta recomendada basada en la minimización del impacto ambiental producido.

A través del proyecto ECO-TRAFFIC y con el gran apoyo de la empresa nacional CORREOS, he tenido la oportunidad de participar en esta investigación de manera que he podido analizar y sacar conclusiones directas y esto me ha servido para desarrollar este trabajo de fin de grado.

La fase experimental se realiza en Cáceres (España) y, posteriormente, se estudiaron los parámetros de conducción que se obtenían de la actividad de varias jornadas de trabajo de 5 conductores de la sección de repartos de la empresa CORREOS.

Con este propósito se plantearon 3 objetivos principales: analizar el potencial del ahorro en consumo y de la reducción de emisiones, conocer el grado de aceptabilidad y concienciar de los beneficios y proponer recomendaciones para planificaciones futuras en la gestión del tráfico.

Antes de comenzar la parte práctica de la investigación, se realiza una síntesis sobre investigaciones previas y sus resultados.

El experimento se realiza en base a estas fases de estudio: campaña de recolección de datos, creación de la base de datos, filtrado de datos y validación de la base de datos, análisis de datos, resultados y conclusiones.

Los resultados obtenidos reflejan que no se puede certificar un efecto favorable en la aplicación de la conducción ecológica en el sector de los transportes comerciales, ya que no existe una relación directa entre los parámetros de conducción y los valores para ahorro en consumo de combustible y reducción de emisiones de CO_2. Además, que los conductores tengan como objetivo principal la entrega de repartos en un determinado horario comercial, resulta un factor influyente ya que la eco-conducción pasa a un segundo plano. También se realiza un análisis en rutas pequeñas en las que se obtiene como conclusión que existe una tendencia favorable a la reducción de emisiones contaminante y ahorro en combustible al practicar conducción eficiente, si la capacidad de servicio de la vía aumenta.

1. INTRODUCCIÓN

Resulta relevante, en el periodo de tiempo en el que vivimos, analizar las posibilidades para el desarrollo sostenible de las infraestructuras del transporte, no solo a la hora de su diseño, ejecución y explotación, sino también en la forma de utilizar el transporte al que da servicio.

La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 2019), informa de que la carretera supone el 94% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector del transporte; el 27% de esta cifra, procede de camiones y autobuses y el 73% restante pertenece a coches y furgonetas. Desde el sector, los profesionales llegan a la conclusión de que las carreteras no solo deben ser seguras, innovadoras e inteligentes, además han de presentarse como zonas que respeten el medio ambiente.

En España el modo mayoritario de transporte es sin duda el transporte por carretera, tanto en pasajeros como en mercancías, representado más del 80% de la movilidad total a nivel nacional (MITECO, 2020). Existen circunstancias propiamente nacionales que han supuesto un incremento de la cuota modal de la carretera, como el modelo de crecimiento urbanístico disperso en el caso de la movilidad de pasajeros y el hecho de ser un país periférico en el caso de la movilidad de mercancías. Además, se caracteriza por el uso preferente de combustibles derivados del petróleo que representan más de 90% del total de energía consumida en el sector transporte en España (MONZÓN, 2008).

Una de las vías de investigación es el estudio de los efectos que produce la instrucción a los conductores de los vehículos que fluctúan por la red de carreteras en conducción ecológica, concretamente, esta investigación se centra en los efectos producidos en los transportes comerciales.

1.1. NECESIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Durante los últimos años las metrópolis afrontan retos importantes como la contaminación del aire y el cambio climático. Según *Global Fooprint Network*, “el 2 de agosto de 2019, la humanidad se abastecía de la naturaleza más de lo que nuestro planeta podía renovar en un año”. Los mismos expertos indican en este informe que se utilizan más recursos y servicios ecológicos que los que la naturaleza puede regenerar a través de la sobreexplotación pesquera y forestal, y que, además, se emite más dióxido

de carbono a la atmósfera del que los bosques de nuestro planeta Tierra pueden capturar, de hecho, actualmente el 60% del déficit ecológico se debe a la necesidad de absorción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) (HERTWICH, 2009).

Existe documentación de que el CO_2 no es el único gas de efecto nocivo que está causando el cambio climático, más bien el cambio climático se debe a un grupo de gases, conocidos como GEI, los cuales desnaturalizan el balance energético del sistema climático. Los más importantes, en orden decreciente de concentración son: agua, vapor, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono (EPA, 2014).

Las emisiones de GEI, son producidas 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. (*Climate techbook*, C2ES center for climate and energy solutions)

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, 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. Las emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes al sector del transporte en España en el año 2014 fueron de 77,2 $TmCO_2$-eq (equivalencia en toneladas de CO_2) (MITECO, 2020), habiéndose incrementado casi en un 50% desde 1990 como consecuencia del incremento en la demanda de movilidad de pasajeros y mercancías.

Con esta idea, para avanzar en nuestras misiones y acelerar la implementación del Acuerdo de París, en 2019 se llevó a cabo 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. 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 para 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:

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 eficiencia de conducción limitando la velocidad,

mostrando reducciones de consumo de combustible y de CO_2 de alrededor del 10% según los parámetros del corredor (incluido el volumen de tráfico y la velocidad). Además, la conducción ecológica logró mejoras significativas en la calidad del aire cuando los conductores utilizan una ruta más lenta aunque pasan más tiempo de viaje.

La búsqueda por tanto de medidas de reducción de emisiones de GEI es uno de los objetivos de cualquier país que persiga la neutralidad en carbono para el año 2050. En el caso del transporte de mercancías existen las siguientes medidas para reducir las emisiones de GEI:

1. Sistema de gestión de flotas. Las herramientas informáticas disponibles permiten organizar mejor el tráfico de mercancías y limitar el consumo de combustible y, en consecuencia, de emisiones de CO_2. Cada vez más empresas apuestan por estos sistemas para reducir los kilómetros en vacío y controlar la distribución de cada camión. Las empresas que los han utilizado han reducido las emisiones de sus procesos logísticos hasta en un 2% cada año. (DEMIR, 2014).

2. Vehículos a gas natural. El gas natural se ha considerado durante muchos años como la energía de transición, hasta que la eléctrica consiga la autonomía suficiente. Jugará un papel destacado en la descarbonización de la economía mundial y cada vez tiene más aplicaciones en transporte terrestre y marítimo. En 2017 el consumo de gas creció un 9% en España y se espera que despegue a partir del 2020. En el transporte de mercancías por carretera, con cada vez más gasolineras de gas, el gas natural gana confianza para viajes de larga distancia. Los fabricantes de camiones también aumentan su apuesta por este combustible. (NGVA, 2017).

3. Megacamiones. El megacamión (o camión euromodular) mide 25,25 metros de largo, pesa 60 toneladas y tiene una capacidad de 51 palés. El llenado pasa de un 54% a un 57,5%, lo que reduce el número de viajes, kilómetros y el consumo de combustible. Según un estudio de la Comisión Europea (EC, 2017), los megacamiones pueden ahorrar hasta un 20% de combustible, un 20% de las emisiones de CO_2 y un 40% de las emisiones de otros contaminantes como NOx (óxidos de nitrógeno).

4. Conducción eficiente. Cómo arrancar, cuándo empezar a frenar, mantener una velocidad adecuada… son conceptos que reducen el consumo de carburante y, por tanto, las emisiones de CO_2. Además, suponen ahorro económico y de energía, menos mantenimiento, mejora de la velocidad media, menos riesgo de accidentes y mejora del confort. La conducción eficiente permite ahorros medios del 10% en carburante, según la guía de Conducción eficiente de vehículos industriales del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE, 2011). Los programas de formación en conducción eficiente realizados a conductores de forma individual suelen estar compuestos de dos partes, una teórica y otra práctica. En la parte práctica se hace hincapié en conducir de forma suave manteniendo una velocidad constante, cambiando de marchas a bajas revoluciones y evitando en la medida de lo posible las repentinas aceleraciones/deceleraciones (Yang, et al., 2018).

Durante las pasadas décadas ha sido un debate en curso el cómo y en qué extender las diferentes políticas y estrategias para influenciar la mitigación del impacto del transporte en el cambio climático.

Tecnologías innovadoras y soluciones de movilidad en el transporte son requeridas para producir un cambio disruptivo en el sector del transporte que aborde esta problemática. En este contexto, dos de las soluciones beneficiosas, tanto para la sociedad como para los usuarios de automóviles son la aplicación de conducción ecológica con el objetivo de medir cuanto es la reducción de consumo de combustible modificando el comportamiento de los conductores, y la elección de ruta, la cual está diseñada para proporcionar una guía a los conductores basada en información en tiempo real y siguiendo un criterio de consumo mínimo de combustible.

