

**Alternativas sostenibles para la logística urbana en la era del  
comercio electrónico: sistema M4G (*Metro for Goods*)**

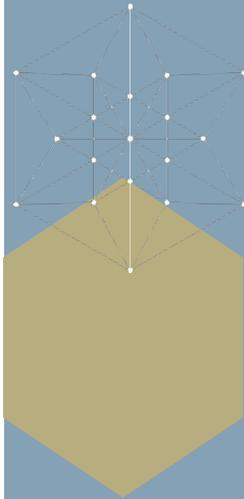
**TESIS DOCTORAL**

**RAFAEL VILLA MARTÍNEZ**

Licenciado en Ciencias Económicas

Licenciado en Investigación y Técnicas de Mercado

Madrid, 2021





# Resumen

Las ciudades están en el centro de la vida humana y están viviendo un intenso proceso de transformación en distintos ámbitos (urbanización, medioambiente, movilidad, economía, digitalización) que, de forma conjunta, tratan de innovar para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Dentro de las ciudades, la distribución urbana de mercancías aparece como uno de los grandes retos para el sector del transporte y la logística, afectando directamente a este proceso de transformación de la ciudad.

La aparición de la covid-19 ha tenido especial relevancia e impacto en la movilidad de la ciudad y en el comercio electrónico. El B2C, o negocio de empresa a consumidor, ha crecido notablemente en los últimos años y se ha acelerado a raíz de la pandemia, aumentando el acceso de la población a Internet y produciendo cambios en los hábitos de comportamiento de los consumidores. En las áreas metropolitanas, el “efecto Amazon” (amplia selección de minoristas *online*, envío rápido, devoluciones gratuitas y precios bajos) ha llevado a un mayor uso de vehículos ligeros en el reparto del comercio electrónico en las ciudades. Este hecho está afectando el funcionamiento racional del sistema de transporte urbano de mercancías, incluyendo un alto grado de fragmentación, baja optimización de carga y, entre otras externalidades, mayor congestión del tráfico.

Esta tesis investiga el potencial uso de la red de metro, en una gran ciudad como Madrid, para proporcionar servicios de entrega de paquetes de *e-commerce* aprovechando su actual capacidad de transporte disponible y utilizando las estaciones para la entrega de los paquetes. Se definen las características de un nuevo modelo de distribución mixto (M4G: *Metro for Goods*) para entregas de última milla asociadas al comercio electrónico a través de trenes compartidos con viajeros o trenes exclusivos de carga de paquetes.

La investigación cuantifica la demanda de paquetes para las tres alternativas de entrega al cliente *e-commerce*: taquillas inteligentes, centros de recogida o domicilio del cliente. Los resultados muestran que el coste total por paquete de los escenarios propuestos del modelo M4G es menor que el coste actual de reparto a través de furgonetas, siendo significativamente menores las externalidades sociales y los costes medioambientales derivados del nuevo modelo. Con relación a

los costes operativos, se demuestra que la utilización del modelo M4G podría ser una alternativa eficiente en las entregas que se puedan realizar dentro de la estación.

Esta tesis doctoral contribuye al estado del arte e identifica una alternativa viable que permita emplear sinergias entre el transporte público de personas y la distribución urbana de mercancías. La tesis muestra las diferentes medidas e iniciativas que se están proponiendo para la mejora de la logística urbana y como el modelo M4G puede ser una opción a considerar por los grupos de interés públicos y privados.

# Abstract

Cities are at the heart of human life and they are currently undergoing an intense transformation process on several levels (urbanisation, environmental, mobility, economic, digitalisation). Thus, in general, they seek to improve the quality of life for their inhabitants through innovation. The distribution of goods within cities has emerged as one of the key challenges for the transport and logistics sector, with a direct effect on the urban transformation process.

The emergence of Covid-19 has been particularly relevant and impacted both urban mobility and electronic commerce. B2C transactions have grown notably in recent years and accelerated further due to the pandemic, increasing Internet usage and driving changes in consumer habits and behaviours. In metropolitan areas, the “Amazon effect” (broad selection of online retailers, fast delivery, free returns and low prices) has led to greater use of light vehicles for e-commerce deliveries. This, in turn, has affected the rational operation of the urban goods transport system, leading to a high fragmentation, low load optimization and, among other externalities, greater traffic congestion.

This thesis investigates the potential use of the underground rail network in a large city like Madrid to provide e-commerce courier services, capitalising on its current available transport capacity and delivering parcels at stations. The work defines the characteristics of a new mixed distribution model (M4G: Metro for Goods) for last-mile deliveries associated to e-commerce through trains shared with commuters or exclusively dedicated to goods transportation.

The study quantifies the demand for parcels of three alternatives for e-commerce deliveries: smart lockers, collection centres and home deliveries. The results show that the total cost per parcel of the scenarios proposed by the M4G model is lower than the current cost of delivery using vans, along with significantly lower social externalities and environmental costs. With regard to operational costs, the research shows that using the M4G model could be an efficient alternative for deliveries within stations.

This doctoral thesis contributes to the body of the knowledge and identifies a viable alternative that promotes synergies between public transport and urban goods distribution. The thesis presents various measures and initiatives being proposed to improve urban logistics and how the M4G model could be an option to consider by both public and private stakeholders.



# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1. Motivación de la investigación	1
2. Estructura del documento	3
<b>PARTE I. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1. DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS Y LOGÍSTICA DE LA CIUDAD</b>	<b>7</b>
1.1. Definición y concepto de logística de la ciudad	7
1.2. Movimientos urbanos de mercancías	11
1.3. Marco logístico actual y tendencias en la logística urbana	14
1.4. Externalidades de la logística urbana y sostenibilidad. Propuestas e iniciativas	20
1.4.1. Externalidades de la logística urbana	20
1.4.2. Propuestas e iniciativas sostenibles en logística urbana	26
1.5. Grupos de interés en la logística urbana	30
1.6. Ineficiencias en la logística urbana	35
1.6.1. Ineficiencias relacionadas con la oferta-demanda	35
1.6.2. Ineficiencias en el contexto de la oferta	37
1.6.3. Ineficiencias en el contexto de la demanda	38
1.7. Evolución del comercio minorista e implicaciones en la logística de la ciudad	39
<b>CAPÍTULO 2. COMERCIO ELECTRÓNICO Y LOGÍSTICA URBANA</b>	<b>45</b>
2.1. Definición, características y cifras	45
2.2. La entrega en el <i>e-commerce</i> (i): elemento clave de éxito	50
2.2.1. Lugar de entrega de los productos en el comercio electrónico	51
2.2.2. Elementos que intervienen en el proceso de entrega en el comercio electrónico	52
2.2.3. Rol crítico de la entrega en el comercio electrónico: factores de éxito	54

2.3. La entrega en el <i>e-commerce</i> (ii): actores, opciones y alternativas preferidas	61
2.3.1. Actores en los servicios de entrega de paquetes en el <i>e-commerce</i>	61
2.3.2. Opciones de entrega actuales	63
2.3.2.1. Entrega a domicilio	63
2.3.2.2. Recogida de entregas de <i>e-commerce</i>	66
2.3.3. Alternativas de entrega preferidas	73
2.4. Factores del <i>e-commerce</i> que afectan el desempeño de la logística urbana	75
<b>CAPÍTULO 3. MEDIDAS Y SOLUCIONES PARA LA MEJORA DE LA LOGÍSTICA URBANA</b>	<b>79</b>
3.1. Medidas de intervención pública	80
3.1.1. Medidas reguladoras	82
3.1.1.1. Restricciones de acceso temporales	82
3.1.1.2. Regulaciones de estacionamiento	83
3.1.1.3. Restricciones ambientales	84
3.1.1.4. Restricciones de acceso por tamaño o carga	86
3.1.2. Medidas basadas en el mercado	87
3.1.2.1. Precios (peajes, tarifas de congestión y tarifas de estacionamiento)	87
3.1.2.2. Impuestos, desgravaciones fiscales e incentivos	88
3.1.2.3. Permisos negociables y créditos de movilidad	89
3.1.2.4. Medidas relacionadas con las infraestructuras y con la planificación del suelo	90
3.2. Iniciativas de actores que participan en la DUM	91
3.2.1. Medidas de innovación tecnológica	91
3.2.1.1. Innovación en los vehículos	91
3.2.1.2. Puntos de entrega	98
3.2.1.3. Algoritmos avanzados y optimización	100
3.2.1.4. Colaboración en la logística urbana	104
3.2.2. Infraestructuras y sistemas logísticos urbanos	107
3.2.2.1. Infraestructuras o instalaciones logísticas urbanas	107
3.2.2.2. Sistemas logísticos urbanos o estructura de la cadena de suministro	116
<b>CAPÍTULO 4. LOGÍSTICA URBANA FERROVIARIA</b>	<b>117</b>
<b>PARTE II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>127</b>
<b>CAPÍTULO 5. RESEARCH GAP. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>129</b>
5.1. Objetivos de la investigación	131
5.2. Hipótesis de trabajo	132
<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>133</b>
6.1. Propuesta metodológica	134
6.2. Definición del modelo de reparto en la última milla: modelo M4G	135
6.2.1. Diseño de un sistema de distribución física basado en una red de transporte de metro: M4G	136
6.3. Cuantificación de la demanda de paquetes de <i>e-commerce</i>	143
6.4. Análisis de costes	145
6.4.1. Costes del modelo	146
6.5. Factores que afectan a la evaluación del modelo	147
6.5.1. Factores económicos	147
6.5.2. Factores para la mejora de la eficiencia	149

---

<b>PARTE III. CASO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO</b>	<b>155</b>
<b>CAPÍTULO 7. CASO DE ESTUDIO</b>	<b>157</b>
7.1. Antecedentes	157
7.2. Problemas y retos de la distribución urbana en la ciudad de Madrid	161
7.3. Metro de Madrid	162
7.4. Descripción del modelo M4G en la ciudad de Madrid	166
7.5. Cuantificación de la demanda del modelo M4G	171
7.6. Factores técnico-operativos de trenes y estaciones y factores logísticos para el modelo M4G en la ciudad de Madrid	172
<b>CAPÍTULO 8. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO</b>	<b>177</b>
8.1. Diferentes alternativas de aplicación del modelo M4G	177
8.2. Cálculo de la demanda de paquetes para las alternativas del modelo	178
8.3. Datos de la modelización	183
8.4. Cálculo de los principales indicadores para las alternativas del modelo	185
8.4.1. Principales indicadores de las diferentes alternativas del modelo M4G	185
8.4.2. Cálculo de los costes externos, costes económicos y coste total por paquetes	185
<b>CAPÍTULO 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>189</b>
<b>PARTE IV. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>203</b>
<b>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES</b>	<b>205</b>
10.1.Revisión de cumplimientos de objetivos	205
<b>CAPÍTULO 11. LIMITACIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>213</b>
11.1.Limitaciones	213
11.2.Recomendaciones y futuras líneas de investigación	214
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>217</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>243</b>
<b>ANEXO I. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL</b>	<b>245</b>
<b>ANEXO II. DATOS PARA LA MODELIZACIÓN M4G Y MAGNITUDES OPERATIVAS PARA EL REPARTO DE PAQUETES EN EL ESCENARIO DE REFERENCIA</b>	<b>287</b>
<b>ANEXO III. DESGLOSE COSTES ECONÓMICOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL MODELO M4G</b>	<b>291</b>



## Índice de tablas

Tabla 1.	Diferencias logísticas entre comercio tradicional y comercio <i>online</i>	41
Tabla 2.	10 principales categorías de productos de <i>e-commerce</i> con las tasas de crecimiento más altas	49
Tabla 3.	Encuesta de consumidores sobre los aspectos relevantes que inciden en el proceso de entrega en el <i>e-commerce</i>	59
Tabla 4.	Actores que participan en el proceso de entrega de paquetes en el <i>e-commerce</i>	62
Tabla 5.	Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes. Diversos autores	71
Tabla 6.	Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes	72
Tabla 7.	Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes	99
Tabla 8.	Características de los tipos de logística colaborativa	107
Tabla 9.	UCC implantadas en 17 países durante el periodo 1970-2010	109
Tabla 10.	Ventajas e inconvenientes de la implantación de UCC en las ciudades	111
Tabla 11.	Resumen de aplicaciones y ámbito de los sistemas ULS	120
Tabla 12.	Clasificación de modos de entrega de pedidos de <i>e-commerce</i>	142
Tabla 13.	Métodos de análisis de costes	145
Tabla 14.	Costes operativos de explotación o costes de capital asociados al modelo M4G	147
Tabla 15.	Costes operativos de explotación o costes de capital asociados al modelo M4G	148
Tabla 16.	Factores operativos del modelo M4G	151
Tabla 17.	Alternativas y características del modelo M4G	177
Tabla 18.	Escenario de referencia para la alternativa 1	178
Tabla 19.	Alternativas, variantes y escenario de referencia	178
Tabla 20.	Alternativa 1: demanda diaria de paquetes de <i>e-commerce</i> , contenedores rodantes y estaciones utilizadas	179
Tabla 21.	Alternativa 2: demanda diaria de paquetes de <i>e-commerce</i> , contenedores rodantes y estaciones con centro de recogida	180
Tabla 22.	Alternativa 3: demanda diaria de paquetes de <i>e-commerce</i> , contenedores rodantes y estaciones con centro de recogida	181
Tabla 23.	Alternativa 3: demanda diaria de paquetes de <i>e-commerce</i> , contenedores rodantes, barrios implicados y estaciones que actúan como microhub	182
Tabla 24.	Demanda diaria de paquetes, contenedores y estaciones utilizadas en las alternativas del modelo M4G	183

Tabla 25. Principales indicadores de las alternativas del modelo M4G	185
Tabla 26. Costes externos de las alternativas del modelo M4G	186
Tabla 27. Costes económicos del modelo M4G (escenario de referencia)	187
Tabla 28. Costes económicos del modelo M4G (alternativas)	187
Tabla 29. Total coste por paquete de las alternativas en el modelo M4G	188

