

OPERATIONAL EFFICIENCY OF LAST MILE DELIVERY THROUGH DATA ANALYTICS

Alessandra Boggio-Marzet

PhD Student, TRANSyT-Universidad Politécnica de Madrid

Andrés Monzón de Cáceres

Profesor Catedrático, TRANSyT-Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Hoy en día, las ciudades están experimentando un proceso de urbanización, y el transporte urbano de mercancías tiene que hacer frente al actual auge del comercio electrónico, que produce un fuerte aumento de la actividad de transporte de mercancías y complica la logística de las ciudades. A partir de los resultados de un caso de estudio real, este artículo pretende identificar las principales (in)eficiencias de las entregas postales de última milla en condiciones reales de tráfico, tanto en términos de consumo energético como de características operativas. Con esta investigación, se quiere ofrecer una visión más amplia a los planificadores de transporte y a los responsables políticos en cuanto a la gestión, planificación y funcionamiento de la distribución urbana de última milla.

Durante un mes, trece conductores de una misma empresa logística condujeron vehículos ligeros eléctricos y diésel para sus entregas habituales. Mientras tanto, se registraron instantáneamente la posición GPS, la velocidad y otros parámetros de los vehículos: se analizaron 242 rutas de reparto, cada una de las cuales duraba unas 4 horas. Se identificaron 4.479 microviajes de entrega de paquetes individuales, correspondientes a 7.262 km de ruta recorrida en el centro de la ciudad y en la zona periurbana de Madrid.

Los resultados de este análisis subrayan claras ineficiencias en el rendimiento actual de las entregas de última milla, tanto a nivel energético como a nivel operativo. En este contexto, una gran proporción de las entregas de última milla consideradas en el estudio debería pasarse a modos de transporte no motorizados, especialmente en el centro de la ciudad, ya que el 40% de ellas se caracterizan por una velocidad media inferior a 10 km/h. Además, la proximidad de los puntos de entrega entre sí, la falta de espacio de aparcamiento y los frecuentes atascos producen una considerable ineficiencia en términos de consumo energético. A través de este estudio, se pone de manifiesto que la mayoría de las ineficiencias operativas en las entregas de última milla son similares independientemente de la zona de entrega, pero las soluciones deberían variar en función de ellas. Los responsables de las administraciones de las ciudades y los operadores logísticos deberían trabajar de forma proactiva para desarrollar nuevos esquemas logísticos que minimicen los impactos negativos del transporte urbano de mercancías, cambiando las tendencias actuales de altas emisiones que producen.

1. INTRODUCCIÓN

Según el informe social de las Naciones Unidas, a partir de 2020 más del 50% de la población mundial vive en zonas urbanas (Naciones Unidas, 2020), lo que produce, entre otro, un aumento inevitable del movimiento de mercancías dentro de las ciudades. Debido a la antigüedad de las flotas de vehículos y a la frecuencia de sus paradas, el reparto urbano de mercancías es responsable de elevadas emisiones locales y afecta directamente a la salud de los ciudadanos: en las grandes áreas urbanas europeas, los vehículos de carga son responsables de un tercio de las emisiones de NOx relacionadas con el transporte (Macharis y Melo, 2011; Marcucci et al., 2017).

Por otro lado, el reciente crecimiento del comercio electrónico ha dado lugar a un aumento significativo del número de entregas directas al consumidor y a los retos asociados de "última milla", sobre todo en las zonas urbanas (Savelsberg y Woensel, 2016). De hecho, la entrega de última milla suele ser uno de los capítulos más caros, menos eficientes y más contaminantes de la cadena logística (Gevaers, et al., 2011): los problemas de los costes de la entrega de última milla suponen posiblemente entre el 13% y el 75% del coste total de la logística.

En los últimos años, se han investigado y promovido diferentes estrategias e iniciativas para hacer frente a los retos de la entrega de última milla. Para aumentar su eficiencia y mitigar los impactos negativos medioambientales y socioeconómicos, los estudios anteriores se centraron en identificar soluciones estratégicas, administrativas o de planificación urbana específicas para la logística urbana. Entre otras, herramientas relativas a la mejora de las rutas de los vehículos, flotas logísticas "verdes y limpias", las innovaciones tecnológicas de los vehículos y la cooperación de los competidores (Savelsbergh y Woensel 2016).

A pesar del creciente interés por el tema, hay una escasez de estudios basados en datos reales sobre la entrega de última milla, lo que permitiría comprender en profundidad el problema. De hecho, muchos estudios se basan en simulaciones haciendo que la mayor parte de la investigación actual sea cualitativa y no cuantitativa. Como consecuencia, las soluciones propuestas suelen ser excesivamente amplias y generales, sin diferenciar por contexto geográfico y entorno urbano. Teniendo en cuenta estas limitaciones, esta investigación pretende contribuir a la comprensión de las actividades de transporte urbano de mercancías y a reducir su impacto negativo en la sociedad.

Basándonos en un caso de estudio real, investigamos los principales patrones y características operativas de las entregas postales de última milla en diferentes contextos geográficos dentro de la Comunidad de Madrid, en España.

A través de una campaña de toma de datos reales realizada en colaboración con Correos, obtenemos datos que muestran la eficiencia (o ineficiencia) operativa de los envíos postales de última milla en diferentes entornos, siendo urbanos y periurbanos. El objetivo de la investigación es demostrar cómo las características operativas pueden variar en una misma empresa logística según el contexto geográfico. Además, se pretende poner de manifiesto la inadecuación de la aplicación de determinadas soluciones en algunos entornos urbanos.