La literatura refleja las ventajas y desventajas de las medidas de conducción ecológica, así como una gran variabilidad dependiendo de la heterogeneidad individual y de la implementación de nivel de eco-conductores y rutas ecológicas (Xia et al, 2013). Por

tanto, en este proyecto se propone analizar los impactos de estos comportamientos desde 3 perspectivas diferentes:

1. En primer lugar, realizando medidas reales de estos comportamientos a través de una campaña de recolección de datos en la que los itinerarios siguen o no el comportamiento del eco-conductor y la eco-ruta.
2. Con estas medidas de campo, las variaciones individuales son estimadas. Estas variaciones en el comportamiento, y por tanto en los impactos, serán parametrizadas para transferir los impactos a un proceso de modelado – en micro y macro escala – para analizar el efecto de diferentes niveles de penetración de eco-conductores y eco-rutas así como las diferentes condiciones de tráfico. Los resultados esperados obtenidos en micro/macro simulaciones en consonancia con la literatura científica y la evidencia de resultados en este proyecto destacarán variaciones substanciales de acuerdo con el tipo de carretera, las condiciones de tráfico y en niveles de penetración de eco-conducción y eco-ruta. Esto, por lo tanto, implica la necesidad de analizar la viabilidad práctica de la implementación de estas medidas.
3. Finalmente, desde los resultados previos, una campaña de encuestas y un grupo focal en el que se analizará la aceptabilidad de los conductores ante el impacto que la eco-conducción y la ruta ecológica pueden tener en sus itinerarios, así como el grado de conciencia que ellos tienen en sus impactos.

La hipótesis está basada en el potencial de las medidas de mejorar los patrones de conducción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

Este proyecto de investigación se centrará en concreto en el sector de conductores profesionales y que efectos provoca en una ciudad de tamaño menor. Para adentrarnos en la investigación se ha de conocer que partes engloban el proceso y en cual se produce una mayor contaminación.

La OCDE (2003) define el transporte urbano de mercancías (TUM) como “la entrega de bienes de consumo (no solo al por menor, sino también a otros sectores como la manufactura) en áreas urbanas y suburbanas, incluido el flujo inverso de bienes en términos de residuos limpios”. El TUM se convierte en una parte indispensable de la vida de las personas, apoyando la industria y las actividades comerciales. Mientras tanto, produce impactos negativos considerables en las tres dimensiones de la sostenibilidad, como la contaminación del aire, menor accesibilidad de los pasajeros, seguridad vial, etc. La investigación anterior muestra que el TUM también representa del 20 al 30 por ciento (dependiendo del contexto local) de emisiones totales del tráfico (Macharis y Melo, 2011). En las áreas urbanas europeas más grandes, los vehículos de carga son responsables del 21 por ciento de las emisiones de CO_2 y de un tercio de las emisiones de NOX relacionadas con el transporte (Dablanc y Rodriguez, 2009).

Figura 1. *Proceso entre las flotas de transporte de mercancías de larga distancia y urbana.*

La flota de transporte urbana (FTU) es más contaminante que el transporte de mercancía de larga distancia debido a sus flotas de vehículos más antiguas y a la frecuencia de viajes cortos y paradas, lo que genera emisiones locales y afecta directamente la salud de los ciudadanos (Dablanc y Rodriguez, 2009).

Con el auge de las actividades de comercio electrónico, la demanda de servicios de entrega de paquetería y carga urbana se está disparando, particularmente para la entrega de último kilómetro. La entrega de último kilómetro es el final de la cadena logística que va dirigido directamente a los consumidores, y suele ser uno de los capítulos más costosos, menos eficientes y más contaminantes (Gevaers, et al., 2011). El problema de los costos de entrega de último kilómetro es posiblemente de entre el 13% y el 75% del costo logístico total (Onghena, 2008).

Para aumentar la eficiencia energética y mitigar sus impactos negativos, se promueven varias estrategias e iniciativas para enfrentar los desafíos en la entrega de último kilómetro, como mejoras en la ruta de los vehículos, flotas logísticas ecológicas y limpias, innovaciones tecnológicas de vehículos y cooperación de la competencia.

Sin embargo, esas iniciativas en la práctica encuentran varias dificultades para implementar, como la falta de información en tiempo real para proporcionar un servicio de ruta dinámica de vehículos; los costes de inversión son muy altos para los transportistas; los competidores del transporte de mercancías no están dispuestos a compartir información valiosa para cooperar. Requiere estrategias o soluciones más factibles y rentables para ayudar a la implementación en la entrega de carga urbana. Ciertas estrategias deberían ayudar a mitigar los impactos negativos sobre la congestión urbana, las perturbaciones acústicas y la contaminación del aire.

La entrega de último kilómetro tiene características distintivas para el transporte de carga de larga distancia, ya que contiene una distancia de viaje más corta y paradas frecuentes. Trabajos anteriores revelan que el consumo de combustible puede aumentar en un 140 por ciento si un vehículo se detiene con frecuencia: con cinco paradas en 10 kilómetros (Martensson, 2005). Para descubrir medidas efectivas para el transporte urbano de mercancías (especialmente la entrega de último kilómetro), es

fundamental caracterizar los viajes de mercancías urbanas tanto en zonas urbanas como suburbanas donde tienen una mayor demanda de movimientos de mercancías. A través de una revisión de la literatura sobre transporte urbano, se ha encontrado que tanto los estudios urbanos como la investigación del transporte han descuidado este tema hasta hace poco. Todavía carece de una comprensión completa de la distribución de carga urbana y las entregas de último kilómetro.

Otra razón crítica que resulta de la falta de estudios sobre FTU es que no se dispone de datos logísticos reales. La mayoría de las iniciativas mencionadas no se han probado en la práctica, sino solo mediante simulación. Los estudios anteriores son en su mayoría cualitativos más que cuantitativos. Evaluar los impactos de las soluciones sostenibles en el transporte urbano de mercancías sigue siendo un desafío.

Es más, los negocios del sector logístico, como actores clave involucrados en el transporte urbano de mercancías, generalmente han descuidado la evaluación de los impactos de las medidas sostenibles.

Una de las medidas sostenibles que puede contribuir a la reducción de las emisiones de GEI en el transporte urbano de mercancías es la técnica de conducción ecológica. A pesar de los pocos estudios sobre conductores de autobuses o camioneros profesionales (Kircher et al., 2014; Sullman et al., 2015), no existe un solo estudio con relación a la conducción ecológica con conductores logísticos urbanos.

A nivel operativo, la conducción ecológica es una medida rentable basada en seguir algunos consejos ecológicos sencillos como acelerar y frenar suavemente, cambiar de marcha a bajas RPM (Revoluciones Por Minuto), mantener una velocidad constante y anticipar el tráfico para evitar detenerse tanto como sea posible (Barkenbus, 2010). Las ventajas de la conducción ecológica van más allá de las reducciones de CO2, también ayudan a reducir los costos de operación para las personas y producen beneficios de seguridad tangibles y bien conocidos (con menos accidentes y muertes de tránsito).

Para superar las mencionadas brechas de investigación en transporte urbano de carga y entrega de último kilómetro, se incentiva a los investigadores a recolectar datos reales

para conocer las características detalladas de la flota urbana y sus viajes, así como los impactos potenciales al aplicar ciertas medidas en áreas urbanas y suburbanas.

Bajo esta consideración, el Proyecto ECO-TRAFFIC es un proyecto nacional de I + D + i de España, cuyo objetivo es analizar la posible reducción del consumo de combustible y las emisiones (tanto de GEI como contaminantes) mediante la adopción de la técnica de conducción ecológica tanto para los usuarios de vehículos particulares como para los conductores logísticos. El proyecto cuenta con el apoyo de varias entidades, entre ellas CORREOS, el servicio postal nacional de España (100% estatal) con 51.000 empleados, que distribuyen más de 2.500 millones de envíos al año.

Con el gran apoyo de CORREOS, se realizó la recogida de datos de entrega de último kilómetro con 5 conductores de la empresa estatal en Cáceres. Esta investigación, en la que, junto con los doctores Marta García y Juan Francisco Coloma, participé como becario por medio de la Fundación Agustín de Betancourt, documenta todos los detalles de la recopilación de datos, incluyendo la elección de la ruta, el patrón de conducción, las condiciones de la carretera, etc., tanto en áreas urbanas como suburbanas. Los resultados obtenidos facilitan el estudio sobre el transporte urbano de mercancías y cubren las lagunas de investigación del campo.

2. OBJETIVOS

Basado en esta hipótesis, así como en investigaciones previas en esta área, el proyecto incluye los tres siguientes Objetivos Generales (OG):

OG1. Analizar el potencial en ahorro de consumo de combustible y en reducción de emisiones (tanto GEI como contaminantes) desde el punto de vista del conductor: una manera eficiente de conducción y elección de ruta que minimice el consumo.

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

OG3. Proponer recomendaciones que puedan servir para los planificadores y operadores implicados en la gestión del tráfico.

Buscando objetivos más específicos (OS: Objetivo Específico), hacemos distinción de ellos dependiendo de los objetivos generales para enfocarnos de manera más profunda en nuestra investigación sobre ellos.

OG1. Analizar el potencial en ahorro d consumo de combustible y en reducción de emisiones (tanto GEI como contaminantes) desde el punto de vista del conductor: una manera eficiencia de conducción y elección de ruta que minimice el consumo.

OS1. Para medir en la práctica la variación de velocidades y emisiones producidas por la conducción y la ruta ecológica a nivel individual mediante la instalación a bordo de dispositivos en el vehículo que permiten la recopilación de información instantánea de múltiples parámetros explicativos que conforman el perfil de conducción seguido.

OS2. Estudio del efecto que la eco-conducción y la eco-ruta puede producir, así como la función de penetración del porcentaje de conductores que modifican su comportamiento.