# Índice de figuras

Figura 1. Logística urbana, distribución urbana y entrega en la última milla	10
Figura 2. Niveles dentro de la logística de la ciudad	11
Figura 3. Clasificación de los movimientos de bienes urbanos	12
Figura 4. Alternativa más eficiente de transporte de mercancías en función de la distancia recorrida	14
Figura 5. Principales ventajas e inconvenientes de la logística de la ciudad	15
Figura 6. Evolución de la inversión en logística en España (millones de euros)	17
Figura 7. Modelo de ciudad inteligente	20
Figura 8. Emisión de gases de efecto invernadero EU-28	21
Figura 9. Costes externos del transporte	22
Figura 10. 10 claves del Acuerdo de París	28
Figura 11. Grupos de interés en la logística urbana: ámbito, actores y objetivos	34
Figura 12. <i>Stakeholders</i> , intereses e interacciones dentro de la logística urbana	35
Figura 13. Evolución de la logística del comercio minorista	40
Figura 14. La evolución del comercio rápido	42
Figura 15. <i>E-commerce</i> y entrega	43
Figura 16. Población, uso de Internet y <i>e-commerce</i>	46
Figura 17. Venta de comercio minorista en el mundo 2014-2024	47
Figura 18. Transacciones de <i>e-commerce</i> en 2019-2020 (Q1=primer trimestre y Q2= segundo trimestre)	48
Figura 19. Modelo service-profit-chain	51
Figura 20. Modelos de entrega de <i>e-commerce</i> en la última milla	52
Figura 21. Factores que influyen en el proceso de última milla	53
Figura 22. Opciones de entrega en <i>e-commerce</i> y fidelidad del consumidor	56
Figura 23. Cuota de mercado de paquetería en España	62
Figura 24. Cuota de mercado de paquetería en España	68
Figura 25. Flujo de paquetes de <i>e-commerce</i> y recogida en taquilla	70
Figura 26. Alternativas de entrega utilizadas	74
Figura 27. Factores relacionados con el <i>e-commerce</i> que afectan a la logística urbana y externalidades producidas	77

Figura 28. Ciudades que componen C40 Cities	81
Figura 29. Componentes de la logística urbana que influyen en la calidad de vida en las ciudades	82
Figura 30. Zonas de bajas emisiones (LEZ) en Europa	85
Figura 31. Calle de Nueva York utilizada para carga de paquetes (2019)	90
Figura 32. Centro de consolidación de Legazpi, Madrid (2015)	91
Figura 33. Tipos de vehículos utilizados en la distribución urbana	93
Figura 34. Furgonetas autónomas de Neolix y Nuro	97
Figura 35. Características y grado de madurez de diferentes tecnologías en la última milla	97
Figura 36. Taquilla inteligente instalada en Metro de Madrid.	99
Figura 37. CVRP con tres transportistas y tres rutas distintas	102
Figura 38. Modelo de consolidación UCC con un solo operador	113
Figura 39. Modelo de consolidación UCC con múltiples operadores	114
Figura 40. Características y resultados de diferentes iniciativas de <i>microhubs</i>	115
Figura 41. Decálogo de implementaciones de <i>microhubs</i> en Madrid	116
Figura 42. Cápsulas e infraestructura para el transporte de mercancías bajo tierra	118
Figura 43. Etapas esenciales de una investigación	131
Figura 44. Pasos de la investigación	134
Figura 45. Marco metodológico	135
Figura 46. Modelo actual de reparto de <i>e-commerce</i>	136
Figura 47. Modelo M4G	138
Figura 48. Ejemplo de <i>roll container</i>	139
Figura 49. Ejemplo de trenes compartiendo viajeros y paquetes	140
Figura 50. Ejemplo de trenes dedicados para el transporte de paquetes	141
Figura 51. Peso de los paquetes de <i>e-commerce</i> (comercio mundial)	153
Figura 52. Evolución de la población de la ciudad de Madrid	158
Figura 53. Distritos de la ciudad de Madrid	158
Figura 54. Imagen cenital de la ciudad de Madrid	159
Figura 55. Contribución de la DUM al tráfico en la ciudad de Madrid	160
Figura 56. Principales infraestructuras relacionadas con la distribución urbana en Madrid	161
Figura 57. Líneas y estaciones en Metro de Madrid	163
Figura 58. Principales cifras relacionadas con Metro de Madrid	164
Figura 59. Tren de la serie 7000 de Metro de Madrid	165
Figura 60. Mapa de Metro de Madrid incluyendo los depósitos de mantenimiento	166
Figura 61. Pasos del modelo M4G aplicado a Metro de Madrid	167
Figura 62. Contenedor rodante cargado con paquetes	168
Figura 63. Coche serie 3000 de Metro de Madrid cargado con contenedores rodantes	169
Figura 64. Alternativas de entrega para el modelo M4G	170
Figura 65. Cálculo de la demanda de paquetes de <i>e-commerce</i> de viajeros de Metro	171
Figura 66. Estaciones de Metro dentro del barrio de Goya	172

---

Figura 67. Series de trenes en Metro de Madrid en 2021	172
Figura 68. Diagrama de dos coches: serie (izquierda) e imagen interior (derecha)	173
Figura 69. Disposición de estanterías para almacenamiento de paquetes en un <i>microhub</i>	174
Figura 70. Bicicleta de reparto ( <i>cargo bike</i> )	175
Figura 71. L6 depósito, estaciones y paquetes de <i>e-commerce</i> por estación	180
Figura 72. Vista aérea del barrio de Peñagrande	183
Figura 73. Costes económicos (operativos) de las alternativas del modelo M4G	190
Figura 74. Costes externos (sociales + medioambientales) de las alternativas del modelo M4G	191
Figura 75. Costes externos (por tipo de externalidad) de las alternativas del modelo M4G	192
Figura 76. Costes operativos (€/paquete) del escenario de referencia en función de la productividad de entrega	193
Figura 77. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función de la productividad de entrega	194
Figura 78. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función del coste/hora de los trabajadores del operador logístico	194
Figura 79. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función de la tarifa que ingresa Metro por paquete transportado	195
Figura 80. Evolución de la demanda de viajeros de Metro y del número de residentes en la ciudad de Madrid	197
Figura 81. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para taquillas inteligentes y trenes específicos	198
Figura 82. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para taquillas inteligentes y trenes compartidos	199
Figura 83. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos	200
Figura 84. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos	200
Figura 85. Número de paquetes de <i>e-commerce</i> y % de estaciones con máxima capacidad de paquetes en taquillas	202
Figura 86. Costes sociales, medioambientales y económicos por paquete entregado de <i>e-commerce</i> y alternativa	210



# Introducción

---

## 1. Motivación de la investigación

La población urbana está en continuo crecimiento, el 55 % de las personas del mundo ya vive en ciudades y el porcentaje de urbanización crecerá hasta el 68 % en el año 2050 (Naciones Unidas, 2018), lo que trae consigo un aumento de la demanda de bienes y servicios concentrados principalmente en áreas urbanas, que a su vez presentan cada vez más restricciones de acceso. Este hecho, inevitablemente, está llevando a las ciudades de todo el mundo a enfrentarse a mayores desafíos en términos de transporte eficiente de personas y mercancías, al tiempo que tratan de minimizar sus impactos negativos en la calidad de vida de sus ciudadanos.

Este aumento de bienes y servicios tiene su máximo exponente en el comercio electrónico, donde el incremento de las compras *online* se espera que, en 2024, sea 5 veces superior al que se realizaba en 2014. El efecto pandemia ha obligado a muchos consumidores a buscar opciones de compra en los canales *online*, modificando sus hábitos de compra no solo durante el periodo de la covid-19, sino en el periodo pospandemia. En España, los sectores como los supermercados o la compra de electrodomésticos, en 2020, casi doblaron su facturación *online* respecto al tercer trimestre de 2019 (CNMC, 2020).

Más personas viviendo en las ciudades y más personas realizando transacciones *online* se traduce en mayor número de demanda de entregas en la ciudad, sobre todo tras la aparición del *q-commerce* (Delivery Hero, 2020) o comercio rápido, que aparece como un nuevo modelo dentro del comercio electrónico donde prima la velocidad, la conveniencia y la atención al cliente. La entrega de última milla representa el 53 % del coste total de envío y el 41 % de los costes totales de la cadena de suministro (World Economic Forum, 2020). Este mayor número de entregas ha hecho que todos los agentes implicados en el reparto urbano teman un colapso en la última milla y se planteen medidas que permitan aumentar su capacidad de entrega y, a su vez, reducir el impacto medioambiental que tiene su actividad en las grandes ciudades. Si no se producen intervenciones de los grupos de interés, se espera un aumento del 32 % en las emisiones de carbono del tráfico de reparto urbano para 2030 (World Economic Forum, 2020).

Las medidas propuestas tienen dos vertientes diferenciadas. Por parte de las autoridades públicas, tratan de minimizar los impactos derivados de la logística urbana para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos y restringir el uso de los vehículos en las ciudades (Civitas, 2015). Por parte de los actores que intervienen en la distribución urbana (Macharis y Kin, 2017), se plantean iniciativas que aumenten su productividad de entrega y minimicen sus costes, teniendo cada vez más presentes los impactos medioambientales.

Dentro de las soluciones en logística urbana que «desplazan» al coche de la ciudad, los grupos de interés públicos tratan de restringir el acceso de vehículos con medidas reguladoras (restricciones de acceso a zonas sensibles, regulación de estacionamiento, etc.), medidas basadas en el mercado (peajes, impuestos, tarifas de estacionamiento, etc.) o medidas relacionadas con las infraestructuras (zonas de carga/descarga, área de entregas cercanas). Por parte de los grupos de interés que son responsables y actúan en la logística de la ciudad, las medidas innovadoras dirigen la mirada al cielo, y tratan de sustituir los vehículos comerciales por vehículos aéreos no tripulados (drones) que permitan, a su vez, hacer entregas sin utilizar las calles de la ciudad. Estas soluciones presentan, en la actualidad, numerosas barreras que es necesario solventar para que el reparto urbano con drones pueda ser una realidad en muchas urbes.

Una solución innovadora que puede satisfacer tanto el requerimiento de restringir el coche que marcan las autoridades públicas, como el requerimiento de poder aumentar la eficiencia y la productividad de entrega que marcan los operadores logísticos, puede estar debajo de nuestros pies, utilizando la capacidad y las infraestructuras de un sistema de transporte urbano como el metro para el transporte de mercancías. Esta solución permite reducir las furgonetas y camiones de reparto de las carreteras, sustituyéndolos por un modo de transporte más eficiente y sostenible, que además dispone de una red capilar que permite las entregas en cualquier lugar de una gran ciudad con unos horarios fiables.

La motivación de la presente tesis doctoral surge de la necesidad de explorar una nueva alternativa sostenible para la logística urbana en la era del comercio electrónico. Se persigue desarrollar una metodología que permita estimar la demanda de paquetes de *e-commerce* en función de los viajeros de metro y de los residentes cercanos a las estaciones. Asimismo, con esta demanda se pretende conocer la viabilidad técnica y económica de la utilización del metro como modelo de reparto en la última milla. Finalmente, la tesis sirve como herramienta para evaluar los costes económicos, medioambientales y sociales que se generan en cada modelo, comparando el coste por paquete entregado a través de furgonetas (modelo de referencia) y el coste por paquete entregado a través de un sistema como metro.

---

## 2. Estructura del documento

La presente investigación se estructura en 4 partes y 11 capítulos, que se identifican con las fases identificadas en la metodología propuesta (Parte II. Metodología de la investigación).

La primera parte presenta la motivación y antecedentes que dan lugar a la realización de esta investigación. Se realiza un análisis en profundidad del estado del arte de la literatura relativa a esta tesis doctoral. En el capítulo 1, se aborda la distribución urbana de mercancías, el concepto de logística de la ciudad, detallando los tipos de movimientos urbanos que se dan en la ciudad y las externalidades que se derivan de la logística urbana. También se analizan los grupos de interés y las ineficiencias que se generan para cada uno de ellos. En el capítulo 2 se analiza el comercio electrónico y su relación con la logística urbana, poniendo especial énfasis en la entrega como elemento clave de éxito en el *e-commerce*. A continuación, en el capítulo 3, se detallan las medidas e iniciativas que pueden mejorar las ineficiencias y externalidades generadas por la logística de la ciudad. Por último, en el capítulo 4, se pone el foco en una de estas medidas, la logística urbana ferroviaria como solución complementaria a la distribución urbana.

La segunda parte presenta la metodología de investigación. En el capítulo 5 se plantea el problema, se define el *research gap* y se concreta la hipótesis de trabajo. Seguidamente, en el capítulo 6, se describe el proceso de diseño y métodos de obtención de datos y la definición del modelo de reparto en la última milla. Se determina cómo se ha calculado la demanda de paquetes de *e-commerce* y los costes asociados a las entregas de estos volúmenes de demanda.

En la tercera parte de la tesis, el capítulo 7 define el caso de estudio y se concreta el modelo de distribución de mercancía a través de Metro para la ciudad de Madrid. A continuación, el capítulo 8 aplica la metodología al caso de estudio y cuantifica la demanda de paquetes de *e-commerce* para los distintos modos de entrega, además de enunciar los factores técnicos y operativos que hacen posible la puesta en marcha del modelo. Se muestran los principales indicadores para las alternativas del modelo, y en el capítulo 9 se analizan los resultados.

La cuarta parte muestra las conclusiones de la investigación y se presenta la revisión del grado de cumplimiento de los objetivos y preguntas de la investigación (capítulo 10). Finalmente, el capítulo 11 detalla las principales limitaciones encontradas en el estudio de un nuevo modelo de reparto de paquetes a través de la red de metro. Por último, se muestran las recomendaciones y líneas futuras de investigación.



# **PARTE I. ESTADO DEL ARTE**

---



# Capítulo 1. Distribución urbana de mercancías y logística de la ciudad

---

## 1.1. Definición y concepto de logística de la ciudad

Las ciudades actuales están diseñadas para los coches. Durante el siglo XX fue sinónimo de modernidad y el vehículo privado tomó protagonismo en las ciudades existentes, suponiendo un profundo impacto y desplazando al ciudadano del centro de las calles. Las infraestructuras al servicio del coche (vías, autovías, enlaces y grandes aparcamientos) ocupan la parte mayoritaria de la ciudad, mientras que las actividades específicamente urbanas, residenciales, industriales, comerciales, de oficinas, apenas alcanzan el 30 % del suelo urbanizado (Brau, 2018).