2. TENDENCIAS Y ESTADO ACTUAL DE LA DISTRIBUCIÓN URBANA DE ÚLTIMA MILLA

En 2020, el último informe social mundial de las Naciones Unidas afirma que, por primera vez en la historia, hay más gente viviendo en las ciudades que en las zonas rurales (Naciones Unidas, 2020). De hecho, cada vez más, existe una tendencia de desplazamiento de la población del campo a la ciudad. En la actualidad, el 55% de la población mundial vive en zonas urbanas, una proporción que se espera que aumente hasta el 68% en 2050: las proyecciones muestran que la urbanización, combinada con el crecimiento global de la población mundial, podría añadir otros 2.500 millones de personas a las zonas urbanas en 2050 (Naciones Unidas, 2020). En el transcurso de un siglo se habrá producido un cambio de paradigma: el entorno vital menor se ha convertido en el dominante (Monzón y Boggio-Marzet, 2020). Por ello, el sistema de transporte debe seguir el ritmo de esta tendencia a la urbanización; debe adaptarse y tratar de avanzar hacia la aplicación de estrategias de movilidad sostenible.

En este contexto, un transporte de mercancías eficiente y bien planificado puede mejorar el funcionamiento de una ciudad y aumentar su competitividad. De hecho, es necesario considerar la movilidad de las mercancías en las zonas urbanas no solo como una cuestión de tráfico o medioambiente, sino también como un problema concreto de gestión de un sistema socioeconómico complejo, ya que afecta a las funciones de uso de todo el "sistema" de la ciudad. Es necesario encontrar soluciones que permitan alcanzar un equilibrio entre un sistema logístico urbano eficaz y un nivel sostenible de externalidades producidas, con especial atención a la congestión del tráfico, las emisiones contaminantes y la seguridad.

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, las ciudades representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía y al menos el 70% de las emisiones de carbono, a pesar de que sólo ocupan el 3% de la superficie terrestre (PNUD 2019). Otra vez, la evolución de la movilidad urbana resulta ser una clave fundamental para cambiar la realidad actual de un entorno poco propicio para una adecuada calidad ambiental.

Estudios anteriores estiman que el transporte urbano de mercancías representa hasta el 30% de las emisiones totales del tráfico, dependiendo del contexto local (Marcucci et al., 2017).

Dentro de la movilidad urbana, la entrega de última milla es el último tramo de la cadena logística directa al consumidor, y suele ser uno de los capítulos logísticos más caros, menos eficientes y más contaminantes (Gevaers, et al., 2011). La entrega de última milla se define como el movimiento de mercancías desde un centro de transporte hasta el destino final. Así, además de las externalidades reconocidas en la mayor parte de la literatura (como el tráfico, la ocupación del suelo urbano, las emisiones de GEI y el ruido), los problemas de LMD también están relacionados con la recogida de mercancías y correos, y con aquellos paquetes que son objeto de reclamaciones o entregados a un cliente final equivocado. Todo ello, puede suponer entre el 13% y el 75% del coste logístico total de una empresa.

Además del fenómeno de la urbanización, el sistema de transporte urbano de mercancías tiene que hacer frente al actual auge del comercio electrónico, que ha producido un aumento drástico del número de paquetes entregados cada día y ha incrementado las expectativas de los clientes, que ahora incluyen no solo la entrega rápida sino también la gratuita. Solo en España, el comercio electrónico superó los 48.800 millones de euros en 2019, lo que supone un aumento de casi el 25% desde el año anterior, con un incremento interanual constante (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, 2020). Según Ragás Prat (2018), el "Boom" del comercio electrónico conlleva dos consecuencias principales: primero, el número de entregas y, la movilidad de los vehículos de mercancías que circulan por la ciudad que se multiplica.

En segundo lugar, cualquier dirección se convierte en un potencial punto de entrega. En otras palabras, la distribución urbana de mercancías se lleva a cabo en zonas residenciales no diseñadas para acoger este tipo de operaciones a escala masiva. En este contexto, que la distribución urbana de mercancías se está transformando rápidamente y requiere respuestas urgentes por parte de los operadores y las administraciones.

Varios autores han identificado tendencias y avances tecnológicos que conducen a un nuevo paradigma de la logística urbana. Según Sevelsbergh y Woansel (2016), las tendencias de crecimiento de la población y la urbanización, junto con el aumento del comercio electrónico, el deseo de rapidez y la economía colaborativa, aumentan la complejidad de la logística de la ciudad y agravan sus impactos negativos en la congestión, la seguridad y el medio ambiente. Por otro lado, las nuevas y emergentes tecnologías, como la conectividad digital, el big data y la tecnología del automóvil, podrían impulsar la innovación en la logística de las ciudades y disminuir potencialmente estos efectos.

Para aumentar la eficiencia energética, mitigar sus impactos negativos sobre el medioambiente y hacer frente a los retos de la entrega de última milla, se promueven varias estrategias e iniciativas, como las mejoras en las rutas de los vehículos a través de la instalación de sistemas de Green navigation, la elctricificación de la flota, las innovaciones tecnológicas de los vehículos y la cooperación de los competidores (Schliwa et al., 2015;

Savelsbergh y Woensel 2016; de Mello Bandeira, et al., 2018; Alho et al., 2018; Giordano et al., 2018; Lafkihi et al., 2019; Simoni et al., 2019). Sin embargo, estas iniciativas encuentran en la práctica varias dificultades de aplicación, como la falta de información en tiempo real para ofrecer un servicio dinámico de rutas de vehículos; los costes de inversión que son muy elevados para los transportistas; y los competidores del sector del transporte de mercancías que no están dispuestos a compartir información valiosa para cooperar, ya que la misma información forma parte de su negocio. Se necesitan estrategias o soluciones factibles y rentables.

Ranieri et al. (2018) agruparon diferentes soluciones de última milla para el transporte de mercancías según cuatro aspectos principales: innovación en los vehículos, estaciones o puntos de proximidad, soluciones colaborativas y cooperativas e innovación en políticas e infraestructuras públicas. En la misma línea, Lafkihi et al. (2019) y Mangiaracina et al. (2019) llevaron a cabo una exhaustiva y extensa revisión bibliográfica sobre los retos y oportunidades del transporte de última milla e identificaron varias soluciones efectivas, entre las que se encuentran por ejemplo las entregas nocturnas, que pueden desplazar el tráfico a las horas valle, reduciendo así la congestión diurna y, por tanto, las emisiones de GEI relacionadas. Según Olsson et al. (2019), para optimizar las operaciones de última milla, las empresas pueden optar por diferentes niveles de actuación: (1) nivel estratégico, como la ubicación de los centros de distribución, (2) nivel táctico, como el tamaño de la flota y las entregas nocturnas, y (3) nivel operativo, como el enrutamiento de los vehículos.