OS2.1. Simulación a pequeña escala basada en datos de campo del comportamiento de los conductores con diferentes porcentajes de conducción tipo ecológica en la selección de rutas

OS2.2. Generalizar los resultados de conducción ecológica al nivel de la ciudad (escala ascendente).

OS2.3. Modelado de datos de campo de eco-conducción en áreas urbanas (selección de ruta, conocida como eco-ruta)

OS2.4. Modelado de efectos combinados de conducción y ruta ecológica.

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

OS3. Análisis de la aceptabilidad de eco-conducción y eco-ruta: percepción de los beneficios y desventajas de los usuarios

OS4. Análisis del grado de conciencia que los conductores tienen sobre los efectos de la conducción y la ruta ecológica pueden tener sobre la velocidad, el tiempo de trayecto y las emisiones.

OS5. Análisis del potencial y la voluntad de las autoridades de implementar medidas de conducción eficiente de apoyo.

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre conducción eficiente se han centrado normalmente en conductores no profesionales, conduciendo turismos en distintos tipos de carretera, vehículo o ciudad, pero no se ha visto 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 se aplican los objetivos anteriores para esta vía de la investigación.

Para ello, se cuenta con la colaboración de la empresa pública de mensajería española Sociedad Estatal de Correos y Telégrafos, S.A. La ciudad elegida ha sido Cáceres (España) ya que en ella se ha llevado también a cabo un experimento con conductores no profesionales y puede servir para comparar la eficiencia de estas técnicas de conducción en conductores profesionales.

Esta investigación proviene de los objetivos del proyecto ECO-TRAFFIC y presenta los resultados de variación en ahorro de consumo y producción de emisiones de conducción y ruta ecológica a nivel individual. A la vez, introduce en la metodología detallada de la recolección de datos, procesamiento de datos y método de análisis.

3. 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 ralentí 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.

3.1. 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_2 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 2. *Cambio en el comportamiento de eco-conducción (García, 2016).*

En la figura 2 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.

Tabla 1. *Resumen de las investigaciones más relevantes sobre eco-conducción (Fuente: "Medición y Modelización de Eco-driving Táctico Y Operacional", Wang, Coloma et al.).*

INVESTIGACIÓN	TIPO DE ESTUDIO	VARIABLES	EFECTOS
Johansson et al. (1999)	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible y emisiones	10,9% de reducción de consumo
Hornung (2004)	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
Vermuelen (2006)	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
Taniguchi (2007)	Después de la instrucción en eco-conducción. Prueba en carretera.	Consumo de combustible	20% de reducción de consumo
Kobayashi et al (2007)	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
Henning (2008)	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
Fiat, Eco-Drive (2010)	Después de la instrucción en eco-conducción. En carretera con prueba de retroalimentación.	Consumo de combustible	6% de media y 16% de máximo
Qian y Chung (2011)	Aceleración moderada y suave. Simulación en red.	Consumo de combustible, emisiones de CO_2 y tiempo de viaje.	Efectos de red. Reducción en consumo de combustible del 4% en flujo libre e incremento del 25% en congestión.
Boriboonsomsin y Vu (2011)	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
Rakha y Kamalanathsharm (2013)	Sistema dinámico V2I. Modelo	Consumo de combustible	Sube al 23,8% la reducción de consumo de combustible
Niu et al (2013)	Sistema dinámico de eco-conducción. Modelo señalizado	Consumo de combustible y emisiones de CO_2	25% de reducción en consumo de combustible y en emisiones de CO_2
Xia et al. (2013)	Sistema dinámico de eco-conducción. Simulación de red	Consumo de combustible y emisiones de CO_2	10-15% de reducción en vehículos individuales.1-4% en flota dependiendo d la situación del tráfico
Ma et al. (2015)	Modelo combinado vehículo-motor para conductores de autobuses	Consumo de combustible	10% y alcanza un máximo del 20% en diferentes condiciones de la carretera
Díaz-Ramírez et al (2017)	Flota nacional de mercancías	Consumo de combustible	Reducciones entre el 6,8% y el 5,5%

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 direccionan 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.

3.2. ECO-RUTA: DEFICNICIÓN 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 (Boroboonsomsin 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_2, 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 significante 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 CO2, 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.

3.3. TRANSPORTE URBANO DE MERCANCÍAS: DESAFÍOS Y CARACTERÍSTICAS

El transporte urbano de mercancías, como parte clave de la movilidad urbana, también se enfrenta al desafío de lograr un sistema de transporte europeo que sea resistente, eficiente en el uso de los recursos, respetuoso con el clima y el medio ambiente, seguro y sin problemas para el beneficio de todos. Según la Comisión Europea (CE, 2011), el transporte de mercancías debería estar libre de CO_2 en los principales centros urbanos para 2030. Se han dirigido diferentes tipos de medidas e iniciativas para mejorar el rendimiento de la distribución de mercancías y reducir los efectos negativos medioambientales y socioeconómicos del transporte urbano de mercancías.

El libro “Distribución urbana y transporte urbano de mercancías: perspectiva múltiple” (Macharis et al., 2011) es uno de los pocos que ha estudiado acerca de la distribución urbana de bienes (UGD) que presenta una descripción general de la distribución urbana de mercancías, incluida la situación actual, posibles soluciones, metodología de evaluación y varios estudios de casos reales en Europa.

En este subcapítulo primero hablamos de las principales características del transporte urbano de mercancías en cuanto a su diversidad, multisectorial y varios modos de transporte. Las tres características del transporte urbano de mercancías se describen como principales dificultades en el desarrollo de medidas de transporte sostenible en trabajos anteriores, que también representan los desafíos críticos en este campo (Patiera & Browne, 2010; Macharis et al., 2011; Lindholm & Behrends, 2012; Gonzalez - Feliu et al., Et al., 2014). Luego, la brecha de investigación actual se da después de la presentación de las características del transporte urbano de mercancías.

3.3.1. Diversidad de actividades

Deblanc (2007) afirma que los movimientos de mercancías son indiferentes a la estructura interna de las ciudades ya que la UGD se realiza de manera más o menos similar y no se diseñará una logística específica para una ciudad en concreto. El transporte de mercancías urbano de alguna manera se enfrenta a desafíos similares a los de todas las grandes ciudades del mundo, que son la congestión, la falta de área de carga y descarga, un esquema de regulación complejo, etc.

Sin embargo, su diversidad también es notable. La actividad del transporte urbano de mercancías suele diferir de cada ciudad utilizando diferentes tipos de vehículos, con entregas más o menos frecuentes y personalizadas, etc. Las medidas políticas para desarrollar un transporte sostenible de mercancías deben caracterizar en primer lugar los estados actuales del movimiento local de mercancías.

Un trabajo de revisión presentado por Browne et al., (2012) muestra que, dependiendo del área y la intensidad del implemento, las mismas iniciativas de transporte pueden generar resultados diferentes en la reducción de los impactos sociales y ambientales. Detallan los impactos de varias iniciativas como centro de consolidación, zonas de bajas

emisiones, vehículos nuevos y más ecológicos que se han aplicado en cuatro países del mundo (es decir, Reino Unido, Japón, Países Bajos y Francia), y encuentran que:

1) probablemente no sea la solución perfecta para la distribución urbana sostenible. Incluso una combinación perfecta de medidas es difícil de encontrar. Se deben evaluar medidas específicas de acuerdo con la situación típica de la ciudad.

2) se deben aplicar medidas y herramientas combinadas como la regulación, compartir espacio y tiempo, fomentar la cooperación, cambiar comportamientos, estimular al sector público y privado a trabajar juntos.

3.3.2. Multisectores

El transporte de mercancías urbano implica un amplio espectro de actores, que van desde los responsables de las políticas gubernamentales, los operadores de transporte, los transitarios, los minoristas y los residentes. La figura 3 (Fuente: derivada de Boerkamps et al., 2000) muestra diferentes partes interesadas que están involucradas en el dominio del transporte urbano de mercancías. Boerkamps et al., (2000) clasifican el dominio del transporte urbano de mercancías en cinco componentes con cuatro partes interesadas principales: Transportistas, Transportistas, Clientes y Administradores.

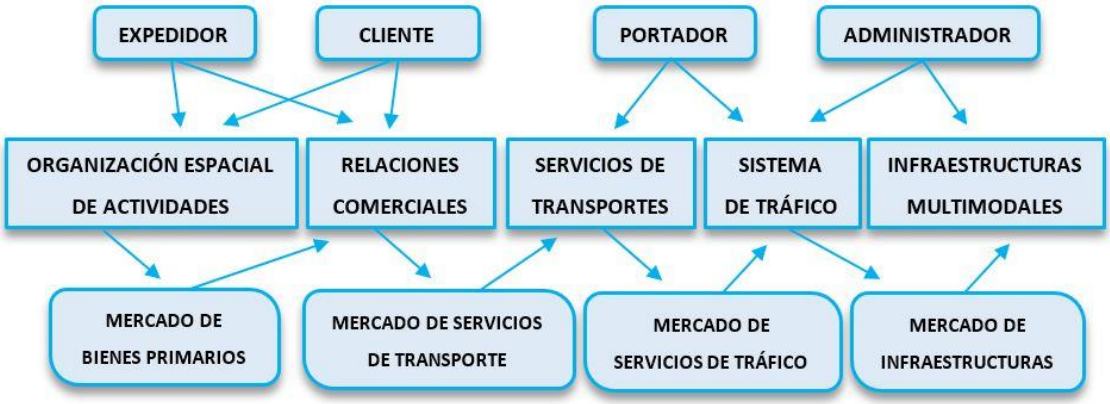

Figura 3. *Dominio del transporte de mercancías (Fuente: Boerkamps et al., 2000)*

En general, aunque todas las partes interesadas comparten objetivos comunes de entrega de bienes en áreas urbanas, tienen intereses específicos que a menudo están en conflicto. Las partes interesadas del sector privado persiguen bajos costos y altos beneficios, mientras que el sector público (como el administrador gubernamental) está

interesado en lograr el objetivo general, es decir, la reducción de las emisiones y la congestión (Anand et al., 2012). Esto conduce a que el plan de transporte urbano de mercancías puede fallar por considerar únicamente comportamientos o atributos desde el punto de vista de los sectores públicos.