Estas ciudades se sitúan en el centro de toda actividad económica, sirviendo como escenario para que personas, empresas y organismos intercambien bienes, servicios y recursos. El movimiento de bienes urbanos es fundamental para la vitalidad económica (Allen *et al.*, 2000; Muñuzuri *et al.*, 2005) y clave para las actividades industriales, comerciales y de ocio que a su vez son vitales en la generación de riqueza. La mayoría de estas transacciones requieren el transporte de bienes o personas, por lo que un gran número de diferentes flujos de transporte recorren las áreas urbanas, incluyendo bienes de consumo, materiales de construcción, materias primas, productos de desecho, etc. En comparación con el tráfico urbano total, la distribución de bienes urbanos es responsable de aproximadamente el 15 % del tráfico rodado en una ciudad típica (Dablanc, 2011). Además, involucra otras actividades que requieren un mayor uso del espacio en las ciudades: carga-descarga, almacenaje, etc. Dentro de la logística urbana, diferentes estudios en ciudades francesas han determinado que el 46 % del movimiento urbano total de mercancías está relacionado con el comercio B2C (Cattaruzza *et al.*, 2017).

La globalización y el comercio *online* han supuesto un crecimiento exponencial en el transporte, permitiendo el desarrollo de un mercado abierto donde los productos se pueden comprar en cualquier lugar, con un solo clic, las mercancías viajan alrededor del mundo, y la mayoría de los bienes son entregados en las grandes ciudades. Este hecho se ha agravado tras la crisis de la

covid-19, donde los consumidores se han enfrentado a nuevas formas de compra y nuevos hábitos de consumo, lo que ha provocado un incremento tanto de usuarios como de frecuencia en la compra de bienes físicos *online*.

Dentro de estas ciudades, ciertas actividades humanas generan costes externos, y el sector del transporte es una de las principales causas de estos. La definición de la Unión Europea (UE) de un coste externo, la llamada externalidad, es un coste que surge «cuando las actividades sociales o económicas de un grupo de personas tienen un impacto en otro grupo y cuando ese impacto no es totalmente explicado o compensado por el primer grupo» (European Commission, 2020). Aquí estarían incluidos algunos costes sociales vinculados al transporte como el ruido ambiental, la siniestralidad, la emisión de gases de efecto invernadero, el cambio climático o el congestionamiento del tráfico en las ciudades.

Un punto de partida es identificar las palabras clave que en la literatura se han utilizado sobre el término de logística de la ciudad. Conceptos como logística urbana, logística de la ciudad, distribución urbana de mercancías, transporte urbano o logística de la última milla aparecen cuando se hace referencia al último eslabón de la cadena de suministro dentro de las ciudades. Este concepto ha sido debatido ampliamente en la literatura y no hay consenso sobre el alcance de su definición. Tanaguchi y Thomson (2002), creadores de esta idea, identifican la logística urbana (*urban logistics*) «con el proceso para optimizar de forma integral las actividades de logística y transporte de las empresas en áreas urbanas, teniendo en cuenta el entorno del tráfico, la gestión del tráfico y el consumo de energía en el marco de una economía de mercado».

Este concepto se ha ido matizando teniendo en cuenta diferentes perspectivas (Ambrosini *et al.*, 2004; Muñuzuri *et al.*, 2005; Dablanc, 2008; Lindholm y Behrends, 2012), pero todas ellas abordan, de forma común, tres aspectos importantes: el aspecto del transporte, el aspecto geográfico y el aspecto de la mercancía.

En cuanto al *aspecto del transporte*, la mayoría de ellos se refieren al «movimiento» o «transporte» (Ambrosini *et al.*, 2004; Dablanc, 2008; Lindholm y Behrends, 2012). Para Allen *et al.* (2000), el transporte de distribución urbana solo puede realizarse con vehículos motorizados (vehículos de mercancías y otros). Dablanc (2008) menciona específicamente que también las furgonetas pueden llevar a cabo el transporte urbano de mercancías, pero solo cuando lo hacen profesionales. La UE (European Commission, 2012) lo define como el movimiento de vehículos de carga cuyo objetivo principal es transportar mercancías dentro y fuera de áreas urbanas. En esta definición más amplia se recogen los repartos en bicicletas de carga o en patinetes eléctricos que se están produciendo actualmente en las grandes ciudades.

En el *ámbito geográfico*, la mayoría de las definiciones ubican el movimiento o el transporte en el «área urbana» sin definir qué es un área urbana (por ejemplo, Ogden, 1992; Allen *et al.*, 2000; Lindholm y Behrends, 2012). Algunas definiciones son más específicas y mencionan tanto la ciudad como el área suburbana (OECD, 2003), o se refieren a las condiciones morfológicas y de tráfico asociadas con un contexto urbano (Muñuzuri *et al.*, 2005). Todas las definiciones establecen que el transporte de carga se puede llamar urbano cuando la carga se mueve hacia, desde

o dentro del área urbana. Algunos de ellos también consideran el tráfico de carga «cruzar el territorio urbano sin entregar mercancías» como tráfico urbano de mercancías (Ogden, 1992; Ambrosini y Routhier, 2004; Dablanc, 2008; Lindholm y Behrends, 2012). La UE (Dijkstra y Poelman, 2014) desarrolla la siguiente clasificación de áreas urbanas que considera tanto la población como la densidad urbana de las áreas habitadas:

- **Metrópolis:** las áreas urbanas más grandes de Europa con más de 3 millones de habitantes, que probablemente experimenten problemas de congestión vial y de calidad del aire muy importantes.
- **Otras zonas urbanas grandes:** áreas urbanas con más de 500 000 habitantes (excluyendo las metrópolis) que también es probable que experimenten problemas de congestión vial y de calidad del aire.
- **Áreas urbanas de patrimonio más pequeño:** áreas urbanas más pequeñas que son entornos «sensibles» debido a la importancia de la ciudad, o la ciudad en términos culturales o de patrimonio.
- **Otras áreas urbanas más pequeñas:** todas las demás áreas urbanas, probablemente con problemas de congestión vial y calidad del aire menos significativos.

Es, en el aspecto de la *mercancía transportada*, donde más diferencias de criterio se contemplan en el caso de la distribución urbana. La discrepancia básica se refiere a las personas que realizan el transporte de bienes (Ogden, 1992). Ambrosini y Routhier (2004) consideran los viajes que se realizan para la compra en los hogares como transporte de carga urbano, mientras que Dablanc (2008) los excluye explícitamente porque el transporte no es realizado por profesionales. Sí se considera, sin embargo, el transporte de otros artículos que no se pueden consumir, por ejemplo, recogida de basuras (limpias o no), mantenimiento de vías urbanas, recogida de dinero y entregas (Allen *et al.*, 2000; OECD, 2003; Ambrosini y Routhier, 2004; Dablanc, 2008).

Allen *et al.* (2000) lo formulan de forma más genérica. Para estos autores, tanto la recogida y entrega de productos básicos como las transferencias de bienes entre los locales urbanos y las entregas de bienes auxiliares también forman parte del tráfico urbano de mercancías.

Además de los términos «transporte urbano de mercancías», «distribución urbana» y «transporte de mercancías de la ciudad», también se utiliza la expresión «logística de la ciudad», donde hay algunas diferencias importantes. Primero, la «logística de la ciudad» no solo se relaciona con las actividades de transporte de las empresas en áreas urbanas sino también con su logística (Taniguchi y Thompson, 2002). En segundo lugar, se incluye el aspecto de mejora, soluciones innovadoras y ganancias de eficiencia, tanto económicas como ambientales (Yanqiang, 2014).

Dentro de esta memoria de tesis, se consideran tres conceptos relacionados que en ocasiones se utilizan para expresar la idea de movimientos urbanos de mercancías en la ciudad (logística urbana, distribución urbana de mercancías y entrega en la última milla), con las siguientes consideraciones y distinciones (Cardenas *et al.*, 2017).

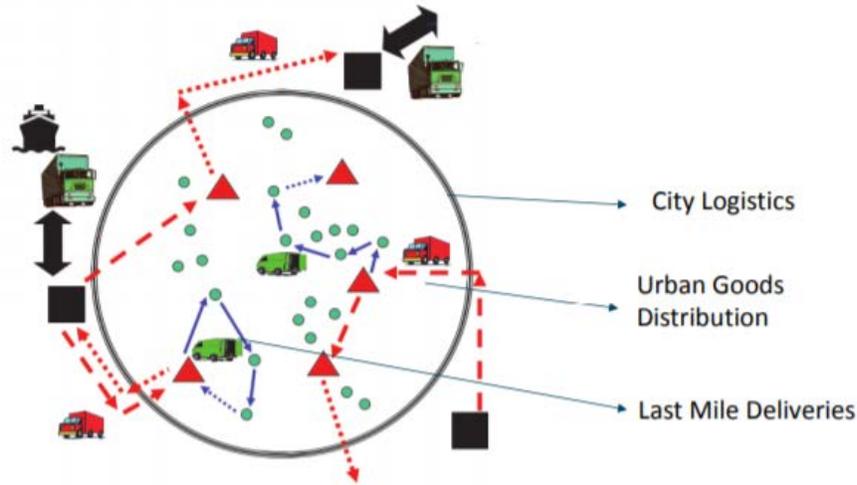


Figura 1. Logística urbana, distribución urbana y entrega en la última milla  
Fuente: Cardenas *et al.* (2017), basado en Crainic *et al.* (2012)

- La logística urbana (*city logistics*) o logística de la ciudad se centra en las interacciones e interrelaciones de los grupos de interés a nivel macro. Esta área difiere de las demás porque el objetivo es mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y de los grupos de interés afectados. Comúnmente, las metodologías incluyen análisis de múltiples actores, evaluación de procesos de toma de decisiones, análisis de percepción de los ciudadanos, evaluación del impacto socioeconómico en la ciudad, etc. Las ideas de este dominio están principalmente centradas en políticas a largo plazo como la reducción de emisiones, congestión, habitabilidad, etc.
- La distribución urbana de mercancías (*urban goods distribution*) se enfoca en el transporte de bienes y productos desde el momento en que la carga se incorpora al área urbana a un nivel medio. Los desafíos clave se centran en los sistemas de transporte, la infraestructura logística, las decisiones de ubicación, los esquemas de consolidación, el almacenamiento, la interacción entre los vehículos de carga y los vehículos de pasajeros y la infraestructura, las externalidades y el desempeño de las políticas de transporte de carga. Los ejemplos incluyen modos de transporte, ubicaciones de las instalaciones y desempeño económico, social y ambiental. Es común encontrar análisis cuantitativos, estudios de casos, estudios de diseño de redes y soluciones innovadoras para la distribución de bienes urbanos.

- La entrega y recogida en la última milla (*last mile deliveries*) se enfoca en las operaciones que configuran el proceso de distribución de mercancías a un nivel micro. Cubre la etapa final o la primera del transporte en la cadena de suministro en la que los vehículos deben detenerse para entregar o recoger el producto a su punto de entrega o almacenamiento final. Las características principales son los problemas de enrutamiento y la accesibilidad a áreas urbanas específicas que no están equipadas con infraestructura logística relevante (por ejemplo, centros urbanos y áreas residenciales densas). El micronivel se refiere a la eficiencia en pequeñas ubicaciones geográficas, por ejemplo, distancia, tiempo, costes o número de vehículos, y los enfoques más comunes son los modelos matemáticos, que van desde la simulación hasta las funciones de costes.



Figura 2. Niveles dentro de la logística de la ciudad  
Fuente: Cardenas *et al.* (2017)

## 1.2. Movimientos urbanos de mercancías

Recapitulando las ideas presentadas por varios autores (Swgalou *et al.*, 2004; González-Feliu *et al.*, 2012; Cattaruzza *et al.*, 2017), el movimiento de mercancías dentro de las ciudades se puede agrupar en tres categorías principales: (i) movimientos entre empresas/establecimientos —B2B o IEM (*inter-establishment movements*)—, movimientos entre empresas y consumidores —B2C o ECM (*end consumers movements*)—, y movimientos de gestión urbana —UMM (*urban managements movements*)—. La figura 3 muestra este tipo de movimientos de mercancías y sus principales modalidades de organización.

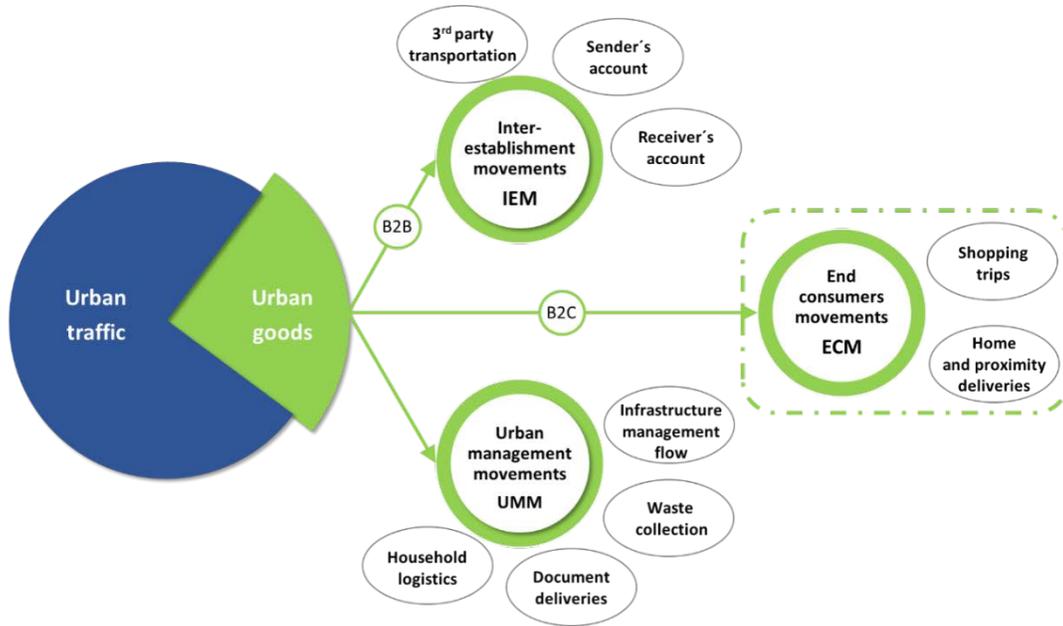


Figura 3. Clasificación de los movimientos de bienes urbanos  
Fuente: adaptado de Cattaruzza *et al.* (2017)