La literatura señaló la importancia de darse cuenta de que las circunstancias geográficas, económicas, sociales y culturales afectan a la logística de la ciudad y a la percepción de la gente sobre los temas críticos relacionados con la logística urbana. Dependiendo del área de aplicación y de la intensidad, las mismas iniciativas pueden dar lugar a resultados diferentes en cuanto a la reducción de los impactos sociales y medioambientales del transporte de mercancías. Además, la mayoría de las publicaciones científicas sobre el tema abordan la política de transporte con un enfoque teórico sin presentar datos reales; otras simulan las soluciones en un área específica, sin tener en cuenta los diferentes entornos a aplicar. Faltan datos reales sobre las características operativas de las empresas logísticas, y la falta de datos reales complica la investigación de soluciones sostenibles para la logística urbana.

Resulta esencial caracterizar adecuadamente los viajes urbanos de mercancías tanto en las zonas urbanas como en las periurbanas, en las que hay una mayor demanda de movimientos de mercancías, teniendo en cuenta que todavía falta una comprensión completa del tema. Hasta donde sabemos, hay una verdadera escasez de estudios que presenten un análisis de las ineficiencias de las entregas de última milla basado en datos reales de pruebas de campo. A partir de aquí, el objetivo de esta investigación.

Tras introducir el contexto de la investigación, la motivación del trabajo y el estado del arte, la sección 3 presenta la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación, incluyendo la definición del caso de estudio, la campaña de toma de datos y el procesamiento de los mismos. El análisis de los resultados y la discusión se presentan en la Sección 4. Por último, en la sección 5 se describen las principales conclusiones y recomendaciones futuras.

3. METODOLOGÍA

Para este trabajo se ha desarrollado una metodología sistemática. En primer lugar, se ha definido el estado del arte mediante la realización de una profunda y exhaustiva revisión bibliográfica de investigaciones y artículos anteriores (Sección 2). Esto ayuda a centrarse en las lagunas de investigación más urgentes en el transporte urbano de mercancías, proporcionando problemas y desafíos, así como comparando los impactos de las estrategias actuales ya implementadas en la entrega de última milla. Este trabajo, quiere analizar las pautas operativas de la distribución urbana de última milla, con el objetivo de identificar sus principales ineficiencias, tanto operativas como energéticas, y poder actuar sobre las mismas. Para ello, contamos con una campaña de toma de datos reales en colaboración con la empresa logística de Correos.

CORREOS es el servicio público postal de España (100% estatal) con 51.000 empleados, que distribuye más de 3.600 millones de envíos al año. Con el apoyo de la empresa, fue posible realizar la campaña de toma de datos simultáneamente en la zona de reparto urbana y peri-urbana de Madrid, gracias a la colaboración de 13 conductores profesionales de dos centros de distribución urbana (CDU) de CORREOS en la misma área metropolitana de Madrid. Además, la ventaja de colaborar con una empresa pública estatal es facilitar la homogeneidad de la muestra. De hecho, la flota de vehículos está compuesta para ambos casos por vehículos ligeros diesel y eléctricos del mismo fabricante y modelo. Además, el hecho de considerar una zona de reparto urbana y otra peri-urbana dentro de la misma área metropolitana de Madrid, hace que las circunstancias económicas de ambas zonas sean mayoritariamente homogéneas.

La campaña de toma de datos tuvo lugar en septiembre y octubre de 2018 en zonas de reparto tanto urbanas como peri-urbanas de Madrid. 13 conductores de la misma empresa condujeron a lo largo de su normal ruta de trabajo vehículos diésel o eléctricos de carga ligera mientras entregaban paquetes en el área Metropolitana de Madrid. En todos los vehículos diésel que participaron en la prueba de campo había una llave OBD preinstalada, que registraba segundo a segundo la posición GPS del vehículo, así como la velocidad, el tiempo de viaje y otras variables. Para los vehículos eléctricos, las mismas variables fueron monitorizadas y registradas segundo a segundo a través de un teléfono móvil en el que estaba preinstalada la App Mytracks.

Además de las variables registradas, a través de la programación con el software R -un entorno de software libre para la computación estadística y los gráficos- y la ayuda de ArcGis, se calcularon otras variables instantáneas relativas al comportamiento de conducción, al consumo de energía y a las condiciones de la carretera. Tras la toma de datos y el cálculo de las variables, se crea finalmente el conjunto de datos y se valida a través de su procesamiento. Así, como conjunto de datos se almacenan dos tipologías de datos: datos relacionados con el viaje y datos relacionados con el patrón de conducción.

El último paso de la metodología es el análisis de los datos. El análisis de datos tiene como objetivo caracterizar la entrega de última milla en términos de distancia, velocidad, tiempo de parada, etc., en diferentes contextos geográficos, ya sean urbanos o peri-urbanos. Para caracterizar el rendimiento operativo de la entrega de última milla y presentar en qué medida varían las operaciones de distribución para una misma empresa en dos zonas de entrega estudiadas, urbana o peri-urbana, adoptamos el método estadístico. Los resultados obtenidos, deberían proyectarse a las empresas de distribución de mercancías, para mejorar su impacto ambiental y económico.

3.1 El caso de estudio

El caso de estudio se desarrolla en el área metropolitana de Madrid, capital de España. Madrid es la principal ciudad de España, capital del país y de la misma Comunidad de Madrid. El área metropolitana asociada a la ciudad tiene una población de 6,6 millones de habitantes, lo que la convierte en una de las más pobladas de la Unión Europea; la mitad de los habitantes se concentran en la misma ciudad de Madrid (Monzón et al., 2017).

El Área Metropolitana de Madrid tiene una extensión de 8.030 km², con una proporción de superficie urbanizada del 11%. Tres autopistas orbitales rodean la ciudad (la M-30, M-40 y M-50) a las que se accede desde siete autopistas radiales. Por lo general, el terreno que rodea la ciudad es relativamente llano, salvo la cordillera, que es relativamente remota y fronteriza, situada en el noroeste de la provincia.