Se requieren medidas políticas para satisfacer las necesidades de ambos sectores o al menos no perjudicar los intereses de ninguno de los sectores.

3.3.3. Varios modos (no motorizados y motorizados)

El transporte urbano de mercancías en muchos lugares implica diferentes modos de transporte, incluidos vehículos motorizados, camionetas y modos no motorizados como bicicleta y caminar. Muchas investigaciones se centran en la sustitución del vehículo motorizado por bicicleta o triciclo. Dependiendo del contexto del servicio, el ciclo de carga se utiliza para la entrega de mercancías livianas con distancias más cortas, particularmente en ciudades históricas con calles estrechas (Foltyński, 2014). Los factores técnicos, legales y sociales son las principales preocupaciones de los transportistas logísticos para elegir el ciclo de carga en su flota.

El vehículo con nuevo tipo combustible (GNC: gas natural comprimido) o la camioneta eléctrica no cumplían con los requisitos debido a su alto costo de compra, difícil mantenimiento y falta de instalaciones de repostaje. Sin embargo, la situación está cambiando en los últimos cinco años debido al desarrollo de la tecnología. Como muchas ciudades despliegan sus zonas de bajas emisiones en donde los vehículos combustibles tienen prohibido entrar o tienen acceso restringido. El cambio de distribución en el centro de la ciudad está cambiando a vehículos eléctricos que ayudan a reducir las emisiones y el ruido.

En general, los estudios anteriores que lograron un transporte urbano sostenible se centran en varias áreas:

1) Evaluación de la iniciativa de transporte de mercancías a través del estudio de caso o la formalización matemática.

2) Establecer un marco dentro de ciertos criterios para evaluar las medidas de transporte.

3) Evaluación de prueba basada en el problema local.

La tabla 2 enumera las tres categorías de trabajos de investigación y sus principales contribuciones y limitaciones de la investigación.

***Tabla 2**. Resumen de estudios previos sobre transporte urbano de mercancías (Fuente: "Medición y Modelización de Eco-driving Táctico Y Operacional", Monzón, Wang et al.).*

AÑO	AUTORES	TEMA Y CONTRIBUCIONES	OBJETIVO Y METODOLOGÍA	LIMITACIONES
2005	Anderson et al.	Actividad del transporte urbano de mercancías para cumplir los objetivos de sostenibilidad urbana. Cómo cambiar la flota urbana para cumplir con la sostenibilidad. 7 empresas en 3 áreas de Reino Unido Resultados del proyecto, efectos operativos, financieros y ambientales de 4 medidas de transporte (zonas de bajas emisiones, tarificación de vías urbanas, restricción de peso y restricción de tiempo).	Cómo la actividad de transporte urbano de mercancías puede funcionar para que cumpla con los objetivos de sostenibilidad urbana con las políticas que están comenzando a implementar. Método de encuesta	Datos obtenidos mediante el método de encuesta, no datos reales. La distribución de mercancías varía entre empresas.
2008	Saito et al.	7 consejos para la evaluación del impacto de la conducción ecológica utilizando un vehículo de carga diésel de servicio liviano. En Japón Comparación de patrones de conducción, CO2, contaminantes, etc.	5 conductores, un camión diésel, dos escenarios de conducción determinados	Un vehículo y caminos determinados, controlando los impactos, pero sin tener en cuenta la situación real del camino
2010	Patiera & Browne	En un trabajo de revisión, los autores desarrollan un método para la evaluación de experimentos previos. 15 experimentos realizados en Francia durante los últimos 10 años Dos proyectos, uno en Francia para correo y paquete pequeño, otro en Reino Unido, para centro de consolidación para minoristas	Una metodología para incrementar la consistencia con la que se evalúan las buenas innovaciones y proyectos urbanos	No es un caso para estudiar el transporte de mercancías urbano, sino un método de evaluación
2011	Álvarez y La Calle	Revisión de casos españoles: Identifica algunos problemas específicos que se deben afrontar durante la última etapa de la cadena logística. La ciudad debería diseñar su propia política. 9 prácticas en Bilbao Documento de revisión, con evaluación	Su objetivo es seleccionar algunas prácticas logísticas viables y sostenibles para mejorar la distribución urbana de mercancías en la ciudad de Bilbao.	No se utilizan datos reales. Peso de cada criterio por reunión de grupo. MCDA para evaluar las prácticas existentes en el transporte urbano de mercancías Método de encuesta, reunión grupal de partes interesadas

AÑO	AUTORES	TEMA Y CONTRIBUCIONES	OBJETIVO Y METODOLOGÍA	LIMITACIONES
2011	Browne et al.	Reino Unido: evaluación de senderos UCC reemplazado por depósito local Furgoneta diésel sustituida por furgonetas eléctricas 54% de reducción de CO2, 20% de reducción de la distancia de viaje	Evaluó una prueba de realizar entregas directamente desde el depósito del suburbio a los clientes mediante vehículos eléctricos desde el centro de microconsolidación.	Genera más kilómetros de viaje en la ciudad de Londres. (Más congestión). Reducción de CO2 principalmente por sustitución de vehículos eléctricos
2011	Lindholm & Behrends	Suecia: sentar las bases para diseñar estrategias para superar los desafíos que implica el transporte urbano de mercancías sostenible Revisar un trabajo similar al anterior, hablar sobre los desafíos actuales del transporte urbano de mercancías.	No solo argumenta factores detrás del transporte urbano de mercancías, sino también revisa las tendencias de la investigación de modelos de logística de la ciudad en términos de problemas de logística de la ciudad e intenta identificar brechas en el modelado del dominio del transporte de mercancías urbano.	Revisión de modelos de transporte urbano, no se consideran datos reales ni pruebas de campo.
2012	Anand et al.	Revisar el trabajo sobre tendencias y brechas en el modelado logístico	Este artículo intenta analizar la modelización del transporte urbano de mercancías desde el punto de vista de sus partes interesadas describiendo su objetivo, la elección del descriptor y la perspectiva hacia el objetivo.	
2012	Browne et al.	Revisar el trabajo de diferentes ciudades, con el objetivo de reducir los impactos sociales y ambientales.	Medidas de política sobre transporte urbano de mercancías desde Londres, Japón, Holanda y Francia	
2013	Duin et al.	Primer trabajo con vehículo eléctrico en transporte urbano de mercancías Amsterdam: dos objetivos de investigación Estimación y simulación de escenarios ubicado en un depósito central, a un conjunto conocido de destinatarios que utilizan vehículos de diferentes tipos Reducir el 90% de CO2 después de introducir vehículos eléctricos	Determinar la flota ideal a transportar, y saber si realmente reduce el CO2, ya que puede generar más viajes-kilómetros (volver a cargar). Formalización matemática	A través de la formalización matemática, estima el costo de reemplazar los DV por EV. Omita el caso real, pero es una buena práctica.