- 1) Movimientos entre empresas (B2B): son las actividades de recogida y entrega entre empresas realizadas en el ámbito urbano. A su vez se subdivide en:
  - a. Transporte de terceros: el transporte lo realiza un proveedor de servicios externo. Los camiones suelen realizar los transportes con carga completa para el caso de hipermercados, industria urbana o la agricultura, y realizan los transportes con carga parcial para el caso de la distribución minorista o actividades terciarias (servicios de paquetería, distribución a supermercados y tiendas medianas, hoteles, tiendas de ropa, etc.).
  - b. Transporte por cuenta propia del remitente: los transportes los suelen realizar las propias empresas remitentes (fabricantes, artesanos, empresas distribuidoras, etc.) que realizan negocios con otras empresas que reciben la mercancía y que disponen de algún vehículo para realizar estos transportes.
  - c. Transporte por cuenta del destinatario: los transportes los realizan las empresas que reciben la mercancía (por ejemplo, las empresas de distribución que recogen productos de distintos fabricantes) con su flota propia. La carga no suele estar muy optimizada y los vehículos disponibles son limitados.
- 2) Movimientos entre empresa y consumidor (B2C o C2B): a través de estos transportes urbanos se conectan empresas y consumidores. Dos tipos principales:

- a. Viajes de compras: se suelen realizar a través de vehículos privados, transporte público o a pie, en función de la distancia y del bien que se vaya a adquirir. Estos flujos de transporte no están optimizados y responden a necesidades individuales. Se incluyen en esta tipología las compras realizadas a través del comercio electrónico pero recogidas en tienda (BOPIS: *buy online, pickup in store*).
  - b. Entregas a domicilios y puntos de proximidad: las entregas a domicilio incluyen los flujos de entrega física al cliente del comercio *online* (*e-commerce*) y otras compras realizadas en tiendas que son entregadas en el domicilio del comprador (por ejemplo, compras en el hipermercado). Las entregas de proximidad suelen ser transportes realizados a puntos cercanos o convenidos con el cliente distintos del domicilio (taquillas inteligentes, puntos de conveniencia, etc.).
- 3) Movimientos de gestión urbana: están relacionados con el desarrollo de una ciudad, el mantenimiento público y otras necesidades funcionales de la ciudad. Son de diversa naturaleza y características, y pueden agruparse en cuatro subfamilias principales:
- a. Flujos de gestión de infraestructuras: se derivan de la edificación y la obra pública. Se trata principalmente de flujos no sistemáticos que tienen lugar en diferentes partes de las zonas urbanas y dependen en gran medida de las políticas urbanísticas.
  - b. Flujos de recogida de residuos: recogida de basuras para particulares y profesionales. Los flujos se organizan de forma diferente según el origen del tipo de residuo (domésticos, comerciales, industriales, hospitalarios, etc.).
  - c. Entrega de servicios postales y documentos: incluye prensa, servicios postales y entrega de documentación entre empresas. Las rutas son generalmente estables durante periodos de tiempo relativamente largos y suponen un número extenso de entregas al día.
  - d. Mudanzas: derivados de las mudanzas tanto de particulares como de empresas. Son flujos muy heterogéneos y difíciles de anticipar. Se suelen realizar por empresas especializadas.

Estos movimientos urbanos de mercancías suponen entre un 15-20 % del total del tráfico de una ciudad (Dablanc, 2011; DGT, 2020). Dentro de estos movimientos urbanos, los flujos B2B (IEM) y los flujos B2C (ECM) suponen la gran mayoría de estos movimientos urbanos (tomando como referencia diversos estudios realizados en ciudades francesas, se concretaría en: 46 % IEM, 46 % ECM, 8 % UMM) (González-Feliu, 2014; Cattaruzza *et al.*, 2017).

### 1.3. Marco logístico actual y tendencias en la logística urbana

La mayoría de estos movimientos de transporte urbano se realizan por carretera. En los 28 países de la UE, el 76,7 % de la Ton-km interior se realiza por este medio (Eurostat, 2019). Para el caso de España, este porcentaje se elevó al 95,1 % en el año 2017. No existen cifras oficiales sobre el reparto modal del transporte de mercancías urbano a nivel europeo, pero es de suponer que el transporte por carretera tenga aún un mayor peso, ya que tanto el ferrocarril, las vías navegables interiores y las tuberías no se adecúan para el transporte urbano y son más propicios para el transporte de larga distancia (Marinov *et al.*, 2013). En este sentido, la logística urbana desempeña un papel clave en el desarrollo económico de las ciudades y es básica para los servicios que se prestan a la ciudadanía, representando una parte fundamental de la actividad comercial y de servicios.

La figura 4 muestra, en función de la distancia recorrida, cuál es la opción más eficiente (menor coste) en el transporte de mercancías.

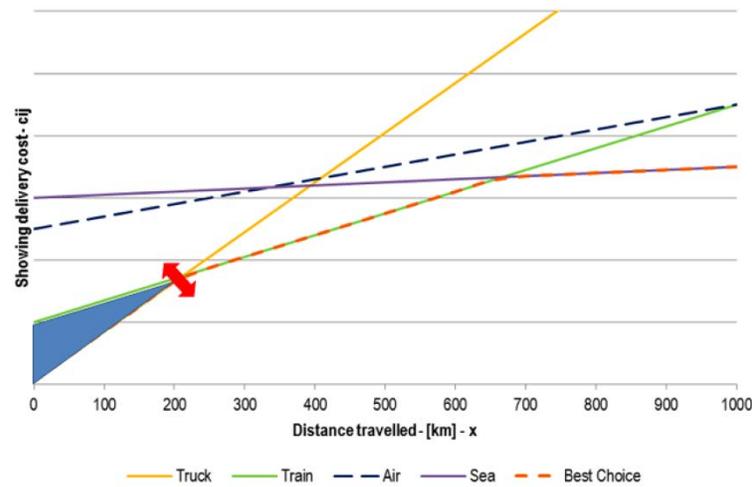


Figura 4. Alternativa más eficiente de transporte de mercancías en función de la distancia recorrida  
Fuente: Marinov *et al.* (2013)

Desde otro prisma, la distribución física urbana constituye uno de los principales causantes de la congestión del tráfico y la contaminación en las ciudades. En 2019, el sector del transporte fue responsable del 32 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE (Macharis y Nocera, 2019). De estas emisiones, el 44 % provino de automóviles, el 9 % de vehículos comerciales ligeros y el 19 % de vehículos pesados (EEA, 2020). Con respecto a la distribución urbana de bienes, es responsable de aproximadamente del 15-20 % del tráfico por carretera en una ciudad típica (Dablanc, 2011; DGT, 2020), y, además, implica otras actividades que requieren mayor uso de espacios urbanos: carga-descarga, almacenamiento, etc.

Un macroestudio que incluye datos de 24 países y 650 ciudades, incluidas 45 españolas, señala que un aumento en las partículas inhalables ( $PM_{10}$ ) y en las finas ( $PM_{2,5}$ ), emitidas principalmente por los tubos de escape de los vehículos y capaces de penetrar hasta los pulmones y el torrente sanguíneo, se asocia con un aumento en la mortalidad del 0,44 % y el 0,68 % (Liu *et al.*, 2019). Además, el coste del tiempo perdido debido a la congestión del tráfico y a las ineficientes operaciones asociadas a la distribución urbana de mercancías se cuantifica aproximadamente en un 2 % del PIB en los países de la UE (European Commission, 2016; AECOC, 2020).

Por lo tanto, la logística urbana presenta una dicotomía. Por una parte, desempeña un rol fundamental en la dinamización de la vida en las ciudades, proveyendo de bienes y servicios a ciudadanos y empresas. Sin embargo, desde otra perspectiva, el transporte urbano de mercancías también genera impactos sociales y ambientales negativos (Buldeo *et al.*, 2017), y es una de las principales causas de congestión del tráfico en las ciudades. En las zonas urbanas con mayor densidad, estos problemas se ven acentuados por la gran cantidad de personas y por la alta tasa de entregas. Pero esta paradoja también se presenta de igual forma en los propios ciudadanos, ya que, al mismo tiempo, demandamos en mayor medida un comercio electrónico con entregas inmediatas y flexibles, a la vez que estamos preocupados por la sostenibilidad y el medioambiente de las ciudades. Por lo tanto, no parece que seamos conscientes (o probablemente sí) de que a mayor actividad comercial demandada en las ciudades, mayores impactos (costes) externos generados.

Principales aportaciones y efectos negativos de la logística urbana:



Figura 5. Principales ventajas e inconvenientes de la logística de la ciudad

Fuente: elaboración propia a partir de Diziain *et al.* (2012)

Por lo tanto, el principal desafío al que se enfrenta la logística urbana es proporcionar un servicio eficiente y sostenible a la ciudad y a todos sus habitantes con las mínimas externalidades posibles. Dentro de este contexto, hemos de considerar que nos encontramos inmersos en una nueva era digital, acelerada a raíz de la pandemia de la covid-19, y que esto supone una auténtica revolución que lleva aparejados profundos cambios en la manera de actuar y de pensar de las

personas. Evidentemente, estamos asistiendo a una transformación de una sociedad cada vez más globalizada. Los avances en la tecnología y los cambios en la economía y en la sociedad están afectando a las ciudades e impactan de forma directa sobre la distribución urbana de mercancías. El incremento de la urbanización, la disputa por el suelo urbano, los cambios en los hábitos de compra y de consumo, las políticas en sus distintos ámbitos y las ciudades inteligentes y sostenibles son los principales factores transformadores de la logística urbana del futuro, a saber:

- Población: la población mundial se concentra en ciudades que, como resultado, están creciendo de forma continuada. Según datos del Banco Mundial, la población urbana se situó en el 58,82 % en 2017, lo que supone un aumento de 15 puntos porcentuales con respecto a 1992. En 2010, el 73 % de los ciudadanos europeos vivía en zonas urbanas y se espera que este porcentaje aumente a más del 80 % para 2050 (European Commission, 2017). Esto significa que la concentración de los procesos de fabricación y el comercio se da en las zonas urbanas. Esta concentración es la causa y, al mismo tiempo, una consecuencia del desarrollo del sistema logístico de transporte en las ciudades. En un contexto poscovid-19, existe mayor incertidumbre sobre si este movimiento de personas seguirá las estimaciones realizadas antes de la pandemia.
- Suelo urbano: debido al alto precio del terreno urbano en las grandes ciudades, la logística suele distanciarse de las áreas centrales de las ciudades. Sin embargo, en la actualidad, las diferentes formas de consumo y la búsqueda de soluciones para la última milla de los principales operadores están redundando de forma directa en el crecimiento de plataformas logísticas dentro de las ciudades, de acuerdo a los nuevos modelos de negocio y de comercio electrónico. La fuerte influencia del *e-commerce*, acelerada con la covid-19, implica necesidades de suelo más cerca de los clientes, que demandan entregas ultrarrápidas.

A continuación, se muestra la evolución de la inversión en suelo logístico en España para los últimos años (2007-2.º trimestre 2019).



Figura 6. Evolución de la inversión en logística en España (millones de euros)

Fuente: Knight Frank (2019)

### Cambios en los hábitos de compra y de consumo

El proceso de digitalización o revolución tecnológica actual favorece el incremento de las transacciones por comercio electrónico y permite, debido a las ventajosas condiciones que se establecen en las entregas a domicilio, un aumento del volumen de transacciones realizadas y de entregas de pequeñas cantidades de producto por compra efectuada. Desde la crisis de la covid-19 se han incorporado nuevos consumidores digitales que antes solo compraban por la vía tradicional. Las razones son evidentes: las medidas de bloqueo han llevado a nuevos consumidores a probar el canal en línea para evitar tiendas físicas concurridas, la frecuencia de compra de los ciberclientes anteriores aumentó y una multitud de negocios que aún no tenían presencia en línea se abrieron a este canal en sus tiendas. El comercio electrónico se convirtió en la única opción viable para muchas tiendas tradicionales durante la pandemia y ha demostrado su resistencia al satisfacer la creciente demanda de los consumidores y garantizar la provisión de bienes y servicios esenciales, por ejemplo, mediante la publicación de productos en sitios de redes sociales solicitando servicios de recogida o entrega de productos (Koch *et al.*, 2020; E-commerce Europe, 2021).

De forma paralela, los centros de las ciudades y los distritos comerciales se están convirtiendo en lugares de marca, donde ofrecer diferentes experiencias al cliente durante el proceso de compra, entretenimiento y actividades complementarias. Aparecen tiendas urbanas de marca, que antes optaban por las afueras o por los centros comerciales, suponiendo una nueva etapa de consumo e incrementando la presión en las operaciones del reparto de la última milla en la ciudad. En España, desde 2016, son ejemplo de este fenómeno: Carrefour, Decathlon, Ikea, Media Markt, Leroy Merlin, etc. (Foncillas, 2019). Debido al crecimiento del comercio electrónico y a las múltiples opciones de entrega, el modelo de comercio minorista evoluciona de un modelo de canal único/múltiple a un modelo de canal cruzado integrado (onmicanalidad) que exige más opciones de entrega, encontrando sinergias entre los canales *online* y *offline*.