Los datos en los que se basa el estudio, derivan de una campaña de toma de datos reales realizada en 2018 en colaboración con Correos, que es el servicio postal nacional español (de titularidad 100% estatal). Cuenta con 51.000 empleados y distribuye más de 3.600 millones de envíos al año. Dentro de la Comunidad de Madrid, Correos cuenta con 27 CDU que realizan la distribución en vehículo ligero: 15 están ubicados dentro de la ciudad de Madrid y 12 fuera de la ciudad. Dos de ellos, uno situado en el centro de la ciudad y el otro en la zona periurbana de Madrid, participaron en la prueba de campo, lo que hace que nuestro experimento sea bastante representativo de la realidad.

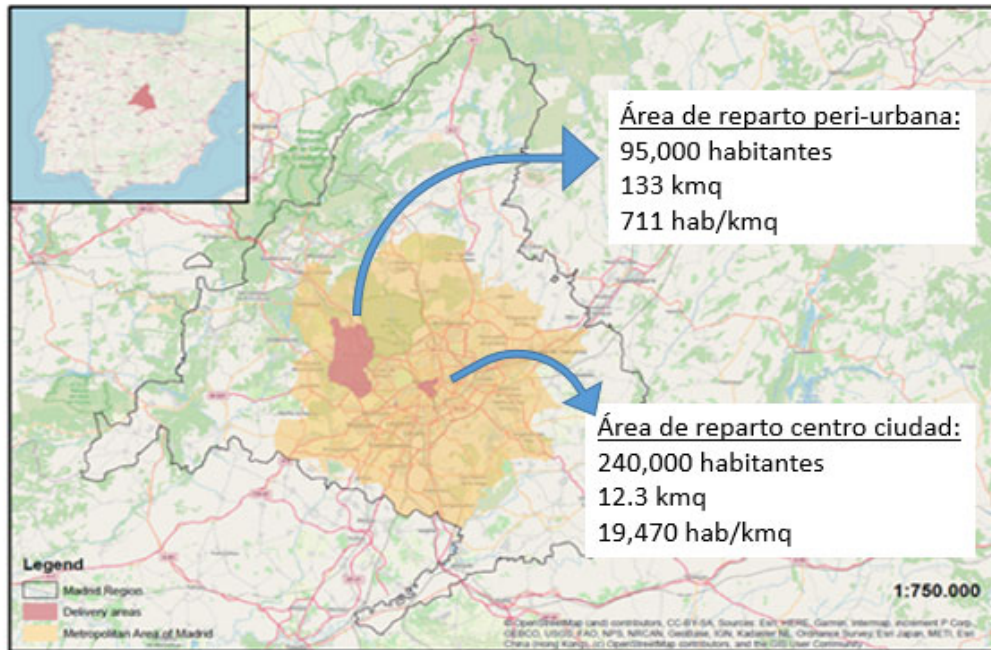


Figura 1- La Región de Madrid y las áreas de reparto del experimento

La figura 1 muestra las dos áreas de reparto involucradas en el experimento, que son un punto clave para entender las características operativas de la distribución urbana de última milla. Uno de los dos depósitos de Correos se encuentra en el municipio de Las Rozas, situado en la franja noroeste del Área Metropolitana de Madrid, y cubre un área de entrega periurbana de más de 130 km². El otro depósito está situado en el centro de la ciudad de Madrid, y da servicio a un área de entrega diez veces menor, de unos 12 km², pero 27 veces más densa que la de Las Rozas.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de esta investigación es determinar las principales ineficiencias operativas y energéticas de las actividades de distribución urbana de última milla. Los datos en los que se basa nuestro análisis proceden de un experimento realizado en condiciones reales de tráfico para estudiar la cuestión a partir de datos y circunstancias muy reales.

La campaña de toma de datos tuvo lugar durante cuatro semanas. Durante un mes, 13 conductores profesionales participaron en la prueba de campo, siendo 11 hombres y 2 mujeres, con edades comprendidas entre los 33 y los 62 años. Ellos condujeron vehículos de reparto eléctricos y diésel a lo largo de sus rutas de trabajo habituales, mientras que la posición GPS, la velocidad y otros parámetros se recogían instantáneamente cada segundo.

En total, se registraron 242 turnos de trabajo de reparto válidos (cada uno de ellos correspondiente a una ruta de reparto) de unas cuatro horas cada uno; así, se analizaron 1.050 horas de conducción, que cubrieron 7.262 km de recorrido.

Las rutas no estaban predefinidas, sino que el conductor las definía cada día de forma diferente para optimizar todas las entregas durante su jornada laboral. Por lo tanto, los conductores se enfrentaron a diferentes situaciones de tráfico, lo que afectó a las variables de la investigación, como la velocidad y los tiempos de espera debidos a la congestión del tráfico. No obstante, este aspecto refleja su trabajo real.

Por último, después de cada ruta de entrega, recogimos la opinión de cada conductor a través de un breve cuestionario en el que, entre otros puntos, podían informar de cualquier incidencia encontrada, como la congestión del tráfico o la falta de aparcamiento. Esta información fue muy útil para entender los problemas reales relacionados con la distribución de paquetería según las diferentes zonas de entrega.

3.2 Definición del Dataset

Para llevar a cabo el siguiente análisis y alcanzar los objetivos de la investigación, fue necesario definir el conjunto de datos en dos dimensiones diferentes: las rutas de entrega diarias – ruta de reparto - y los microviajes de entrega de cada paquete – microviaje. Cada ruta de reparto contiene un cierto número de entregas de paquetes (microviajes) cuyas características varían en función de las distintas condiciones de tráfico y entorno. Así, hemos creado dos bases de datos diferentes: la primera adopta la forma de rutas de reparto y describe los principales aspectos del reparto postal de última milla en términos de características generales de funcionamiento; la segunda permite caracterizar los patrones de conducción propios de los microviajes de reparto de paquetes individuales y comprender la ineficiencia energética durante el reparto.