AÑO	AUTORES	TEMA Y CONTRIBUCIONES	OBJETIVO Y METODOLOGÍA	LIMITACIONES
2014	Patier et al.	Francia-Lyon: problema de estacionamiento en doble fila Entregue áreas, use el teléfono para reservar el área, no deje que otros la usen. Se probó en Lyon y Bilbao	Método de simulación Sistema SyGAL del proyecto FREILOT	Sin análisis cuantitativo Basado en simulación.
2014	Gonzalez-Feliu et al.	Libro Definición, método, marco	Cuatro capítulos: 1. Situación actual 2. Metodológico 3. Acciones tácticas 4. Planificación estratégica	
2014	Foltynski, M.	Estudio inicial de flota eléctrica en logística urbana, teniendo en cuenta factores técnicos legales y sociales. Proyecto ENCLOSE en ciudades históricas pequeñas y medianas europeas (SMHT).	Informe del Proyecto ENCLOSE que estudia la Eficiencia Energética en la Logística Urbana para Pequeñas y Medianas Ciudades Históricas Europeas.	Resumen la escasez de flota de vehículos eléctricos. Menor alcance, tiempo de carga prolongado, etc.
2015	Schliwa et al.	Reino Unido: logística de bicicletas (bicicleta y triciclo)	La logística de las bicicletas es viable a través de la revisión de la literatura y la entrevista. Es una buena herramienta en	No hay mucho análisis, pero discusión
2016	Lebeau et al.	Bruselas: resumen de ventajas, desventajas y barreras para los BEV Uso del método de utilidad para estimar los factores clave que influyen en la elección de BEV	Por tanto, explora el comportamiento de elección de vehículos de las empresas de transporte a través de un análisis de elección conjunto. Método de encuesta, modelo de utilidad	El atributo de puntuación ecológica se considera poco en la decisión de compra
2016	Duarte et al.	Portugal: aplicación en el mundo real tanto para furgonetas diésel como eléctricas	Este trabajo de investigación evalúa la adecuación del BEV en la logística urbana en Lisboa, basado en una aplicación del mundo real	
2018	Fligliozzi et al.	EE. UU., Emisiones de CO2e del ciclo de vida. Se presenta un modelo de minimización de emisiones del ciclo de vida para el problema del tamaño y la composición de la flota y se aplica a un estudio de caso del mundo real en Portland, EE. UU. Prueba pequeña de UPS	Se desarrolló un modelo de emisiones del ciclo de vida con el objetivo de minimizar las emisiones de CO2 para el tamaño de la flota y el problema de composición, y se aplicó con datos del mundo real tanto para camionetas diésel como para triciclos de carga eléctricos.	No hay una cuantificación adecuada de la relación costo-beneficio, ni límites de carga óptimos. No considerado en el trabajo actual

Muchas prácticas de medidas de carga urbana se evalúan a través del método de simulación, formalización matemática o encuesta, muestra el potencial de aplicar ciertas medidas para reducir los impactos negativos de la carga urbana (Duin et al., 2013; Patier et al., 2014; Lebeau et al., 2016). Sin embargo, la falta de datos del mundo real hace que la logística urbana siga siendo un campo en el que se necesitan más análisis para comprender las implicaciones de los desarrollos innovadores y las prácticas cambiantes.

3.3.4. Literatura sobre flotas de mercancías urbanas

La flota de carga urbana con tecnologías de vehículos de emisión cero puede reducir significativamente las emisiones, el ruido, el consumo de combustible y energía, los accidentes, etc., las externalidades de la entrega del último kilómetro en el área urbana. Aunque el costo de las flotas de vehículos combustibles internos sustituibles (ICE) es alto, puede lograr un mayor beneficio al controlar el tipo de vehículo, la capacidad de carga, los métodos de carga y descarga, la carga, la seguridad, etc.

Durante los últimos años, ha habido una serie de pruebas de campo y experimentos que estudian los impactos de las emisiones mediante la utilización de vehículos de bajas emisiones para la distribución de bienes urbanos, incluidos vehículos eléctricos de batería y bicicletas de carga (ver tabla 3). Una prueba realizada en Londres (Reino Unido) muestra que al reemplazar los vehículos diésel por triciclos de carga asistidos eléctricamente y camionetas eléctricas, se puede generar el 54% de las emisiones de CO_2 por entrega de paquetes si el centro de consolidación urbana (UCC) también se traslada al centro de la ciudad. Hallazgos similares de un experimento a bordo en Lisboa - Portugal, donde el consumo de energía se reduce un 57% después de cambiar a una flota eléctrica (Durante et al., 2016). También confirma que la transición de la flota de ICE a vehículo eléctrico (VE) es adecuada para la entrega de bienes urbanos, lo que mantiene un desempeño de operación logística similar, lo que significa que los transportistas mantienen un tiempo de trabajo y un patrón de operación similares, pero consumen menos energía.

Tabla 3. *Estudios de caso anteriores en análisis de flotas de mercancías (Fuente: Schliwa et al., 2015)*

TEMA DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	CONTENIDO	LUGAR	CLAVES DE LA INVESTIGACIÓN
Vehículos eléctricos pequeños (SEV)	Melo et al. (2014)	Análisis cuantitativo	Portugal	Los (SEV) son una solución viable que satisfacen los intereses públicos y privados, cuando los

TEMA DE INVESTIGACIÓN	AUTORES	CONTENIDO	LUGAR	CLAVES DE LA INVESTIGACIÓN
				costes operacionales y externos son completamente contabilizados.
Bicicletas de carga eléctrica	Gruber, Ehler, and Lenz (2013); Gurber et al. (2014)	Potencial técnico, requerimientos de usuario	Berlín, Alemania	El 19% -48% del kilometraje de la logística de mensajería realizado por vehículos con motor de combustión podría sustituirse por bicicletas eléctricas de carga.
Bicicletas para transporte urbano	Lenz & Riehle (2013); Riehle (2012)	Estudio explorartorio	Europa	Alto potencial para el mercado de alimentos y mensajería, expreso y paquetería (CEP). Obstáculo: percepción de los ciclos de carga como un modo de transporte adecuado y su aceptación por los clientes (potenciales).
Triciclos de mercancías para microconsolidación urbana (UMC) y último kilómetro	Conway et al. (2011)	Análisis comparativo de París, Londres y operaciones para identificar el potencial en Manhattan, NYC	Londres, UK París, Francia New York, USA	La carga se puede cambiar a triciclos sin aumentar los costos generales y al mismo tiempo reducir las externalidades sociales. El apoyo financiero público para los UMC que prestan servicios en operaciones de una o varias portadoras podría justificarse por las mejoras ambientales y de tráfico y la creación de empleo.
Mensajeros en bicicleta	Maes & Vanelsalander (2012)	Estudio exploratorio	Bélgica y Países Bajos	Existe un mercado específico para mensajeros en bicicleta. Obstáculos: "problema del huevo-gallina", dudas sobre la profesionalización y vínculos con la red logística.
Tendencias e innovación en logística urbana	Taniguchi, Thompson & Yamada (2014); Balm, Brownw, Leonardi and Quak (2014)	Tendencias y desarrollo del marco de evaluación para apoyar la difusión de la innovación	Diverso	Triciclos asistidos eléctricamente junto con pequeños vehículos eléctricos reconocidos como tendencia e innovación en la logística de la ciudad, p. caso de estudio en Bruselas; marcos de evaluación necesarios y en desarrollo para el aprendizaje entre ciudades.
Logísticas sotenibles en la ciudad	Russo & Comi (2010, 2012); Taniguchi (2014); Taniguchi et al. (2014)	Conceptos y medidas para las logísticas en ciudad de manera sostenible y viable	Europa y el mundo	Tres elementos son esenciales para promover la logística de la ciudad: (a) aplicación de TIC innovadoras, (b) cambio en los grupos intermedios de gerentes de logística, y (c) asociaciones público-privadas; desde el punto de vista de la utilidad pública, el aspecto más importante es promover una estrategia de desarrollo sostenible.

Sin embargo, con respecto a las barreras de utilizar una flota de vehículos eléctricos (VE) con batería, las preocupaciones de los transportistas son el alto costo de compra, el alcance limitado (100-150 km) y el tiempo de carga más prolongado (generalmente de 6 a 8 horas para una carga completa) (Foltyński, M), aunque las flotas de vehículos

eléctricos pueden contribuir a reducir las emisiones, reducir los costes de mantenimiento y reducir el ruido en áreas controladas de las grandes ciudades (Aljohani & Thompson, 2018). Lebeau et al., (2016) aplicaron un estudio sobre la elección de la flota de vehículos eléctricos utilizando un análisis de elección conjunto y mostró que el atributo de puntuación ecológica se considera poco en la decisión de compra.

A medida que surja una nueva tecnología, puede reducir las limitaciones de la utilización de vehículos eléctricos en la flota de carga, pero mientras tanto, busca el tamaño y la composición óptimos de la flota para minimizar el problema de emisiones. Figliozzi et al., (2018) proporcionan una solución óptima para la flota de carga considerando la duración de la ruta y la capacidad de carga del vehículo en el modelo de minimización de emisiones del ciclo de vida. Trabajos anteriores alientan a los transportistas de carga a sustituir o al menos incorporar vehículos eléctricos en sus flotas. La investigación adicional debería centrarse en generar un tamaño y una composición óptimos de la flota dentro de diferentes contextos urbanos. El paso inicial para proporcionar dicha solución es caracterizar el desempeño de la entrega logística en áreas urbanas y suburbanas, incluidas las características del viaje y el desempeño de los conductores.

3.3.5. Vías de investigación

En el libro sobre transporte urbano de mercancías, los investigadores propusieron una agenda de investigación para estudiar la distribución de bienes urbanos (Macharis & Melo, 2011). Muestra que el conocimiento y la atención en el transporte urbano de mercancías aún es bajo, lo que dificulta predecir y planificar un sistema de transporte urbano eficiente. Para el análisis de la medida de flete, busca “mejores prácticas” que se puedan transferir a otra ciudad o región. También busca la “solución perfecta” que ayude a una distribución urbana sostenible, así como a bajo coste.