## Sostenibilidad y tendencias políticas

- Sostenibilidad: las ciudades del mundo ocupan solo el 3 % de la Tierra, pero representan aproximadamente el 60 % del uso de los recursos y el 70 % de las emisiones de carbono (Naciones Unidas, 2020). De igual forma, según Naciones Unidas, desde 2016 el 90 % de los habitantes de las ciudades respiraba aire que no cumplía con las normas de seguridad establecidas por la Organización Mundial de la Salud, provocando más de 4,2 millones de muertes debido a la contaminación atmosférica. El cambio climático, los riesgos de contaminación y los riesgos para la salud están obligando a los gobiernos (pero también al sector privado y al sector público) a reducir las emisiones para lograr ciudades sostenibles. Si no se producen intervenciones de los grupos de interés, se espera un aumento del 32 % en las emisiones de carbono del tráfico de reparto urbano para 2030 (World Economic Forum, 2020).
- Política de la UE:
  - La UE, a través del European Green Deal (European Commission, 2019), ha presentado un ambicioso paquete de medidas que se concretan con la propuesta para que la UE sea climáticamente neutra en 2050. Con relación al transporte urbano de mercancías, dentro de la plataforma tecnológica relacionada con la logística de la UE, ALICE (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe, (<https://www.etp-logistics.eu>), se ha definido una hoja de ruta que centra sus objetivos en reducir emisiones a través de planes de acción concretos.
  - Se han proporcionado, a través de diferentes proyectos comunitarios, importantes fondos desde la UE para investigación y desarrollo tecnológico que han ayudado a desarrollar una gran cantidad de enfoques innovadores que abordan el transporte urbano de mercancías.
- Política nacional: por lo general, los países no tienen un marco de política nacional para apoyar a las ciudades en sus planes de transporte urbano. Siguen directrices de mayor rango (en el caso de Europa, las de la UE), por ejemplo, las contribuciones concretas a nivel nacional que se han presentado por los países europeos tras el Acuerdo de París para reducir las emisiones de gases contaminantes ([https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es)).
- Política local:
  - Las ciudades están tomando medidas y probando ideas por iniciativa propia, pero, en muchos casos, concentran sus pocos recursos disponibles en la planificación del transporte de pasajeros. Sin embargo, hay una tendencia a aumentar la atención al transporte urbano de mercancías.

- El sector del transporte de mercancías por carretera es un sector muy competitivo, lo que significa que los costes adicionales causados por las medidas de políticas locales podrían ser traspasados a los consumidores u operadores, y podrían perturbar el mercado si no se aplican de forma consensuada.
- Las principales ciudades desarrolladas (París, Londres, Madrid, Barcelona, Berlín, etc.) apuestan por medidas concretas que afectan a la distribución urbana para reducir los altos niveles de polución causados por el tráfico rodado (Kern, 2019).

### **Electrificación, automatización e innovación en vehículos**

Las nuevas tecnologías han permitido la asistencia al conductor y las operaciones autónomas de vehículos y, en el futuro, podrían conducir a la aparición de automóviles totalmente automatizados. Este cambio tecnológico se está produciendo muy rápidamente y la tecnología está prácticamente lista para su utilización, aunque todavía faltan cuestiones a resolver (legal, convivencia con medios de transporte convencionales, implicaciones sociales, infraestructura, etc.). El uso de vehículos eléctricos ligeros, drones, vehículos aéreos no tripulados o bicicletas de carga constituye una solución que puede reducir los requerimientos energéticos operacionales en la mayoría de los casos, incluso si el kilometraje recorrido es superior al que caracteriza a las furgonetas tradicionales (Duarte *et al.*, 2016; Patela *et al.*, 2020).

### **Ciudades inteligentes o *smart cities***

El grupo técnico de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2015), especifica «ciudad inteligente (*smart city*) como la visión holística de una ciudad que aplica las TIC para la mejora de la calidad de vida y la accesibilidad de sus habitantes y asegura un desarrollo sostenible económico, social y ambiental en mejora permanente».

La población, equipos, productos, empresas e instituciones dispondrán de conexión a la red de un modo inteligente, emitiendo y recibiendo información de modo continuado con el fin de optimizar el funcionamiento colectivo de la sociedad global.

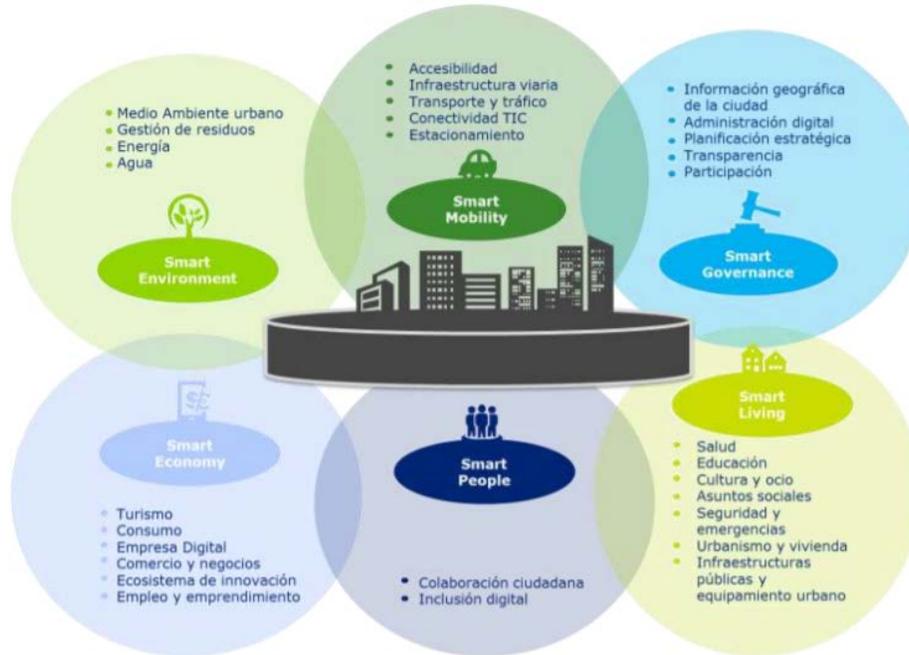


Figura 7. Modelo de ciudad inteligente  
Fuente: ONTSI (2015)

De los principales ámbitos funcionales que configuran una ciudad inteligente (ver figura 7), se derivan diversos subámbitos de actuaciones que afectan directamente a la gestión de la distribución urbana de mercancías en las grandes ciudades: medioambiente urbano, transporte y tráfico, estacionamientos, comercios y negocios, economía colaborativa, inteligencia artificial, infraestructuras públicas y equipamiento urbano, etc. (ONTSI, 2015).

## 1.4. Externalidades de la logística urbana y sostenibilidad. Propuestas e iniciativas

### 1.4.1. Externalidades de la logística urbana

Los costes externos o externalidades de la logística, y en particular del transporte, son un problema que ha adquirido mucha relevancia en estos últimos años, especialmente en las zonas urbanas. La sensibilidad y respuesta de los ciudadanos a los problemas ambientales y a los problemas generados por el sector del transporte en las ciudades ha llevado a los responsables en las Administraciones y organismos públicos a desarrollar estrategias a largo plazo para reducir las externalidades del transporte.

Los datos disponibles del transporte urbano de mercancías comparados con el transporte urbano de pasajeros por carretera, y el transporte de mercancías por carretera en general, revelan que también es importante tomar medidas en el campo del transporte urbano de mercancías para mitigar estos impactos negativos. Las estadísticas de la UE muestran que el 31,8 % de todo

el consumo de energía y el 26 % de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en los 28 Estados miembros se pueden atribuir al transporte (European Court of Auditors, 2017). Para el transporte de carga urbano es relevante que el 73 % de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el transporte puedan atribuirse al transporte por carretera. Dentro del transporte por carretera, los turismos (62 %), vehículos pesados (26 %) y furgonetas (12 %) constituyen las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte (ver figura 8).

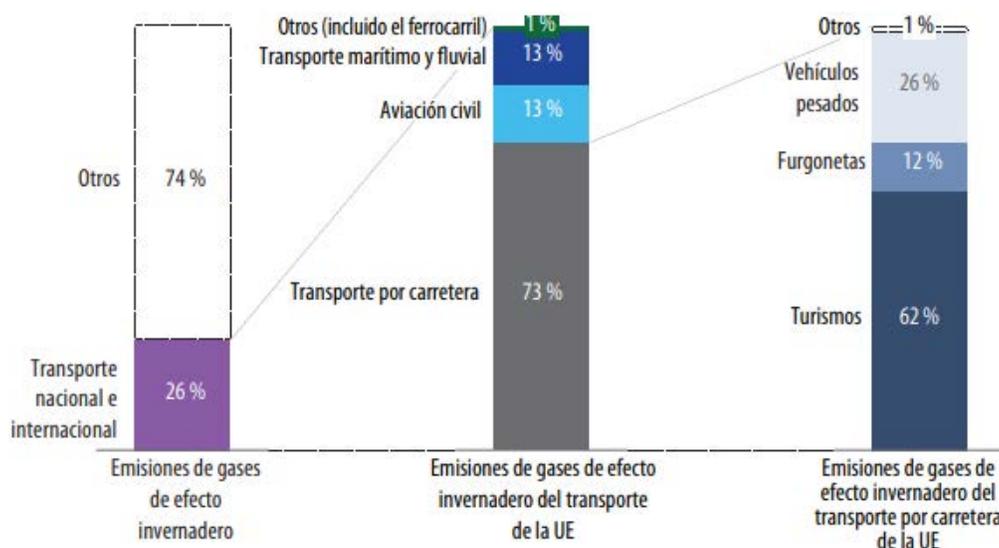


Figura 8. Emisión de gases de efecto invernadero EU-28

Fuente: Tribunal de Cuentas Europeo (2017)

La Comisión Europea, dentro de su *Handbook on the external cost of transport* (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019), dice: «los costes externos, también conocidos como externalidades, surgen cuando las actividades sociales o económicas de una o varias personas tienen un impacto en otra persona (o grupo de personas) y cuando ese impacto no se contabiliza o compensa por completo por la(s) primera(s) persona(s)».

Diferentes autores (Nash *et al.*, 2001; van Essen *et al.*, 2011; Thune-Larsen *et al.*, 2014; Blauwens *et al.* 2016, van Essen *et al.*, 2019) hacen una distinción entre cuatro categorías diferentes de externalidades, provocadas principalmente por el transporte por carretera: accidentes, congestión, costes ambientales y costes de infraestructura. Los costes ambientales consisten en la contaminación del aire, el cambio climático, el ruido, la contaminación del suelo y del agua. Sin embargo, la contaminación del suelo y del agua es la menos significativa en el caso del transporte por carretera y ferrocarril.

La Comisión Europea utiliza el *Manual europeo sobre costes externos del transporte* (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019) donde, en su versión más

reciente, propone ocho categorías de costes externos: accidentes, contaminación del aire, ruido, congestión, cambio climático, costes de producción de energía (*well-to-tank*), daño al hábitat y otros costes externos.



Figura 9. Costes externos del transporte

Fuente: elaboración propia a partir de European Commission. Directorate General for Mobility and Transport (2019)

Los impactos negativos que se describen a continuación no son impactos exclusivos del transporte urbano de mercancías, sino impactos que se relacionan con todos los tipos de transporte por carretera (predominantemente motorizado) y otros medios de transporte:

### Accidentes

El concepto de coste de los accidentes es complejo y no existe una definición armonizada en lo referente a la teoría económica, las estimaciones prácticas y las cuestiones éticas que plantea. Según Fernández y Olmedillas (2002), estos costes incluyen:

- Los costes directos, como los costes médicos derivados del accidente, los costes de Policía y administrativos y el coste de los desperfectos materiales ocasionados.
- Los costes indirectos, o valor de la pérdida de producción y consumos futuros.
- Los costes intangibles, como el valor de las vidas humanas perdidas, el dolor y el sufrimiento de los accidentados y sus familiares, así como el riesgo de verse involucrado en un accidente.

Blauwens *et al.* (2016) definen, desde otro prisma, los costes marginales de accidentes de carretera, como la relación del mayor riesgo de accidentes para otros usuarios del transporte y la cantidad de vehículos afectados. Sin embargo, no existe ninguna prueba de que un vehículo de

carretera adicional haga que el tráfico sea más peligroso para otros usuarios de la carretera. Otros factores, como las normas de tráfico o la promoción de la seguridad vial, también influyen en el riesgo de accidente. La Comisión Europea (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019) considera como costes externos aquellos que no están cubiertos por las primas de seguro, mientras que los costes cubiertos por los seguros no se consideran externos al individuo (es decir, están internalizados).

### **Contaminación del aire**

La emisión de contaminantes atmosféricos puede provocar diferentes tipos de daños. Lo más relevante y probablemente mejor analizado sean los efectos ocasionados sobre la salud, debido a los contaminantes presentes en el aire. Sin embargo, también son relevantes otros aspectos, como los daños materiales y de construcción, las pérdidas de cultivos y la pérdida de biodiversidad. Los costes de la contaminación atmosférica representan una de las categorías de costes externos que más se ha analizado.

Según el manual de la Comisión Europea, la contaminación del aire causada por el transporte incluye emisiones de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), plomo (Pb), material particulado (PM<sub>10</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (VOC). Se debe hacer una distinción entre los vehículos impulsados por diésel y los eléctricos. Los vehículos (automóviles, motocicletas, ferroviarios, etc.) impulsados por diésel son responsables de la contaminación del aire directa que consiste en emisiones de escape y no de escape. Las emisiones de escape provienen de la quema de combustible, mientras que las emisiones que no son de escape resultan de las emisiones de desgaste de neumáticos y frenos. Los vehículos impulsados por electricidad no causan contaminación del aire local, pero es importante tener en cuenta las emisiones ascendentes y descendentes debidas a la generación de electricidad.

### **Cambio climático**

El cambio climático se debe a la emisión de gases de efecto invernadero, como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Algunos autores (ICF Consulting, 2006) agregan las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) a esta categoría de emisiones que evocan el cambio climático, y también mencionan las emisiones de hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estima que, sin unas políticas y acciones climáticas concretas, las temperaturas aumentarán en el planeta de forma significativa a finales de este siglo (Stocker *et al.*, 2013). Este hecho tendría consecuencias impredecibles para el ecosistema, la salud humana y la sociedad.

La cantidad de CO<sub>2</sub> emitida está relacionada con el consumo de combustible del vehículo que realiza el transporte y el tipo de combustible utilizado. Las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte ferroviario están relacionadas con el consumo de combustible de los trenes de mercancías. Como resultado, solo los trenes de carga diésel causan emisiones directas de cambio climático. Las

posibles emisiones indirectas causadas por los trenes de carga eléctricos se consideran en la categoría de emisiones ascendentes y descendentes (Korzhenevych *et al.*, 2014).