Para ello, utilizamos todos los datos registrados para definir manualmente los microviajes de entrega dentro de cada ruta de reparto, basándonos en los registros instantáneos.

Seleccionamos aquellos segundos en los que la velocidad era nula, y si el tiempo consecutivo con velocidad nula era superior a 2 minutos (± 30 segundos dependiendo del posicionamiento GPS) lo considerábamos como una parada de entrega entre dos microviajes consecutivos. No obstante, este no era un criterio absoluto, y teníamos que comprobarlo manualmente con los datos del GPS. Así, creamos dos conjuntos de datos diseñados como base para el análisis mediante la programación en R, un conocido entorno de software libre para la computación estadística y los gráficos. La primera base de datos (Ruta de entrega) cuenta con 242 rutas de entrega, cada una de las cuales incluye unas cuatro horas de conducción. La segunda base de datos (microviajes) consta de 4.479 microviajes de entrega de paquetes individuales. Así, se han analizado 1.050 horas de conducción, correspondientes a 7.262 km de recorrido: 1.965 km en el centro de Madrid y 5.297 km en la zona periurbana de Madrid.

Como se ha mencionado anteriormente, nuestro objetivo es identificar las principales ineficiencias de la entrega de última milla tanto en términos operativos como de consumo energético.

En el caso de las ineficiencias operativas, nos basamos en el análisis estadístico basado en las dos bases de datos creadas, y en las opiniones de los conductores. Para el caso del análisis de la ineficiencia energética del vehículo, hemos considerado la base de datos compuesta por microviajes de entrega de paquetes individuales, considerando varios parámetros de conducción que han demostrado tener una influencia significativa en el consumo de energía del vehículo (Ericsson, 2001; Lois et al., 2019; García-Castro et al., 2018).

4. ASPECTOS PRINCIPALES DE LA DISTRIBUCIÓN DE ÚLTIMA MILLA

Una vez completado el procesamiento de los datos, desarrollamos un método de análisis de los mismos, es decir, la correcta manipulación de los elementos, para generar y abordar resultados significativos en relación con los objetivos de investigación fijados. Adoptamos métodos estadísticos para caracterizar el rendimiento operativo de la entrega de última milla, y para presentar el grado de variación de las operaciones de distribución para una misma empresa en dos zonas de entrega estudiadas (urbana y periurbana), así como sus ineficiencias. Así, en primer lugar, definimos las principales características operativas de las entregas de última milla para mejorar el conocimiento de la actividad de reparto en las dos zonas consideradas. A continuación, identificamos sus principales ineficiencias: tanto en términos de energía como de características operativas, tanto en la zona de reparto urbana como en la periurbana.

4.1 Ineficiencias energéticas en la distribución de última milla

Para tener una idea concreta de los principales aspectos de las actividades de reparto, se presenta la siguiente tabla. Distinguiendo entre zona de reparto periurbana o urbana, la Tabla 1 muestra los valores medios, así como el mínimo y el máximo, de las principales características operativas según la zona de reparto

Parámetros	Área Peri-Urbana (Las Rozas)			Área urbana Centro ciudad (Madrid)		
	Min	Max	Media	Min	Max	Media
Longitud ruta de reparto [km]	17.38	93.67	50.93	5.64	55.44	14.34
Tiempo de ruta de reparto [hh:mm]	02:27	06:22	04:24	02:02	05:58	03:57
Longitud microviaje [km]	0.02	19.22	2.25	0.01	6.82	0.77
Velocidad microviaje [km/h]	0	94.9	24.8	0	44.02	12.8
% Tiempo de microviaje con velocidad < 3km/h	0%	70%	9%	0%	87%	21%

Tabla 1- Características operativa de las rutas de reparto

A pesar de que el tiempo total para cumplir la ruta de reparto de ambos CDU implicados en la prueba de campo es similar (una media de 4 horas), en la zona de entrega urbana, la distancia media recorrida durante una ruta de entrega es de 14,3 km, que es 3,5 veces menor que en la periurbana. En el caso urbano, durante el 21% del tiempo de viaje la velocidad es inferior a 3 km/h. Además, el 50% de los microviajes en la zona es inferior a 477 metros de longitud y se realiza con una velocidad media inferior a 13 km/h.

El caso periurbano es bastante diferente en términos de características operativas. La distancia media recorrida por cada conductor durante la ruta de reparto es de 50,9 km, y la distancia media para entregar un solo paquete es de 2,25 km (SD: 3,24), lo que implica una zona bastante dispersa. Allí, el 50% de los microviajes tiene una longitud superior a 1,1 km. La velocidad media es de 25 km/h y el porcentaje de tiempo a velocidades operativas inferiores a 3 km/h es del 9%, menos de la mitad del porcentaje propio del centro ciudad.

Además, la velocidad instantánea del vehículo es un factor decisivo a la hora de definir la eficiencia energética de la entrega de última milla. La imagen siguiente (Figura 2) muestra la velocidad instantánea de un vehículo durante su ruta de reparto, tanto en zona urbana como periurbana.

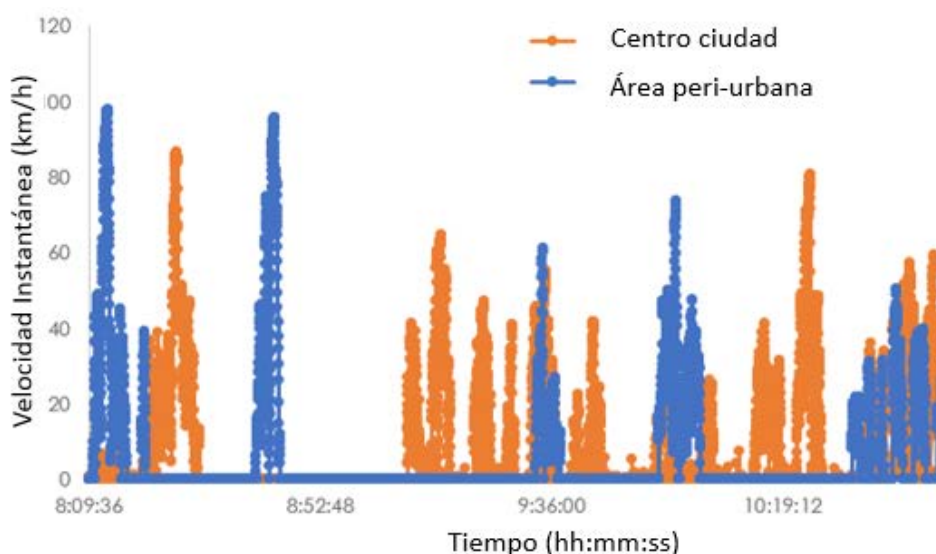


Figura 2- Velocidad instantánea del vehículo durante una ruta de reparto en centro ciudad y en área peri-urbana