Teniendo en cuenta las limitaciones de investigación de estudios anteriores y la preocupación presentada sobre el transporte de mercancías urbano, existen dos lagunas de investigación que pueden contribuir a comprender las actividades de transporte urbano de mercancías, así como a reducir sus impactos negativos, que son:

a) La investigación adicional debe concentrarse en medir y cuantificar el impacto de las diferentes características de la última milla. Ante la falta de estudios

centrados en las emisiones de vehículos comerciales urbanos, conviene motivar estudios cuantitativos.

b) El análisis del comportamiento del transporte de mercancías y la recopilación de datos reales son particularmente difíciles, en parte debido a la gran cantidad de partes interesadas que deben cooperar. Las investigaciones sobre el comportamiento de los conductores logísticos, en particular sobre los patrones de conducción, son en su mayoría ignoradas en investigaciones anteriores. Numerosos estudios sobre el comportamiento de conducción ecológica en usuarios de automóviles privados (Barkenbus, 2010; Alam y Mcnabola, 2014), pero solo unos pocos casos estudiados sobre sus impactos por flotas logísticas (Saito et al., 2008; Díaz-Ramirez, et al., 2017).

4. MATERIAL Y MÉTODO

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 4) 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 la aplicación *R Studio* 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.

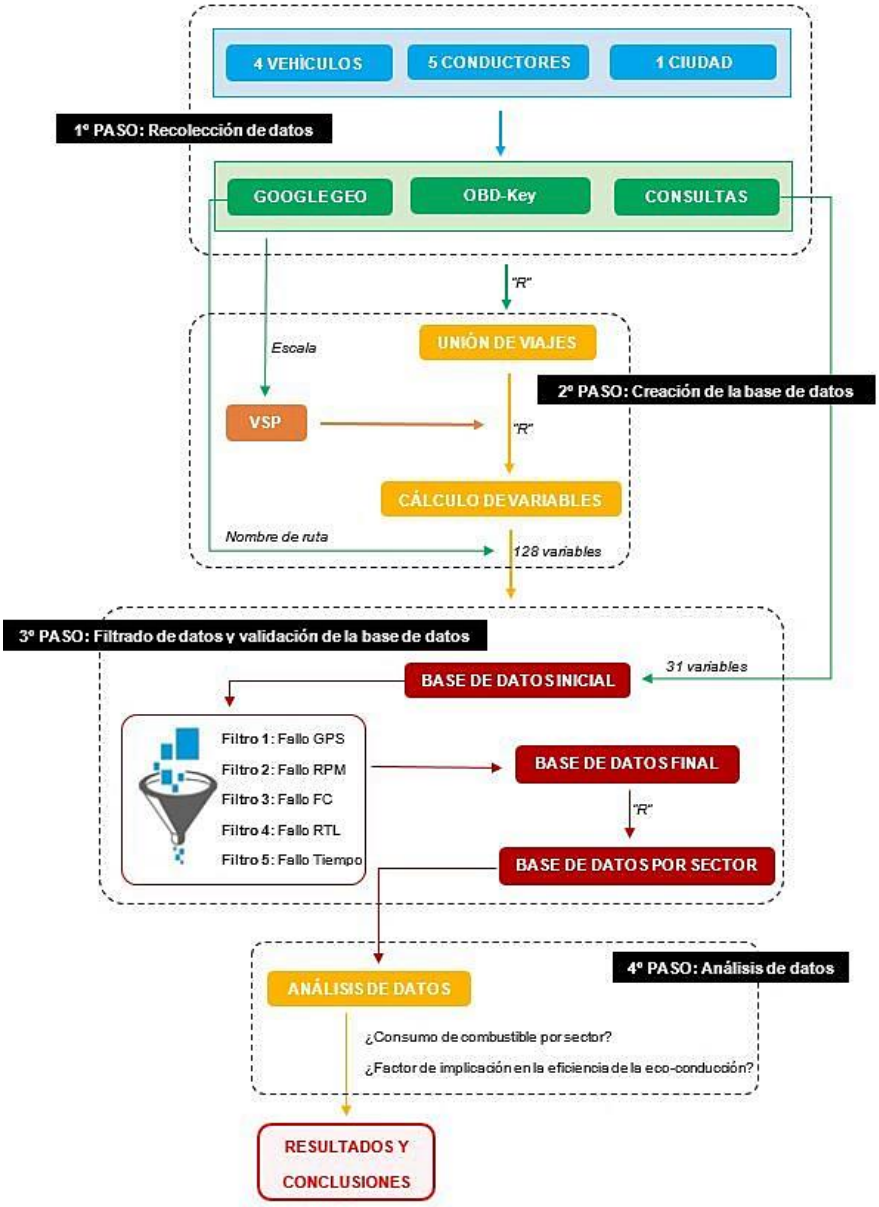

Figura 4. *Diagrama de flujo del proceso metodológico (Fuente: "Metodología Y Modelización De Eco-driving Táctico Y Operacional", Monzón et al., 2016).*

Los resultados favorables de anteriores investigaciones en el campo de la conducción eficiente animan a llevar a cabo un experimento de conducción “eco” en el sector de los vehículos pertenecientes a entidades profesionales donde el consumo de combustible tiene un impacto directo en el rendimiento económico de la empresa. Para ello se lleva a cabo un ensayo en cuatro vehículos pertenecientes a la empresa “Sociedad Estatal Correos y Telégrafos, S.A., S.M.E. (Correos)” en la ciudad de Cáceres (España),

La investigación consta de dos partes, unas pruebas de campo y un posterior estudio y análisis. En las pruebas de campo los vehículos realizan sus respectivas rutas con conducción normal la primera semana y con conducción eficiente en una semana posterior. En ambas conducciones se realiza un almacenamiento y registro de los principales datos de conducción del vehículo (posicionamiento GPS, velocidad, aceleraciones/deceleraciones, etc.). En la segunda parte, se elabora un análisis y estudio de los datos recogidos para poder analizar la eficacia de la conducción eficiente en conductores profesionales.

4.1. PRIMERA FASE: RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA ACTIVIDAD DE LOS VEHÍCULOS EN CARRETERA

El génesis de la investigación se sitúa a mediados del mes de septiembre de 2019 y se desarrolla hasta mediados de octubre, consistiendo en la recolección de datos a través de un dispositivo OBD-Key [OBDKEY, 2020] implementado en los vehículos, el cual almacenaba diferentes parámetros sobre la actividad de los automóviles en sus respectivas jornadas de reparto. En un primer lugar, los conductores ejercieron el tipo de conducción habitual que venían practicando hasta la fecha, después de esta primera extracción de datos, los conductores asistieron a una jornada de instrucción sobre conducción eficiente, con el fin de implementar en su sistemática de manejo del vehículo, actitudes típicas de este modo de conducción. Una vez adquiridos estos conocimientos, los conductores comenzaron a conducir en modo “eco” registrándose también los mismos parámetros de conducción que fueron extraídos en la fase anterior para poder llevar a cabo su comparación. Al final de estas jornadas, se recogieron las sensaciones al respecto en una encuesta realizada a los conductores participantes.

En este tipo de experimentos es necesario el compromiso de los conductores para realizar el ensayo, es decir, el factor humano tiene un peso muy importante en los resultados y eficacia de aplicación de estas técnicas. Adicionalmente, es necesario aclarar que en esta ocasión, las rutas no eran predefinidas (lo que si se hace en otros estudios [M. Zarkadoula, 2007]), sino que estaban sujetas a los itinerarios que marcaban los repartos o bien a la metodología de distribución que los conductores consideraran oportuna. Por tanto, los conductores se enfrentaron a multitud de situaciones de tráfico, lo que afectó a variables que inciden en la investigación como pueden ser la velocidad, tiempos de espera por congestión de tráfico o el confort. No obstante, estos factores son necesarios para evitar sesgos en los resultados que, si son positivos, demostrarían la fácil implementación de la conducción eficiente en los sectores profesionales y lo beneficioso a nivel económico y ambiental que es este tipo de conducción con independencia de la tipología de la distribución de los repartos.

4.1.1. Caso de estudio: Cáceres, España

Cáceres es una ciudad localizada en el oeste de España, con una población de aproximada de 96.000 habitantes y que cuenta con una superficie de 30 km^2. La ciudad posee un significativo pasado histórico, contando con una densidad importante de monumentos y con una morfología urbanística característica de la Edad Media que resulta única, lo que le ha llevado a ser nombrada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en el año 1986 (UNESCO, 1986). El crecimiento económico de la ciudad se desarrolla de forma moderada, aunque se mantiene constante (Cáceres ha tenido un crecimiento del PIB del 3,1% en 2016 y del 6,94% en 2017 [INE, 2019]).

***Figura 5**. Panorámica del centro histórico de la ciudad de Cáceres (España).*

Cáceres posee una Ciudad Monumental, situada en el centro, de carácter urbano peatonal protegido, a la que perimetralmente se han añadido, tras diversas actuaciones urbanísticas, nuevas zonas de ámbito civil que han ido desarrollándose de forma paulatina a lo largo del tiempo. Sin duda, el modo de transporte principal es el automóvil, representando un 55% de los movimientos dentro de la ciudad. La orografía de carácter montañoso que posee el emplazamiento de la ciudad y sus dimensiones, no impiden que el desplazamiento peatonal suponga un tercio de los movimientos, a costa de los medios públicos que solo representan un 10% del total (AYUNTAMIENTO DE CACERES, 2014). La ciudad de Cáceres tiene tres franjas horarias punta en cuanto a los movimientos de transporte para acceso a la ciudad: entre las 8 y las 9h, entrada a los trabajos y los centros de enseñanza (10% por encima de la media), y entre las 18 y 19h, donde se produce el regreso a los hogares (15% superior a la media). Como ejemplo, la Avenida de España, situada en el centro de la ciudad, cuenta con un promedio de 1000 vehículos/hora por cada sentido, creciendo dicho valor hasta 1300v/h a las 14h (AYUNTAMIENTO DE CACERES, 2010).