### **Ruido**

El ruido puede definirse como aquellos sonidos no deseados de duración, intensidad u otra calidad que causan daños físicos o psicológicos a los humanos (Schroten *et al.*, 2018). Los umbrales por encima de los cuales el ruido se considera una molestia son algo arbitrarios, los límites empleados en los estudios previos de la Comisión Europea han sido de 50, 55 y 60 decibelios (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019). En carretera, los costes externos marginales del ruido son los costes asociados al efecto de un kilómetro adicional recorrido por el vehículo manteniendo el nivel de ruido. El ruido se mide durante un cierto periodo de tiempo y en un determinado momento del día y, dependiendo de la hora del día, es decir, de día o de noche o de hora valle u hora pico, los costes de ruido externo difieren (Le Maître, 2015). Con respecto a las emisiones de ruido debidas al transporte ferroviario, deben considerarse el frenado y el arranque de los vehículos ferroviarios, así como el acto de conducir en las propias vías, la tipología de vía, el tipo de convoy o la carencia horaria, entre otros. Por lo tanto, las emisiones de ruido siempre deben considerarse en su contexto específico. Ciudades como París (2019) y sus barrios circundantes están probando una nueva tecnología de «radar de ruido» para detectar, registrar y sancionar, en su caso, automáticamente a los vehículos con escapes ruidosos (de Clercq, 2019). El dispositivo utiliza cuatro micrófonos que pueden medir los niveles de decibelios cada décima de segundo y triangular el origen del sonido. El sistema está vinculado a CCTV para determinar quién está detrás del ruido excesivo.

### **Congestión**

Es el porcentaje de retraso durante el viaje de un vehículo en comparación con una situación de flujo libre. La congestión constituye una pérdida de tiempo y surge cuando el sistema de carreteras soporta a más usuarios de los que permite la capacidad de diseño prevista. En tal situación cada usuario se retrasa y retrasa a los demás. Estos retrasos representan pérdidas económicas, tanto en tiempo como en consumo energético (Fernández y Olmedillas, 2002).

Se estima que la congestión en los pueblos y ciudades europeas supone cerca del 2 % del PIB en los países de la UE (European Commission, 2016a; AECOC, 2020).

Este enfoque no incorpora a otros modos de transporte, como el ferrocarril o los aviones, ya que estos esencialmente proporcionan servicios programados y se planifican en función de la capacidad de asignación de redes y nodos. En cambio, para los tranvías, pueden existir costes de congestión relacionados con el transporte por carretera. Dependiendo de si un tranvía utiliza una parte separada de la calle o vías de la calle en un espacio compartido con el transporte por carretera, los costes externos de congestión serán diferentes (Korzhenevych *et al.*, 2014).

Por lo tanto, las cifras de costes externos de congestión deben considerarse en el contexto de la ciudad para la cual se calculan. Al generalizar estas cifras a otras áreas urbanas, se debe tener en cuenta la configuración de esas otras áreas urbanas.

### **Costes de producción de energía de ciclo completo**

Son aquellas actividades que ocurren fuera del mercado del transporte. Se pueden considerar los costes del cambio climático y la contaminación del aire asociados con la fabricación, el mantenimiento y la eliminación de vehículos (medios de transporte), fuentes de energía (combustibles, electricidad) e infraestructuras (Ecoplan, 2014). Korzhenevych *et al.* (2014) identifican tres tipos principales de producción de energía de ciclo completo: producción de energía; producción, mantenimiento y eliminación de vehículos y material rodante; y construcción, mantenimiento y eliminación de infraestructura.

Estos costes son especialmente importantes cuando se usan vehículos eléctricos o tranvías. El modo de generación de electricidad es crucial para estimar de manera fiable los costes de las emisiones ascendentes y descendentes.

Un ejemplo más clarificador de los costes de producción se encuentra en el estudio de la revista *Environmental Research Letters* (2019), donde los investigadores de la ciudad de California del Norte han analizado las emisiones que generan los patinetes eléctricos a lo largo de toda su existencia: desde la producción de materiales y componentes y el transporte desde la fábrica, hasta la carga y su redistribución en las ciudades. El resultado es que los actuales sistemas de patinetes eléctricos compartidos pueden resultar menos ecológicos que la bicicleta o el transporte público, especialmente en las líneas que más pasajeros mueven (Hollingsworth *et al.*, 2019).

### **Costes de daño al hábitat**

Siguiendo lo expuesto en el *Manual europeo sobre costes externos del transporte* (European Commission. Directorate General for Mobility and Transport, 2019), los daños ocasionados a la naturaleza producidos por el transporte se concretan en:

- Pérdida de hábitat: la construcción de carreteras y otras infraestructuras de transporte conduce a pérdidas de los ecosistemas naturales (biodiversidad). La pérdida de hábitat se produce durante la fase de construcción de la infraestructura de transporte, pero durará toda la vida útil de la infraestructura.
- Fragmentación del hábitat: la infraestructura de transporte también puede tener efectos adicionales de fragmentación y separación para los animales. Estos efectos de fragmentación pueden afectar negativamente los hábitats naturales de ciertas especies y dar lugar a efectos adversos para las especies y, en consecuencia, para la biodiversidad.

- Degradación del hábitat debido a las emisiones: la degradación del hábitat también puede ocurrir a través de la emisión de contaminantes atmosféricos de otras sustancias tóxicas (metales pesados, PAH, etc.). Estos efectos conducen nuevamente a la pérdida de biodiversidad.

### Otros costes

Entre los que se encuentran: contaminación del suelo y del agua, costes ascendentes y descendentes de vehículos e infraestructura, costes externos en áreas sensibles, costes de separación de áreas urbanas, etc.

Varios estudios (Verhoef, 1994; Eriksen, 2000; Janic, 2007; Havenga, 2015) han definido y cuantificado el coste de las diferentes externalidades derivadas del transporte urbano para diferentes regiones del mundo. Por su simplicidad y aplicación al contexto de la distribución urbana de mercancías, se considera útil el expuesto por Ranieri *et al.* (2018), donde los costes externos están relacionados con los principales factores identificados en la entrega de la última milla:

$$EC_{k,i} = f(D, M, E_i, v, c_k) \quad (1)$$

donde:

$EC_{k,i}$  (euros) es el coste de la externalidad  $k$  causada por el transporte realizado con el modo de transporte  $i$ .

$D$  (km) es la demanda de transporte de mercancías, medida como la distancia total recorrida por todos los modos de transporte adoptados para la entrega de todos los paquetes. Una reducción en el número y la duración de viajes reduce este factor y, en consecuencia, las externalidades generales.

$M$  (ton) es la carga transportada; la mejora en el factor de carga de cada vehículo influye en el factor  $D$  con una reducción en viajes o kilómetros recorridos.

$E_i$  (unidad/tonelada km) es el factor de emisión del modo de transporte  $i$  adoptado a una velocidad de transporte determinada; este factor está relacionado principalmente con la tecnología del vehículo y el comportamiento de conducción.

$v$  (km/h) es la velocidad promedio de viaje; este es un factor particular porque es inversamente proporcional a algunas externalidades: las emisiones se reducen a una cierta velocidad y luego se incrementan nuevamente como una curva de campana inversa; la contaminación acústica aumenta con la velocidad, por lo tanto, es necesaria una optimización.

$c_k$  (€/unit) es el coste unitario de la externalidad  $k$ .

### 1.4.2. Propuestas e iniciativas sostenibles en logística urbana

En los últimos años son numerosas las iniciativas que tratan de minimizar los efectos negativos producidos por la distribución urbana y sentar las bases del futuro para alcanzar una economía más sólida y circular, donde se utilicen los recursos de modo más sostenible. La UE firmó un acuerdo con la industria automovilística para alcanzar un límite promedio de CO<sub>2</sub> de 95 g/km a partir de 2020 (REGULATION EC, 2009). Utilizando los últimos avances aplicados al motor

de combustión, el objetivo técnico actual que se pretende alcanzar es de 103-104 g/km (en promedio). La introducción de vehículos eléctricos o híbridos es necesaria para pasar a disponer de vehículos de cero emisiones, al menos en áreas urbanas. Para este propósito, se necesita en el mercado un porcentaje de alrededor del 10-12 % de los vehículos eléctricos e híbridos (Ranieri *et al.*, 2018).

En el Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015) 195 países acordaron limitar el calentamiento global en 2 grados centígrados con respecto a la era preindustrial y proseguir los esfuerzos para que permanezca en 1,5 °C por encima de esos niveles. Para contribuir a los objetivos marcados del Acuerdo de París, un Reglamento posterior (UE) 2019/631 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/LSU/?uri=CELEX:32019R0631>) traza una trayectoria clara para las reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector del transporte por carretera, y propone cómo contribuir a cumplir el objetivo vinculante de reducción interna del 40 %, como mínimo, de las emisiones de gases de efecto invernadero en el conjunto de la economía de aquí a 2030, en comparación con las emisiones de 1990. Se establece que, «aunque todos los sectores económicos deben tomar medidas para aumentar la eficiencia del consumo de energía, el transporte tiene un enorme potencial de eficiencia energética, cuya realización exige seguir centrándose en el endurecimiento de las normas de comportamiento en materia de emisiones de CO<sub>2</sub> de los turismos y vehículos comerciales ligeros con la vista puesta en 2030».

En la figura 10 se muestra, de forma resumida, las 10 claves del Acuerdo de París.

**Las 10 claves del Acuerdo de París de un vistazo** Via: [www.efeverde.com](http://www.efeverde.com) de la Agencia EFE

**1. Objetivo:**

- Mantener la temperatura media mundial "muy por debajo" de 2 grados centígrados respecto a los niveles preindustriales
- Los países se comprometen a llevar a cabo "todos los esfuerzos necesarios" para que no rebase los 1,5 grados y evitar así "los impactos más catastróficos"

**2. Forma legal:**

- Acuerdo ONU legalmente vinculante pero no la decisión que lo acompaña ni los objetivos nacionales de reducción de emisiones.
- El mecanismo de revisión de los compromisos de reducción de cada país sí es jurídicamente vinculante

**3. Reducción de emisiones:**

- 187 países de los 195 que forman parte de la Convención de cambio climático de la ONU han entregado compromisos nacionales de lucha contra el cambio
- Entrarán en vigor en 2020
- Se revisarán al alza cada 5 años.
- Podrán usar mecanismos de mercado (compraventa de emisiones) para cumplir sus objetivos.

**4. Revisión:**

- Revisión de los compromisos de reducción cada cinco años. Se hará al alza.

**5. Cumplimiento:**

- No habrá sanciones
- Si habrá un mecanismo transparente de seguimiento del cumplimiento

**6. Meta a largo plazo:**

- Las naciones se proponen que las emisiones toquen techo "tan pronto como sea posible"
- Los países se comprometen a lograr "un equilibrio entre los gases emitidos y los que pueden ser absorbidos" en la segunda mitad de siglo

**7. Financiación:**

- Los países desarrollados "deben" contribuir a financiar la mitigación y la adaptación en los Estados en desarrollo
- Las naciones ricas deberán movilizar un mínimo de 100.000 millones anuales desde 2020 para apoyar la mitigación y adaptación y revisar al alza esa cantidad antes de 2025.

**8. Pérdidas y daños:**

- Reconoce la necesidad de poner en marcha el "Mecanismo de Pérdidas y Daños" asociados a los efectos más adversos del cambio climático
- No detalla ninguna herramienta financiera para abordarlo.

**9. Adopción:**

- Tendrá lugar en una ceremonia de alto nivel en la sede de Naciones Unidas, en Nueva York.
- La fecha: 22 de abril de 2016.

**10. Entrada en vigor:**

- Cuando al menos 55 partes, que sumen el 55% de las emisiones globales lo hayan ratificado

Fuente: Equipo EFEverde en la COP21 y texto del Acuerdo de París sobre el clima.  
Infografía: A.L. para [www.efeverde.com](http://www.efeverde.com)

Esta infografía es libre uso citando las fuentes. Ha sido desarrollada en el marco del proyecto "DeUnVistazo" de [www.efeverde.com](http://www.efeverde.com) con el apoyo de Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Figura 10. 10 claves del Acuerdo de París

Fuente: Arévalo (2015)

Los Estados miembros de la UE tienen la responsabilidad de traducir las directivas comunitarias en planes de acción nacionales y programas operativos: Sustainable Urban Mobility Plan, Horizon 2020 y Civitas son ejemplos de planes liderados por la UE para concretar las diferentes directivas comunitarias.

De igual forma, a nivel comunitario, se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación que incluían diferentes propuestas sobre la logística sostenible de la ciudad y el transporte limpio en la última milla, destacando por su relevancia: BESTUFS, C-LIEGE, STRAIGHTSOL, COFRET, NOVELOG y ALICE:

- El proyecto BESTUFS tiene en cuenta los problemas causados por la entrega de la distribución urbana de mercancías y los agrupa en tres categorías principales: impactos económicos, ambientales y sociales. Las reducciones en el total de viajes de vehículos y en los kilómetros de los trayectos se identifican como posibles soluciones para el problema de entrega de la última milla (Allen *et al.*, 2007).
- C-LIEGE clasifica los impactos negativos del transporte de mercancías en la ciudad en tres categorías: medioambiente (aire y ruido), energía (consumo) y economía (eficiencia del transporte, seguridad, uso del suelo y planificación urbana) (Cossu *et al.*, 2014).
- El proyecto STRAIGHTSOL propone contemplar el tiempo de viaje, el empleo, la seguridad vial y la contaminación ambiental como factores de impacto en un modelo de evaluación basado en el análisis de coste-beneficio social (SCBA, *Social Cost Basefit Analysis*) (Straightsol, 2015).
- COFRET (*Carbon Footprint of Freight Transport*) trata de aunar los esfuerzos de los transportistas, transitarios, operadores ferroviarios, aerolíneas y transportistas por carretera para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para ello, se configuró un consorcio de 14 socios de 8 países europeos con el fin de desarrollar y validar los requisitos dentro de un marco basado en la metodología de cálculo preciso de las emisiones de GEI en el contexto de las cadenas de suministro (COFRET, 2014).
- El proyecto NOVELOG (vigente en la elaboración de esta tesis) utiliza cuatro métodos de evaluación: evaluación de impacto, SCBA, transferibilidad y adaptabilidad y análisis de riesgo, además de la evaluación de análisis multicriterio de los distintos grupos de interés. En particular, el SCBA considera los costes de externalidades: coste externo de la contaminación del aire, coste marginal del cambio climático, coste marginal del accidente, coste de congestión, coste marginal de ruido (<http://novelog.eu>).
- ALICE (*Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe*): tiene como misión aumentar la eficiencia del 10 al 30 % en el sector logístico de la UE. Esto supone definir las pautas para crear una industria europea resiliente, un enfoque sobre el sector de la cadena de suministro y logística orientado a las «personas, el planeta y los beneficios». Es

decir, un sector que sea económico, medioambiental y socialmente sostenible, y contribuyendo tanto a la competitividad de la industria como a los objetivos políticos de la UE. Dos de sus pilares clave son: (i) el desarrollo de nuevos conceptos de logística y cadena de suministro e innovación para una industria más competitiva y sostenible, y (ii) acelerar el despliegue de cadenas de suministro más eficientes, competitivas y sostenibles (<https://www.etp-logistics.eu>).