En el centro ciudad, los conductores conducen casi tres veces más despacio que en área periurbana, y el 20% del tiempo en el centro ciudad el vehículo está parado debido a la congestión de la carretera, o al semáforo o al hecho de entregar el paquete en sí. De hecho, la baja velocidad de circulación puede deberse a varios factores. Según nuestros datos, en el centro de la ciudad, entre el 16% y el 27% del tiempo de viaje se pasa con velocidades operativas inferiores a 3 km/h. En concreto, el 35% de los microviajes en el centro de la ciudad tiene una velocidad media de 7 km/h, y las velocidades superiores a 19 km/h sólo se

alcanzan en el 5% del tiempo de viaje. Por lo tanto, estas entregas podrían realizarse con otros medios de transporte distintos de los vehículos ligeros, ya que la distancia media de las entregas individuales es inferior a 500 m, una longitud que puede cubrirse fácilmente a pie o en bicicleta, por ejemplo. Además, la covarianza de la velocidad (es decir, la variabilidad de la velocidad durante la conducción) durante estas entregas es la más alta registrada, hasta 0,8 en la mayoría de los casos, lo que pone de manifiesto un estilo de conducción caracterizado por altas aceleraciones y desaceleraciones que, en parte debido a la red de carreteras y los flujos de tráfico, aumentan el consumo de combustible y las emisiones resultantes (Lois et al., 2019). Allí, aunque se mantenga la velocidad reducida, el alto nivel de covarianza hace que el consumo energético aumente notablemente, y en consecuencia el consumo de combustible y las emisiones.

Para aclarar el concepto, la siguiente imagen (Figura 3) muestra el posicionamiento instantáneo y la velocidad de un vehículo en zona urbana durante una ruta de reparto. Los colores se corresponden con la velocidad operativa del vehículo: rojo para la velocidad inferior a 10 km/h, amarillo para la velocidad entre 10 km/h y 30 km/h y verde para la velocidad superior a 30 km/h.



Figura 3-Posicionamiento y velocidad instantánea de un vehículo durante una ruta de reparto en el centro ciudad (Boggio-Marzet y Monzón, 2021)

En el 40% de los casos, en el centro de la ciudad, la velocidad media de un micro viaje es inferior a 10 km/h. Este aspecto debería hacernos reflexionar sobre la necesidad real de transferir las operaciones de entrega de última milla de los vehículos a medios no motorizados, especialmente en las zonas del centro de la ciudad. Además, como se muestra en la figura 3, hay algunas calles que se recorren varias veces durante la misma ruta de reparto, debido a las calles de un solo sentido típicas del centro ciudad, así como a la falta de plazas de aparcamiento. Este aspecto puede justificar en parte la bajísima velocidad de

funcionamiento propia de la muestra. De hecho, el conductor se ve obligado a pasar por la misma calle varias veces durante diferentes micro viajes de la misma ruta de reparto, debido a la conformación de la red vial de la zona.

En cuanto al tema de la eficiencia energética de los vehículos, ya se ha demostrado en la literatura que las aceleraciones y desaceleraciones fuertes provocan un aumento considerable del consumo energético del vehículo (Ericsson, 2001; ECOWILL, 2013; García-Castro et al., 2018; Wang & Boggio-Marzet, 2018). Así, queremos analizar la proximidad de las paradas que el conductor realiza durante su viaje. Aparte de aquellas paradas provocadas por el tráfico, los semáforos y los pasos de peatones, el conductor, durante las entregas de última milla, debe adaptar su conducción a una especie de intermitencia de situaciones caracterizada por frecuentes arranques y paradas y, en consecuencia, por producir altas emisiones de GEI y contaminantes. Además, las entregas son prácticamente las mismas de un día a otro. De hecho, la ruta de entrega de un conductor concreto es bastante homogénea cada día, ya que cada conductor es responsable de una “microzona” determinada dentro del área de entrega del CDU.

Las variaciones menores se deben a un único cliente final situado en una carretera cercana, en un edificio concreto o en un edificio cercano, pero en la misma "microzona" de la que es responsable cada conductor.

En este contexto, sería útil realizar un análisis profundo de la geolocalización de los puntos de entrega y determinar la ubicación óptima para instalar un conjunto de “Taquillas inteligentes”. Asimismo, el 18% de las entregas en la zona periurbana se realizaron en menos de un minuto y medio, a unas decenas de metros de distancia. Estas entregas se refieren a las realizadas a lo largo de amplias vías flanqueadas por grandes casas, una al lado de la otra, con poco tráfico, donde el mensajero puede detener el vehículo justo delante de la puerta, y entregar el paquete al conserje, para luego repetir el proceso a lo largo de toda la avenida. Este proceso produce entregas con un impacto medioambiental muy elevado. Dado que los vehículos contaminan mucho durante su arranque, en aceleración y en frenado, sería aconsejable en este contexto vial implantar otro sistema de entrega.

4.2 Ineficiencias operativas en la distribución de última milla

Para este análisis, además de considerar los datos instantáneos de los vehículos implicados, hemos tenido en cuenta las entrevistas que hemos realizado a los conductores después de cada ruta de reparto. Así pues, los principales aspectos relativos a la ineficacia operativa de distribución de mercancía en las entregas de última milla se han ahondado tanto a partir del análisis estadístico como, en su mayor parte, de las entrevistas a los conductores.