El crecimiento sostenible de la ciudad pasa por implementar medidas que fomenten el uso del transporte público y la movilidad peatonal. A pesar de que ya se han estado aplicando políticas de protección del medio ambiente y reducción de las emisiones en el centro histórico de Cáceres, que en gran parte está dedicado a los peatones, se ve necesario aumentar el número de zonas con estas características, que excluyan los movimientos de automóviles para alcanzar nuevas y mejores metas de sostenibilidad.

4.1.2. Rutas y condiciones de tráfico

Cáceres es una ciudad pequeña que puede ser atravesada de lado a lado en tan solo 15 minutos. Como se ha dicho anteriormente, para el estudio del experimento en su globalidad, las rutas no siguen itinerarios definidos, se trata de rutas típicas de una jornada de transporte de repartos de un conductor profesional que se distribuyen por casi toda la ciudad y recorren diferentes tipos de vías urbanas, por tanto se encuentran definidas por el objetivo que marcan los destinos de los repartos. En cambio, para el análisis que se realizó examinando rutas más pequeñas, se realiza por tipo de vía, entonces se analiza, en cada tipología, el mismo recorrido para diferentes conductores y vehículos durante diferentes jornadas de trabajo.

Se definen cinco tipos de vías (US DEPARTMENT, 2013), para poder caracterizar los distintos tramos y analizar las rutas específicas de tamaño menor (micro-rutas).

1. Calle local (Local). Este tipo de vía urbana se dispone en el interior de la ciudad. La calzada tiene un carril por sentido de circulación, sin mediana ni aparcamientos. La velocidad máxima de la vía es de 50 km/h.

Figura 6. *Imagen de una calle tipo local en la que se desarrolló parte del experimento (Fuente: GMaps).*

2. Colector urbano (Collector). Carretera que rodea el centro de la ciudad y conecta puntos neurálgicos de esta. Su calzada está compuesta por dos carriles en cada dirección, dispone de mediana y aparcamiento a cada lado. La velocidad está limitada a 30 km/h y en ocasiones está congestionada.

Figura 7. *Calle tipo colector en la que se desarrolló la parte práctica de la investigación (Fuente: GMaps).*

3. Carretera perimetral (Perimeter). Antigua circunvalación de la ciudad integrada ahora en la red urbana. Tiene doble calzada con dos carriles para cada dirección separados con doble línea continua o mediana, su límite de velocidad es 50 km/h y apenas crea congestión de tráfico.

Figura 8. *Captura de una calle tipo perimetral (Fuente: GMaps).*

4. Variante de población (Bypass). Se sitúa como circunvalación exterior rodeando las afueras de la ciudad. Las intersecciones se ejecutan por medio de glorietas y los pasos para peatones, en su mayoría, se regulan por medio de semáforos. Los límites de velocidad se sitúan en una horquilla de entre 40 y 80 km/h.

Figura 9. *Imagen de una vía variante de población (Fuente: GMaps).*

5. Vía interurbana (Interurban). Carreteras situadas fuera de los límites del casco urbano que conectan 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.

Figura 10. *Vía interurbana en la que se realizó la conducción para la investigación (Fuente: GMaps).*

.....

6. CONCLUSIONES

El análisis de resultados consistió en estudiar los parámetros relativos a la modalidad de conducción y su influencia en el consumo de combustible y en los valores de emisiones de CO_2. En términos generales, para que se pueda certificar que se desarrolló una conducción eficiente, los parámetros de velocidad, RPM y aceleración deben reducir sus valores en eco-driving respecto a los de conducción habitual o no ecológica, y esto se debe evidenciar en ahorros de consumo y reducciones de CO_2.

En el estudio del experimento por vehículos, el automóvil participante al que se denominó vehículo 5, es el único que parece experimentar este tipo de reducciones en los parámetros relativos a la conducción, sin embargo este vehículo no obtiene ahorros de combustible ni reducciones en las emisiones. En cambio, el resto de los vehículos, los cuales solo producen reducciones de los parámetros relativos a la modalidad de conducción en contadas ocasiones, es más, la tendencia es que ocurra lo contrario, sí experimenten ahorro de combustible y reducción de los valores de emisiones de dióxido

de carbono, exceptuando el vehículo 2 que apenas muestra cambio en el consumo de combustible teniendo este una leve tendencia al incremento de consumo en modalidad eco-driving.

Aparentemente, en pequeña proporción, observando los vehículos en su conjunto, se muestra una tendencia a la reducción de consumo, pero teniendo en cuenta lo sucedido entre los parámetros de conducción y su influencia en el consumo y emisiones, no se puede certificar que los participantes practicaran una conducción eficiente diferenciada de la conducción habitual que practicaron con anterioridad, ni siquiera los resultados de la encuesta realizada sobre las sensaciones antes y después de conocer y practicar las técnicas de eco-conducción son aclaratorios.

En la otra parte del análisis de la fase experimental, se observa como a medida que la capacidad de servicio de la vía aumenta, si se practica eco-conducción, existe una tendencia al ahorro de combustible y reducción de emisiones a la atmósfera. Además, sí se refleja una relación entre las reducciones de los parámetros de conducción en modalidad ecológica y su influencia en el ahorro de consumo de combustible y reducción de emisiones de CO_2. Sin embargo, la actividad de las jornadas laborales suele transcurrir en mayor medida en rutas locales, colectores y perimetrales que son tipos de vía de menor capacidad y servicio, que en ellas se producen mayor número de paradas y que resulta difícil realizar técnicas de eco-conducción o que estas resulten beneficiosas, es el caso en este experimento que demuestra que en este tipo de vías no resulta favorecedor realizar conducción eficiente.

Adicionalmente, hay que mencionar, un factor muy influyente en los resultados, que es que el objetivo principal del conductor era entregar sus repartos en un determinado horario, lo que hace que en determinadas ocasiones y sobre todo en últimas horas de la jornada de trabajo no existiera una predisposición a practicar la conducción eficiente.

La derivación del estudio de los efectos resultantes es que, de manera general, la leve tendencia al ahorro de combustible y su proporcionalidad en la reducción de emisiones contaminantes, teniendo en cuenta que resulta tedioso diferenciar la modalidad de conducción de los participantes y que eso se ve reflejado en una incoherencia entre lo esperado por las premisas teóricas y anteriores experiencias, no se puede constatar, en esta investigación, que la conducción eficiente sea beneficiosa para el sector de

transporte de mercancías en ciudades pequeñas. Sí se observa una tendencia favorable a medida que la capacidad de servicio de vía aumenta, coincidiendo la aplicación de eco-conducción con efectos favorables en reducción de consumo y emisiones.

REFERENCIAS

- AHN, K., & RAKHA, H. A. (2013). *Network-wide impacts of eco-routing strategies: a large-scale case study.* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 25, 119-130.
- ALAM, MD SANIUL; MCNABOLA, *Aonghus. A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations.* Transport Policy, 2014, vol. 35, p. 42-49.
- ADITJANDRA, P. T. (2018). *Europe's Freight Transport Policy: Analysis, Synthesis and Evaluation.* In Advances in Transport Policy and Planning (Vol. 1, pp. 197-243). Academic Press.
- ALJOHANI, K., & THOMPSON, R. (2019). *A Stakeholder-Based Evaluation of the Most Suitable and Sustainable Delivery Fleet for Freight Consolidation Policies in the Inner-City Area.* Sustainability, 11(1), 124.
- ALVAREZ, E., & DE LA CALLE, A. (2011). *Sustainable practices in urban freight distribution in Bilbao.* Journal of Industrial Engineering and management, 4(3), 538-553.
- ANAND, N., QUAK, H., VAN DUIN, R., & TAVASSZY, L. (2012). *City logistics modeling efforts: Trends and gaps-A review.* Procedia-Social and Behavioral Sciences, 39, 101-115.
- ANDERSON, S., ALLEN, J., & BROWNE, M. (2005). *Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives?* Journal of transport geography, 13(1), 71-81.
- ANDRIEU, C., & SAINT PIERRE, G. (2012). *Comparing effects of eco-driving training and simple advices on driving behavior.* Procedia-Social and Behavioral Sciences, 54, 211-220.
- AXER, S., & FRIEDRICH, B. (2014). *Level of service estimation based on low-frequency floating car data.* Transportation Research Procedia, 3, 1051-1058.
- AZZI, S., REYMOND, G., MÉRIENNE, F., & KEMENY, A. (2011). *Eco-driving performance assessment with in-car visual and haptic feedback assistance.* Journal of Computing and Information Science in Engineering, 11(4), 041005.
- BARKENBUS, J. N. (2010). Eco-driving: *An overlooked climate change initiative.* Energy Policy, 38(2), 762-769.
- BROWNE, M., ALLEN, J., & LEONARDI, J. (2011). *Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London.* IATSS research, 35(1), 1-6.
- BROWNE, M., ALLEN, J., NEMOTO, T., PATIER, D., & VISSER, J. (2012). *Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities.* Procedia-Social and Behavioral Sciences, 39, 19-33.
- DABLANC, L. (2007). *Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize.* Transportation Research Part A: Policy and Practice, 41(3), 280-285.
- DÍAZ-RAMIREZ, J., GIRALDO-PERALTA, N., FLÓREZ-CERON, D., RANGEL, V., MEJÍA-ARGUETA, C., HUERTAS, J. I., & BERNAL, M. (2017). *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.