ERTRAC (Consejo Asesor Europeo de Investigación en Transporte por Carretera) ha desarrollado distintos programas y proyectos de investigación, relacionados con la distribución urbana, que han sido abordados en el ámbito europeo en los últimos años. Son cerca de 70 proyectos e iniciativas que incluyen propuestas de ámbitos y regiones muy diversas. Todas estas investigaciones y proyectos tratan de mitigar, en menor o mayor grado, las principales externalidades negativas vinculadas a la logística de la ciudad (<https://www.ertrac.org/>).

## 1.5. Grupos de interés en la logística urbana

Los denominados grupos de interés (*stakeholders*) hacen referencia a cualquier grupo de personas, organizadas o no organizadas, que comparten un interés o participación en un tema o sistema en particular (Macharis *et al.*, 2012).

Claramente, las diferentes perspectivas de las partes interesadas sobre cómo abordar actividades de transporte urbano más sostenibles son una barrera para generar una participación coordinada de los grupos de interés (Duin, 2012). Las preguntas relacionadas con estas perspectivas incluyen las siguientes: ¿quiénes son los principales grupos de interés en la logística urbana?, ¿qué perspectivas e intereses individuales existen sobre las políticas de transporte urbano?

En la logística urbana, se pueden distinguir dos grandes tipos de grupos de interés (Melo, 2004):

- (i) Grupos con intereses comerciales que están principalmente orientados e involucrados en los movimientos de transporte de mercancías en su ciudad (actores de la cadena de suministro y proveedores de infraestructuras).
- (ii) Grupos de interés públicos que están directamente interesados en crear o disfrutar de un entorno urbano atractivo.

### **Grupos con intereses comerciales que están principalmente orientados e involucrados en los movimientos de transporte de mercancías en su ciudad**

Los grupos con intereses comerciales (profesionales) están involucrados en alguna de las fases de la cadena de suministro, dentro de las cuales, ya sea la primera o la última parte, se lleva a cabo en un entorno urbano (Allen *et al.*, 2000). El objetivo de estos grupos de interés es proporcionar a sus clientes el mejor servicio posible al menor coste (Quak, 2008; Lindholm y Behrends, 2012). Por lo general, estos actores son empresas privadas que organizan las operaciones de la manera

más eficiente posible para reducir sus costes operativos. Sin embargo, desde la perspectiva de una ciudad, la parte de transporte urbano de ese servicio logístico puede ser muy ineficiente (World Bank, 2009; Quak *et al.*, 2014). Según un informe de la Comisión Europea (European Commission, 2016a), el 20 % de los camiones en la UE circulan vacíos, creando ineficiencias en la gestión de capacidades, especialmente cuando los vehículos también vuelven a los almacenes.

El hecho de que existan diferentes grupos de interés involucrados en la logística de la ciudad se ha traducido en numerosos documentos y proyectos de investigación sobre la distribución urbana de mercancías. Ogden (1992) fue uno de los primeros en redactar un análisis exhaustivo del transporte urbano de mercancías, identificando tres grupos de interés principales con un papel activo en la logística urbana: receptores, remitentes y transportistas. La mayoría de los autores que abordan el tema de los grupos de interés en la distribución urbana de mercancías también distinguen entre estos tres, aunque algunos de ellos no consideran a los remitentes/expedidores y receptores como grupos de interés separados (Taylor, 2005; Quak, 2008; Behrends, 2011), o no incluyen a los receptores como un grupo distinto (Taniguchi y Tamagawa, 2005).

La UE, dentro del proyecto Civitas (<https://civitas.eu/es/about>), identifica a los siguientes actores en logística urbana dentro de la *cadena de suministro*, con las siguientes características:

- Remitente/expedidores: fabricantes, mayoristas, minoristas, etc., que envían mercancías a otras empresas o personas y, a menudo, no se encuentran en la ciudad. Como resultado, generalmente no se sienten responsables de los problemas derivados del transporte urbano de mercancías. Tienden a maximizar sus niveles de servicio en términos de costes y fiabilidad del transporte. En muchos casos, el remitente es la parte interesada responsable de contratar un transportista.
- Proveedores de servicios logísticos (LSP): almacenamiento, gestión de inventario, carga, y, principalmente, operadores de transporte de mercancías. Los operadores de transporte generalmente buscan minimizar sus costes maximizando la eficiencia de sus recorridos de recogida y entrega, y se espera que proporcionen un alto nivel de servicio a bajo coste. Los transportistas son el grupo de interés que lleva a cabo el transporte urbano de mercancías, pero en muchos casos su operatividad está restringida por límites establecidos por otros; por ejemplo, el horario de apertura de las tiendas o las ventanas de tiempo designadas para realizar las entregas. Frecuentemente, los operadores de transporte desarrollan su actividad en un área geográficamente más grande que la ciudad.
- Receptores finales: comerciantes, oficinas, obras, residentes, etc. Los receptores están ubicados en las áreas urbanas y son principalmente el punto final de la cadena logística. Los receptores a menudo no son responsables del transporte urbano de mercancías, ya que los envíos son organizados y pagados por el remitente (para el receptor, el precio del transporte está incluido en el precio de los productos solicitados).

En muchos casos, los receptores no se dan cuenta de que pueden influir e influyen en el transporte urbano de mercancías, por ejemplo, al establecer ventanas de tiempo. Sin embargo, dado que el receptor es a menudo el único actor de la cadena de suministro ubicado en la ciudad, puede identificarse mejor con los problemas locales que los operadores de transporte y los remitentes, que generalmente están activos en un área geográfica más grande.

Otro aspecto fundamental que condiciona la logística urbana es *la infraestructura disponible* para los distintos grupos de interés. Hay tres partes interesadas en el suministro de los diferentes recursos: proveedores de infraestructura, operadores de infraestructura (administradores) y propietarios de tierras. Estos grupos de interés y sus inversiones condicionan las posibilidades para el transporte urbano de mercancías.

### **Grupos de interés públicos que están directamente interesados en crear o disfrutar de un entorno urbano atractivo**

Se reconoce como grupos de interés en el transporte urbano de mercancías a los responsables de la formulación de políticas, las autoridades locales y los encargados de adoptar decisiones (Muñuzuri *et al.*, 2005; Taniguchi y Tamagawa, 2005; Taylor, 2005; Quak, 2008; Behrends, 2011; Russo y Comi, 2011; Stathopoulos *et al.*, 2011; Lindholm y Behrends, 2012; MDS Transmodal Limited, 2012; Ballantyne *et al.*, 2013; Bjerkan *et al.*, 2014).

Estas *autoridades públicas* condicionan activamente las posibilidades de logística urbana a través de su regulación. Se distinguen los siguientes grupos de interés público: (i) autoridades locales, (ii) Gobierno/autoridad nacional y, para algunos asuntos, (iii) organismos de rango superior, como la Comisión Europea en el ámbito comunitario.

Las autoridades locales se centran en lograr una ciudad atractiva y sostenible, por lo que, desde esa perspectiva, el transporte urbano de mercancías puede considerarse como uno de los principales responsables de las molestias y de la contaminación generada. Dentro de los objetivos de los gobiernos locales se encuentran, entre otros: asegurar la accesibilidad de la ciudad, disponer de un sistema de transporte efectivo y eficiente, reducir la congestión y las molestias medioambientales, así como aumentar la seguridad del tráfico por carretera.

Por su parte, las autoridades nacionales generalmente solo están involucradas en el transporte urbano de mercancías de forma muy residual, ya que se considera principalmente como un asunto local. Sin embargo, los intereses de las autoridades nacionales (como la reducción de la congestión y las externalidades a nivel nacional o regional) afectan a muchas operaciones de transporte de carga urbana, así como las políticas de las autoridades locales.

Organismos de rango superior, como la UE, intervienen activamente en la logística urbana a través de su política de transportes y de una legislación común que implica a todos los Estados miembros (por ejemplo, al establecer normas de emisión en los motores o la imposición de sanciones para las ciudades por la mala calidad del aire). De igual forma, se lanzan numerosas

iniciativas y proyectos de investigación con el principal propósito de elevar la calidad de vida de los ciudadanos europeos.

Los intereses de estos actores públicos se pueden clasificar de acuerdo con el triple balance de la sostenibilidad: intereses ambientales, sociales y económicos (Quak, 2008). Los intereses de los diferentes grupos de interés pueden estar en conflicto entre sí, por ejemplo, si se comparan los habitantes de una ciudad, los turistas y los visitantes, estos últimos se preocuparán menos por la calidad del aire y las emisiones contaminantes que los residentes habituales. En el mismo sentido, las autoridades locales pueden poner en marcha medidas puntuales que no favorezcan las directrices marcadas por la UE.

Finalmente, existe un grupo de actores que se ven perjudicados por el transporte urbano de mercancías, pero que no influyen directamente en él: *los afectados* (Quak *et al.*, 2016; Bakås *et al.*, 2017). Las autoridades locales a menudo actúan en nombre de estos afectados ya que son los actores que votan en las elecciones locales y, como resultado, se centran en minimizar los problemas reales y aparentes causados por el transporte urbano de mercancías. Estas personas afectadas incluyen (Civitas, 2015):

- Otros participantes del tráfico: este grupo está formado por usuarios vulnerables de la vía pública (ciclistas, peatones, etc.) que comparten la misma infraestructura que los vehículos de transporte de carga, especialmente en el área urbana, y que los vehículos de pasajeros que, en ocasiones, se ven obstaculizados por furgonetas involucradas en operaciones de carga y descarga.
- Residentes de la ciudad y usuarios de la ciudad: las personas que viven, trabajan y compran en la ciudad. Los residentes pueden experimentar molestias por el transporte urbano de mercancías (por ejemplo, olor, molestias por ruido o vibraciones).
- Visitantes/turistas: que se ven afectados en menor medida por el transporte urbano de mercancías, por ejemplo, cuando los camiones demasiado grandes en el centro de una ciudad causan intrusión visual o disminuyen la percepción de la calidad espacial de la ciudad. Especialmente, desde un punto de vista comercial, es importante tener una ciudad atractiva que los turistas y visitantes quieran visitar, y por lo tanto hay un interés en minimizar las molestias del transporte de carga urbano.

A continuación, a modo de resumen, se muestran los diferentes grupos de interés descritos y sus objetivos dentro de la logística de la ciudad.

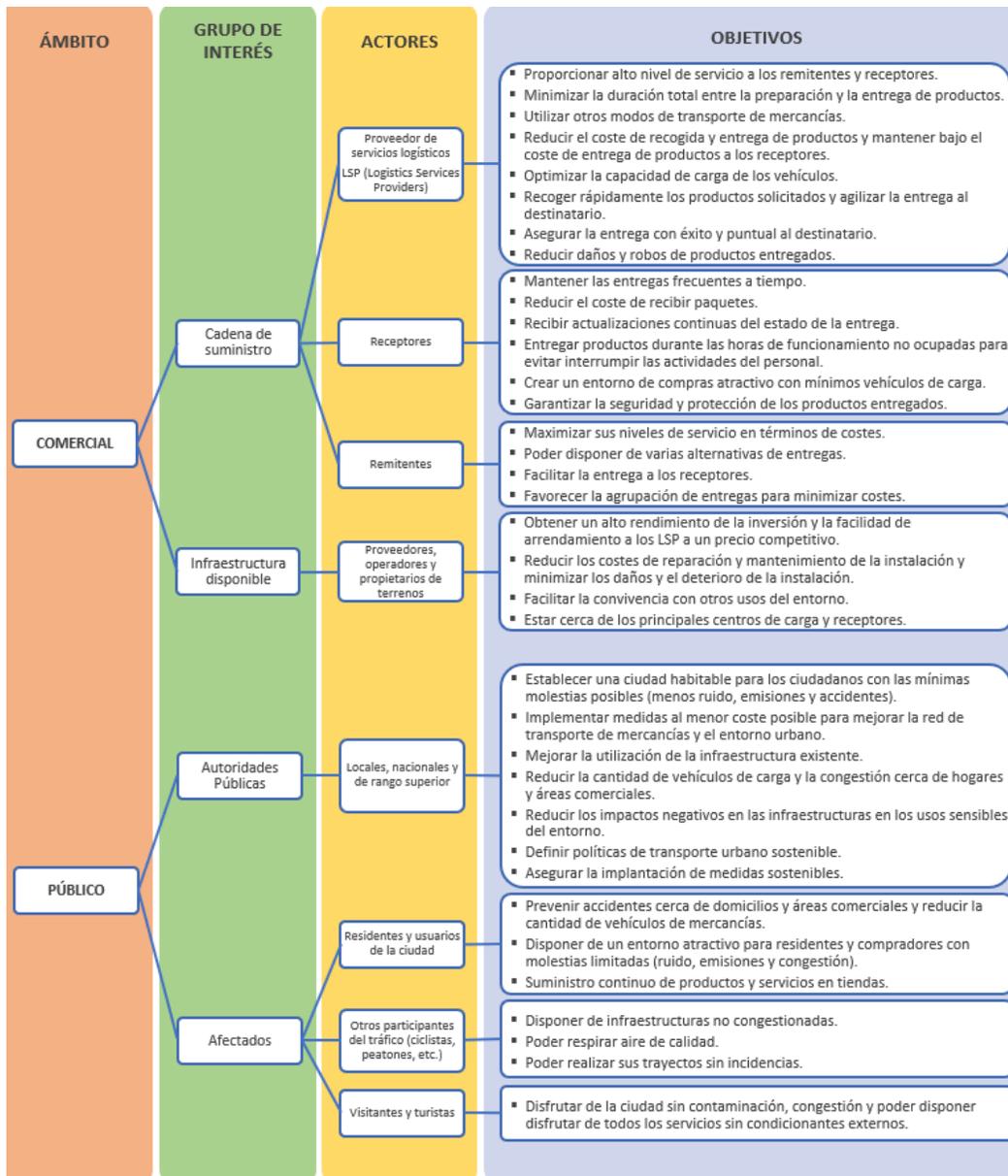


Figura 11. Grupos de interés en la logística urbana: ámbito, actores y objetivos  
 Fuente: elaboración propia a partir de Civitas (2015) y Aljohani y Thompson (2018)

Con relación a los intereses particulares de cada grupo de interés, la logística urbana en general y el transporte urbano de mercancías en particular están organizados de manera que no responden de forma satisfactoria a las necesidades de los grupos de interés descritos. Resulta muy difícil encontrar una o más medidas que encajen y funcionen teniendo en cuenta los intereses de todos los grupos de forma simultánea (van Rooijen y Quak, 2010; Holguín-Veras y Jaller, 2014). Además, es imposible (tampoco es necesario) encontrar medidas, o combinaciones de medidas, que no presenten ninguna desventaja para ningún grupo de interés. En la búsqueda de soluciones, bastaría con que cada grupo de interés perciba que las ventajas de una medida son

mayores que sus desventajas para «alcanzar un terreno común» que requiere una colaboración productiva entre los diferentes actores (Bjerkan *et al.*, 2014).