La primera ineficiencia identificada en ambas áreas de reparto es el largo tiempo de espera necesario para realizar determinadas entregas. Aunque el tiempo medio de entrega es de 5

minutos, hay algunas entregas que requieren un tiempo de espera de más de una hora. En el centro de la ciudad, la entrega se realiza en una media de 04:17 minutos, con una desviación estándar de 06:14, lo que significa que alrededor del 70% de las entregas se realizan en menos de 10 minutos. En la zona periurbana, la entrega se realiza en una media de 07:25 minutos con una desviación estándar igual a 09:41, lo que significa que alrededor del 70% de las entregas se realizan en menos de 15 minutos. Sin embargo, el tiempo máximo de entrega registrado durante la campaña de toma de datos es respectivamente de 52 minutos en el centro de la ciudad y de 96 en el entorno periurbano, independientemente del conductor. Esto se debe a que, el cliente final puede ser un polígono industrial o una gran empresa con amplias instalaciones, por lo que el mensajero debe ser identificado y pasar varios controles de seguridad antes de realizar la entrega, y luego entregar en varios edificios del polígono. Desgraciadamente, no hay un único conductor responsable de todo este tipo de entregas, y por tanto no hay una ruta fija que cubra estos puntos de entrega; así, se pierde eficiencia operativa, aumentando el porcentaje de largos tiempos de espera para todos los conductores que participan en la logística de última milla.

Otro aspecto interesante es el de las entregas que fracasan, por ejemplo porque el cliente no está en casa cuando llega el mensajero o porque la dirección del punto de entrega es errónea. Si el mensajero no encuentra al cliente en casa, debe volver una segunda vez, al final de su ruta de entrega. Si el cliente sigue ausente, el mensajero transfiere el paquete al conductor responsable de la siguiente ruta de entrega, que tendrá que cambiar su ruta a propósito. Evidentemente, esto implica una pérdida de tiempo y reduce la eficacia operativa de LMD, pero también genera un gasto de consumo de energía para el vehículo, además de que se recorren más kilómetros, lo que implica que se crea más tráfico, se emiten más contaminantes, etc. El porcentaje de entregas fallidas en el primer intento ronda el 25% en ambas zonas de reparto, y se reduce al 11% en el caso de las entregas periurbanas y al 8% en el centro de la ciudad mediante las entregas posteriores. Este fenómeno tiene un extraordinario efecto negativo en el medio ambiente de nuestras ciudades, ya sea en términos de congestión, contaminación, ruido, etc. Por ello, sería interesante crear un sistema de geolocalización instantánea, aunque, en este caso, nos enfrentaríamos sin duda a problemas de privacidad entre otros.

Por último, según los informes de los conductores al rellenar la breve encuesta después de cada ruta de reparto, hay dos preocupaciones principales en sus comentarios: la falta de espacio para aparcar y los problemas relacionados con la congestión. La falta de espacio para aparcar es una de las principales razones que provocan una mayor distancia de viaje y una baja velocidad de circulación (en busca de una parcela de aparcamiento libre), lo que aumenta el uso de energía y produce mayores emisiones y contaminantes atmosféricos. En este caso, se requiere información sobre el estacionamiento en tiempo real y debería considerarse la posibilidad de utilizar otros modos, como la moto o bici eléctrica, para sustituir al vehículo motorizado en el futuro.

Cabe destacar que la falta de espacio para aparcar representa el 29% de los problemas detectados durante el reparto en el centro de la ciudad, pero, según la opinión de los conductores, no es relevante en el caso periurbano.

El otro problema clave revelado por los conductores es la congestión de las carreteras. Alrededor del 40% de las rutas de reparto realizadas informan de situaciones de atasco, independientemente de la zona de reparto considerada. Este aspecto debería ser tenido en cuenta por los responsables políticos, ya que la naturaleza profunda de los LMD se caracteriza por su corta duración, por lo que los atascos pueden tener una influencia mucho mayor en la eficiencia operativa de las entregas de última milla comparado con las entregas de larga distancia. De acuerdo con los resultados, la distribución urbana de última milla debería realizarse durante las horas valle, de menor afluencia en carretera, adoptando la información de tráfico en tiempo real para seleccionar las rutas menos congestionadas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los últimos años, las ciudades están experimentando un considerable proceso de urbanización, y el sistema de transporte urbano de mercancías tiene que hacer frente al actual auge del comercio electrónico, que produce un fuerte aumento de la actividad y complica aún más la logística de la ciudad. A través de esta investigación, caracterizamos las pautas clave de las entregas de última milla urbanas y periurbanas. Con el fin de cambiar las tendencias actuales de las emisiones producidas por la entrega de última milla sobre las ciudades y los ciudadanos, nos propusimos estudiar en términos cuantitativos, cuáles son las ineficiencias más evidentes en términos operativos y energéticos, en diferentes áreas de entrega de la misma región de Madrid.

Tras realizar una campaña de toma de datos reales, se analizaron 242 rutas de reparto, correspondientes a 4.479 microviajes de entrega de paquetes individuales realizados durante 1.050 horas de conducción, cubriendo un total de 7.262 km de ruta: 1.965 km en el centro ciudad y 5.297 km en la zona periurbana de Madrid. Las principales conclusiones se presentan a continuación.

De nuestros resultados se desprende que existen claras ineficiencias operativas en el desempeño actual de las entregas, tanto en términos de consumo energético como de eficiencia operativa: una gran proporción de las entregas que actualmente se realizan en vehículos ligeros deberían pasar a modos de transporte no motorizados, especialmente en el centro de la ciudad. De hecho, el 40% de las entregas en el centro de la ciudad se caracterizan por una velocidad media inferior a 10 km/h, y al ser inferiores a 400 m de longitud, estas entregas podrían cubrirse fácilmente a pie o en bicicleta cargo.

Desde el punto de vista del consumo energético, sería útil realizar un análisis profundo de la geolocalización de los puntos de entrega y determinar la ubicación óptima para instalar

un conjunto de taquillas inteligentes para paquetes, ya que la mayoría de las veces los puntos de entrega a los que llegan los conductores son casi los mismos, día tras día.