- DUARTE, G., ROLIM, C., & BAPTISTA, P. (2016). *How battery electric vehicles can contribute to sustainable urban logistics: A real-world application in Lisbon, Portugal.* Sustainable Energy Technologies and Assessments, 15, 71-78.
- ECOWILL. (2013). The golden rules of eco-driving. Retrieved from http://www.ecodrive.org/en/what_is_ecodriving-/the_golden_rules_of_ecodriving/
- ERICSSON, E. (2001). *Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors.* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 6(5), 325-345. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7
- ERICSSON, E., LARSSON, H., & BRUNDELL-FREIJ, K. (2006). *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.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2019). *National action across all sectors needed to reach greenhouse gas Effort Sharing targets*. Available online: https://www.eea.europa.eu/publications/national-action501 across-all-sectors (accessed on 9 June 2020).
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2020), *Transport: increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives*. Available online: https://www.eea.europa.eu/themes/transport/term/increasing-oil-consumption-and-ghg (accessed on 9 June 2020).
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2018). *Trends and projections in Europe 2018*. DOI: https://doi.org/10.2800/931891
- FARIA et al. (2017). *"Driving behavior patterns: impacts on emissions and safety performance"* – NECTAR 2017 International Conference Policy and Environment.
- FIGLIOZZI, M., SAENZ, J., & FAULIN, J. (2018). *Minimization of urban freight distribution lifecycle CO2e emissions: Results from an optimization model and a real-world case study.* Transport Policy.
- FOLTYŃSKI, M. (2014). *Electric fleets in urban logistics. Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 151, 48-59.
- FURTADO, F. (2018). *Towards road freight decarbonization: trends, measures and policies.*
- GARCÍA CASTRO, A. (2016). *Understanding how to reduce road transport emissions: modelling the impact of eco-driving* (Doctoral dissertation, Caminos).

- GARCIA-CASTRO, A., & MONZON, A. (2014). *Using floating car data to analyse the effects of ITS measures and eco-driving*. Sensors, 14(11), 21358-21374.
- GARCIA-CASTRO, A., MONZON, A., & VALDES, C. (2014). *ICT measures to reduce CO2 emissions in metropolitan areas. The case study of Madrid*. Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, Paris, June 14-17.
- GARCÍA, M., J.F. COLOMA AND Y. WANG, *Eco-Driving In Small Cities. Driving Performance In Relation To Driver's Profile*. Transportation research procedia, vol.33, pp. 267-274, 2018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.102
- GARCÍA, M., J.F. COLOMA, Y. WANG & MONZÓN, A., *Green Eco-Driving Effects in Non-Congested Cities*, Sustanability-10-00028.
- GARCIA-CASTRO, A., MONZON, A., VALDES, C., & ROMANA, M. (2017). *Modeling different penetration rates of eco-driving in urban areas: Impacts on traffic flow and emissions.* International Journal of Sustainable Transportation, 11(4), 282-294.
- GEVAERS, R., VAN DE VOORDE, E., & VANELSLANDER, T. (2011). *Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context*. City Distribution and Urban Freight Transport: Multiple Perspectives, Edward Elgar Publishing, 56-71.
- GOBIERNO DE ESPAÑA (2010). *Estrategia Española de movilidad sostenible*. Disponible online: https://www.fomento.es/estrategia-espan%CC%83ola-de-movilidad-sostenible (accessed on 9 December 2019).
- GONZALEZ-FELIU, J., SEMET, F., & ROUTHIER, J. L. (Eds.). (2014). *Sustainable urban logistics: Concepts, methods and information systems* (p. 43). Heidelberg: Springer.
- J.F. COLOMA, M. GARCÍA, ET AL., *(2020) Developing Eco-Driving Strategies Considering City Characteristics.* JAT
- J.F. COLOMA, M. GARCÍA, AND Y. WANG, *Eco-Driving effects depending on the travelled road. Correlation between fuel consumption parameters.* Transportation Research Procedia, vol. 33, pp. 259-266, 2018. Doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.101
- J.F. COLOMA, M. GARCÍA, Y. WANG AND A. MONZÓN, *Green Eco-driving effects in non-congested cities*. Sustainability, vol. 10, no 1, p. 28, 2018. Doi: http://dx.doi.org/10.3390/su10010028
- JIMENEZ-PALACIOS, JOSE LUIS. *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (1998).

- KIRCHER, K., FORS, C., & AHLSTROM, C. (2014). *Continuous versus intermittent presentation of visual eco-driving advice.* Transportation research part F: traffic psychology and behavior, 24, 27-38.
- LEBEAU, P., MACHARIS, C., & VAN MIERLO, J. (2016). *Exploring the choice of battery electric vehicles in city logistics: A conjoint-based choice analysis.* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 91, 245-258.
- LEE, T. W., LEE, B. H., CHO, S. H., PARK, J. H., EOM, M. D., KIM, J. C., & LEE, D. Y. (2009). *On-road testing and calculation of emission factor and fuel economy*. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 17(3), 90-101.
- LINDHOLM, M., & BEHRENDS, S. (2012). *Challenges in urban freight transport planning– a review in the Baltic Sea Region*. Journal of Transport Geography, 22, 129-136.
- MACHARIS, C., & MELO, S. (2011). *Introduction-city distribution: challenges for cities and researchers*. City distribution and urban freight transport: multiples perspectives, Edward Elgar Publishing, Northampton, 1-9.
- ONODA, T. (2009). *IEA policies—G8 recommendations and an afterwards*. Energy Policy, 37(10), 3823-3831. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.021
- ORFILA, O. (2011). *Impact of the penetration rate of eco-driving on fuel consumption and traffic congestion.* Paper presented at the YRS11: Young Researchers Seminar 2011, 15p.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT AND INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM WORKING GROUP (2010). *Greenhouse Gas Reduction Strategies in the Transport Sector*. Available online: https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/10ghgtrends.pdf (accessed on 9 December 2019).
- PATIER, D., & BROWNE, M. (2010). *A methodology for the evaluation of urban logistics innovations.* Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2(3), 6229-6241.
- PATIER, D., DAVID, B., CHALON, R., & DESLANDRES, V. (2014). *A new concept for urban logistics delivery area booking*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 125, 99-110.
- QIAN, G., & CHUNG, E. (2013). *Microscopic simulation study of eco-driving performance at urban intersections.* In 13th World Conference on Transport Research, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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 (2011): 1-11.
- RAKHA, H., & KAMALANATHSHARMA, R. K. (2011). *Eco-driving at signalized intersections using V2I communication*. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011, 341-346. doi:10.1109/ITSC.2011.6083084.

- SAITO, A., UEKI, S., NAGATOMI, Y., SAWAZU, N., & TAKADA, Y. (2008). *Analysis of CO2 reduction mechanism by eco-driving with light duty diesel freight vehicle in real traffic conditions* (No. 2008-01-1304). SAE Technical Paper.
- SCHEME, F. O. R. (2015). *Fleet operator recognition scheme standards*. Retrieved from* HYPERLINK" http://www. fors-online. org. uk/cms/wp-content/uploads/2015/04/FORSStandards_v3. 2a. pdf http://www. fors-online. org. uk/cms/wp-content/uploads/2015/04/FORSStandards_v3. 2a. pdf.
- SCHLIWA, G., ARMITAGE, R., AZIZ, S., EVANS, J., & RHOADES, J. (2015). *Sustainable city logistics—Making cargo cycles viable for urban freight transport*. Research in Transportation Business & Management, 15, 50-57.
- SULLMAN, M. J., DORN, L., & NIEMI, P. (2015). *Eco-driving training of professional bus drivers–Does it work?* Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 58, 749-759.
- UNITED NATIONS, "CLIMATE CHANGE CONFERENCE COP 25", 2019. Available online: https://unfccc.int/cop25 (accessed on 9 June 2020).
- VAN DUIN, J. H. R., TAVASSZY, L. A., & QUAK, H. J. (2013). *Towards E (lectric)-urban freight: first promising steps in the electric vehicle revolution*.
- WANG, Y., & BOGGIO-MARZET, A. (2018). *Evaluation of Eco-Driving Training for Fuel Efficiency and Emissions Reduction According to Road Type*. Sustainability, 10(11), 3891.
- WISETJINDAWAT, W. (2010). *Review of good practices in urban freight transportation*. Sustainable Urban Freight Transport, 44.
- XIA, H.; BORIBOONSOMSIN, K.; BARTH, M. *Dynamic eco-driving for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits*. J. Intell. Transp. Syst. 2013, 17, 31–41. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2012.712494.
- XU, R., & WUNSCH, D. (2008). *Clustering* (Vol. 10). John Wiley & Sons.
- YAO, E. AND SONG, Y. *Study on eco-route planning algorithm and environmental impact assessment. Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 2013. pp.42-53.