Además, la proximidad de los puntos de entrega entre sí supone un gasto adicional de combustible debido a las frecuentes paradas de inicio y final de viaje que se suman a las producidas por el contexto vial, es decir, por los atascos, los semáforos o los pasos de peatones.

Desde el punto de vista operativo, nuestros resultados muestran una clara falta de homogeneidad en cuanto al tiempo necesario para la entrega. Aunque por término medio se tarda 5 minutos en hacer una entrega, se puede llegar a tardar una hora. Podría ser útil definir una ruta fija que cubra las entregas a las grandes empresas, evitando que todos los conductores tengan que experimentar los mismos tiempos de espera.

La falta de espacio para aparcar, así como las entregas fallidas y los frecuentes atascos encontrados, implican una pérdida de tiempo para el mensajero y reducen la eficacia operativa de la LMD; también generan un gasto extra de consumo energético para el vehículo, así como hace sí que se recorran más kilómetros, y, en consecuencia, se emiten más contaminantes. La distribución urbana de última milla debería realizarse durante las horas de menor afluencia y adoptando la información del tráfico en tiempo real para seleccionar las rutas menos congestionadas. A través de esta investigación, señalamos que la mayoría de las ineficiencias operativas de las entregas de última milla son similares independientemente de la zona de entrega, pero las soluciones deberían variar según el contexto geográfico.

Debido a la gran cantidad de datos analizados, esta investigación ofrece una visión más amplia a los planificadores de transporte y a los responsables políticos en cuanto a la gestión, el funcionamiento y el uso de la distribución de última milla en áreas urbanas. La misma, puede ayudar a diseñar estrategias de reducción de emisiones para que las empresas de transporte urbano de mercancías mejoren su impacto medioambiental entre otros.

Los responsables de las ciudades deberían trabajar de forma proactiva con las partes interesadas para desarrollar nuevos esquemas logísticos que minimicen los impactos negativos del transporte urbano de mercancías, cambiando las tendencias actuales de las emisiones que producen.

Las investigaciones futuras deberían ampliar el área de estudio y centrarse en medir y cuantificar el impacto de las diferentes soluciones de última milla según las circunstancias sociodemográficas.

REFERENCIAS

ALHO, A. R., E SILVA, J. D. A., DE SOUSA, J. P., y BLANCO, E. (2018). Improving mobility by optimizing the number, location and usage of loading/unloading bays for urban freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 3-18.

COMISIÓN NACIONAL DE LOS MERCADOS Y LA COMPETENCIA (2020). <http://data.cnmc.es/datagraph/> Accessed 10 February 2021

DE MELLO BANDEIRA, R. A., GOES, G. V., GONÇALVES, D. N. S., MÁRCIO DE ALMEIDA, D. A., y DE OLIVEIRA, C. M. (2019). Electric vehicles in the last mile of urban freight transportation: A sustainability assessment of postal deliveries in Rio de Janeiro-Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 491-502.

MONZON, A. y BOGGIO-MARZET, A. (2020) Eco-driving. Eficiencia energética y conducción responsable. *Papeles de Energía* 10, 93-123. Funcas Ed.

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.

GARCIA-CASTRO, A., MONZON, A., VALDES, C., y 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., y 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.

GIORDANO, A., FISCHBECK, P., y MATTHEWS, H. S. (2018). Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 216-229.

LAFKIHI, M., PAN, S., y BALLOT, E. (2019). Freight transportation service procurement: A literature review and future research opportunities in omnichannel E-commerce. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 348-365.

LOIS, D., WANG, Y., BOGGIO-MARZET, A., y MONZON, A. (2019). Multivariate analysis of fuel consumption related to eco-driving: Interaction of driving patterns and external factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 232-242.

- MACHARIS, C., y 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.
- MANGIARACINA, R., PEREGO, A., SEGHEZZI, A., y TUMINO, A. (2019). Innovative solutions to increase last-mile delivery efficiency in B2C e-commerce: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- MARCUCCI, E., LE PIRA, M., GATTA, V., INTURRI, G., IGNACCOLO, M., y PLUCHINO, A. (2017). Simulating participatory urban freight transport policy-making: Accounting for heterogeneous stakeholders' preferences and interaction effects. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 103, 69-86.
- MONZÓN, A., CASCAJO, R., PIEREN, G., ROMERO, C., y DELSO, J.: Informe del Observatorio de la Movilidad Metropolitana 2015. (2017). Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- OLSSON, J., HELLSTRÖM, D., y PÅLSSON, H. (2019). Framework of last mile logistics research: A systematic review of the literature. *Sustainability*, 11(24), 7131.
- RAGÀS PRAT, I. (2018): *Logística urbana Manual para operadores logísticos y administraciones públicas*. Marge books.
- SAVELSBERGH, M., y VAN WOENSEL, T. (2016). 50th anniversary invited article—city logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579-590.
- SCHLIWA, G., ARMITAGE, R., AZIZ, S., EVANS, J., y RHOADES, J. (2015). Sustainable city logistics—Making cargo cycles viable for urban freight transport. *Research in Transportation Business & Management*, 15, 50-57.
- SIMONI, M. D., MARCUCCI, E., GATTA, V., y CLAUDEL, C. G. (2019). Potential last-mile impacts of crowdshipping services: a simulation-based evaluation. *Transportation*, 1-22.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM, HUMAN DEVELOPMENT REPORT 2019: Beyond income, beyond averages, beyond today: inequalities in human development in the 21st century. <http://hdr.undp.org/en/2019-report> (2019). Accessed 10 February 2021.
- UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS: WORLD SOCIAL REPORT 2020 – Inequality in a rapidly changing world. <https://www.un.org/development/desa/publications/world-social-report-2020.html> (2020). Accessed 10 February 2021.
- WANG, Y., y BOGGIO-MARZET, A. (2018). Evaluation of eco-driving training for fuel efficiency and emissions reduction according to road type. *Sustainability*, 10(11), 3891.