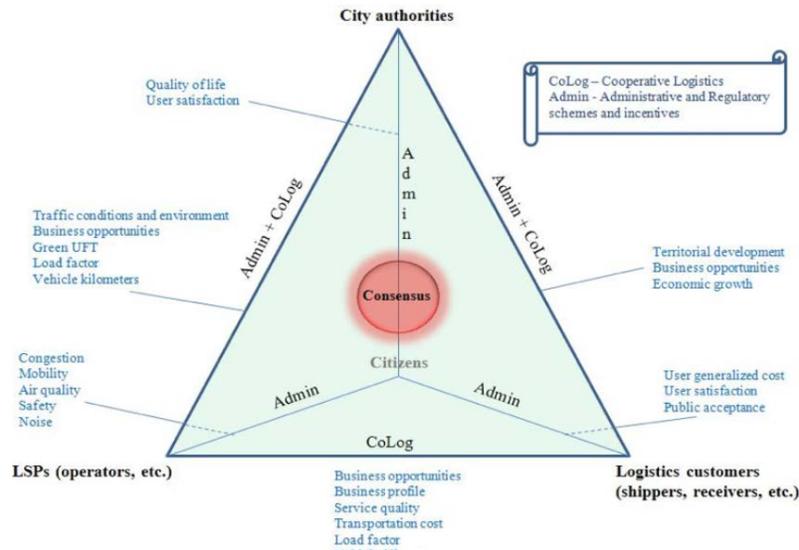


Figura 12. Stakeholders, intereses e interacciones dentro de la logística urbana

Fuente: Novelog (<https://cordis.europa.eu/project/id/636626>)

La pirámide triangular de la figura 12 representa los intereses e interacciones entre las distintas partes interesadas. Las autoridades públicas (responsables políticos) se colocan en el vértice superior, como grupo de interés central. Otros grupos de interés se agrupan en remitentes/receptores, proveedores de servicios logísticos (transitarios, operadores), y la sociedad (ciudadanos).

Los bordes de la pirámide representan el esquema cooperativo de cada par de partes interesadas, asumiendo «esquemas e incentivos administrativos y reguladores» (Admin) y/o «Logística Cooperativa» (CoLog), que comprenden los dos conceptos. Según el proyecto europeo NOVELOG, el consenso se coloca en el centro de la pirámide, a través de la construcción de una plataforma de intercambio de comunicaciones y conocimiento, en varios niveles, con respecto a la logística urbana.

## 1.6. Ineficiencias en la logística urbana

### 1.6.1. Ineficiencias relacionadas con la oferta-demanda

Las ineficiencias vienen derivadas de la fragmentación de los diferentes flujos de transporte de mercancías, especialmente en la ciudad. Esto se debe a varios factores: volúmenes más pequeños, más direcciones de entrega, mayores frecuencias de reabastecimiento, plazos de entrega ajustados, niveles de inventario más bajos y entregas justo a tiempo (Macharis y Kin, 2017). Además, las entregas a domicilio se ven complementadas por otras opciones como la entrega el mismo

día (Savelsbergh y van Woensel, 2016), existiendo problemas adicionales con las entregas fallidas a domicilio y los pedidos devueltos. Todos estos factores se agravan con el incremento que ha experimentado el comercio electrónico en los últimos años y que, desde el inicio de la pandemia de la covid-19, se ha visto reforzado con la incorporación de nuevos colectivos de clientes a través de la compra *online*.

La ineficiencia se revela en la incapacidad de los proveedores, tanto los transportistas como los operadores logísticos, para cumplir con los requisitos de la demanda, lo que conduce a vehículos con una tasa de carga del vehículo más baja, a veces incluso en vacío (Arvidsson, 2013). En conjunto, los principales efectos son la presencia innecesaria de vehículos de transporte y el aumento de los costes para las empresas. Se estima que el 28 % de los costes totales de transporte ocurren en la última milla y, en el caso de entregas a domicilio, estos pueden ser muy superiores, hasta del 75 % (Arvidsson, 2013). Tomando como referencia un vehículo que realiza cinco paradas en diez kilómetros, el consumo de combustible aumenta en un 140 % (Martensson, 2005).

Existen otros aspectos que generan ineficiencias desde el punto de vista de la O-D:

- Falta de colaboración vertical: particularmente entre los proveedores de servicios logísticos (LSP) y el receptor (Verlinde *et al.*, 2012). En la mayoría de los casos, un receptor ordena con un remitente, que a su vez contrata un LSP. El receptor y el LSP en su mayoría no se consultan entre sí sobre el tiempo y el lugar de entrega adecuados (Verlinde *et al.*, 2012). Un minorista, por ejemplo, no puede acordar fácilmente horarios de entrega alternativos que podrían ser beneficiosos tanto para él como para el LSP.
- Falta de colaboración horizontal: entre las partes interesadas que operan al mismo nivel en la cadena de suministro, particularmente los LSP. A pesar de los posibles beneficios que puede presentar la colaboración (mayor porcentaje de carga utilizada, utilización de almacenamiento común, reducción de costes y emisiones), se ve obstaculizada por varias barreras: encontrar una parte fiable, un mecanismo de asignación equitativa para compartir la carga de trabajo, costes y beneficios, y problemas de privacidad (Crujssen *et al.*, 2007). Esto está estrechamente relacionado con la competitividad en el mercado del transporte. En Europa, el 85 % de las empresas de camiones de corta distancia emplean a menos de cinco conductores, y sin embargo estas empresas realizan el 80 % de las entregas (Dablanc, 2011).
- Heterogeneidad en las cadenas de suministro de las zonas urbanas: las diferentes variantes de la logística urbana tienen problemas y necesidades distintas y, por lo tanto, precisan de soluciones diferentes (Muñuzuri *et al.*, 2016). Esta heterogeneidad depende de las características del producto, de la tipología de la ciudad y de las demandas de los receptores. Por ejemplo, en el caso de los bienes perecederos o frágiles

(alimentos, medicinas), deben transportarse en condiciones de temperatura controlada y cumpliendo la normativa vigente, lo que supone un freno al potencial de agrupamiento con otros artículos. Otras entregas requieren hacerse fuera del horario comercial habitual (por ejemplo, los repartos de madrugada de los periódicos, Kin *et al.*, 2018).

### 1.6.2. Ineficiencias en el contexto de la oferta

En el transporte urbano de mercancías predomina el uso de la carretera, principalmente por los vehículos motorizados (Kin *et al.*, 2017). Este dominio es particularmente preocupante ya que los vehículos comerciales son uno de los modos de transporte menos sostenibles y se reconoce que su impacto negativo es más acusado que el de otros vehículos de motor (Anderson *et al.*, 2005). Un estudio realizado en Londres, en 2005, mostró como el 14 % de los accidentes de tráfico en los que se vieron involucrados vehículos para el transporte de mercancías resultaron acabar en lesiones graves o mortales. Las cifras son peores para los vehículos pesados (HGV) que, aunque solo representan el 4 % del tráfico total, contribuyen a más de la mitad de los accidentes graves o mortales de ciclistas y peatones (Arvidsson y Pazirandeh, 2017).

En la mayoría de las áreas urbanas se observa un déficit de capacidad en las infraestructuras o un exceso de congestión en la red de carreteras, causado por todo el tráfico que se genera en las ciudades. Las autoridades proporcionan, con carácter general, menos infraestructuras de la que exigirían las personas y las empresas de transporte (Kin *et al.*, 2018). Los principales resultados son la difícil accesibilidad a las zonas urbanas y la congestión del tráfico en general (porcentaje de retraso frente a una situación de flujo libre). Este es un problema permanente en ciudades de todo el mundo: Ciudad de México (66 %), Bangkok (61 %), Estambul (49 %), Los Ángeles (45 %), Londres (40 %), París (38 %) y Bruselas (38 %) (TomTom, 2018).

Con relación a las infraestructuras aparecen, junto a las carreteras, otro tipo de aspectos que generan ineficiencias en la logística urbana. Una de las más importantes, consecuencia de la escasez de suelo urbano, son las zonas de carga y descarga que resultan insuficientes ya que simplemente no se proporcionan, o bien porque se proporcionan pero no se controlan (Muñuzuri *et al.*, 2005). Otro aspecto está relacionado con las dificultades que presentan los repartos en los centros históricos de determinadas ciudades (Machado de Oliveira *et al.*, 2017). Por último, también es importante destacar las limitaciones que presentan las nuevas tecnologías de vehículos eléctricos o las bicicletas de carga (*cargo bike*), que requieren nuevas infraestructuras para la recarga y una nueva red de carreteras (Machado de Oliveira *et al.*, 2017).

Estas limitaciones conllevan dos efectos:

- Costes derivados de la congestión: la congestión del tráfico en general conduce a costes externos para la sociedad y la economía en general. Se estima que la congestión en los pueblos y ciudades europeas supone el 2 % del PIB en los países de la UE (European Commission, 2016a; AECOC, 2020).

- Costes crecientes para el sector privado: debido a su poca capacidad para optimizar las rutas de reparto y a las dificultades para mantener su nivel de servicio ofrecido a los clientes. Los retrasos contribuyen a una tasa de carga baja y a que los conductores no puedan terminar su ronda de entrega durante su turno.

Como se detallará más adelante, las medidas regulatorias del tráfico, incluidas las restricciones, son importantes para favorecer ciudades habitables, pero podrían obstaculizar la eficacia de la distribución urbana e incluso crear problemas adicionales (Quak, 2008). Las autoridades locales están menos preocupadas o desconocen los intereses de las empresas cuando implementan medidas que complican la distribución urbana de mercancías (Lindholt y Behrends, 2012; Macharis y Kin, 2017). Un claro ejemplo es, para el caso de la ciudad de Madrid, las diferentes propuestas de Madrid Central o Madrid 360, donde la Confederación Española de Transporte de Mercancías (CETM) expone que no ofrecen respuestas a las preocupaciones del sector del transporte de mercancías por carretera de la Comunidad de Madrid (CETM, 2019). Por lo tanto, las medidas no siempre alcanzan el efecto deseado o incluso producen efectos adversos.

La falta de armonización de las medidas en materia de política de transporte entre ciudades también causa ineficiencias y efectos ambientales negativos (Quak, 2008). Además, lo que complica aún más la implementación de estas medidas es el problema de la transferibilidad: una medida que tiene éxito en una ciudad no necesariamente funciona en otra debido a las especificidades locales (Timms, 2014).

### **1.6.3. Ineficiencias en el contexto de la demanda**

El incremento del PIB en las zonas urbanas presenta, entre otros efectos, un aumento en la propiedad del vehículo y de sus desplazamientos, lo que contribuye considerablemente a incrementar la congestión. Además de la riqueza, la motorización es causada por dos factores (Ifmo, 2013):

- Dependencia de algunas ciudades del automóvil: estas ciudades se caracterizan por bajas densidades, expansión, autopistas largas y baja o nula participación en el transporte público. Por lo tanto, las necesidades de movilidad son totalmente satisfechas por los automóviles privados.
- La falta de un sistema de transporte público adecuado: que refuerza la necesidad de utilizar el vehículo privado para satisfacer los desplazamientos de la población.

Este incremento de la motorización individual genera ineficiencias desde el punto de vista de la distribución urbana ya que se traduce en mayor número de vehículos en las carreteras y viales de las ciudades.

Por otro lado, el comercio electrónico refuerza la tendencia general en la logística hacia envíos más pequeños, pedidos únicos y, por lo tanto, mayor frecuencia de entrega. Los nuevos

hábitos de consumo y los niveles de servicio que llevan aparejadas las compras *online* influyen directamente en la logística urbana, siendo el proceso de entrega un aspecto diferenciador y crítico en la última milla. Además, aparecen otras ineficiencias relacionadas con la demanda derivada del *e-commerce*:

- Logística inversa: alta tasa de devoluciones de pedidos, retornos y cambios, sobre todo en *e-commerce* (Melacini *et al.*, 2018).
- Alta tasa de entregas fallidas en domicilio y entregas repetidas (Visser *et al.*, 2014).
- Cumplimiento de pedidos complejos asociados a la venta minorista *online* (por ejemplo, en la venta minorista de alimentación) (Hübner, 2016).
- Posibilidad de una mayor distancia de transporte debido a las compras *online*, lo que permite que los productos se obtengan desde cualquier parte del mundo (Castillo *et al.*, 2018).

### **1.7. Evolución del comercio minorista e implicaciones en la logística de la ciudad**

La logística del sector minorista ha experimentado una notable evolución en las últimas décadas, siendo la globalización y el comercio electrónico los factores que provocan los impactos más significativos. La pandemia de la covid-19 ha supuesto un catalizador extraordinario en el consumo *online* y ha cambiado la forma de consumir de muchos usuarios. Esta evolución ha implicado nuevas y más efectivas formas de distribución que afectan directamente a la logística de la ciudad. Siguiendo lo expuesto por Jones Lang Lassalle (2013), la evolución de la logística urbana puede resumirse en cuatro fases:

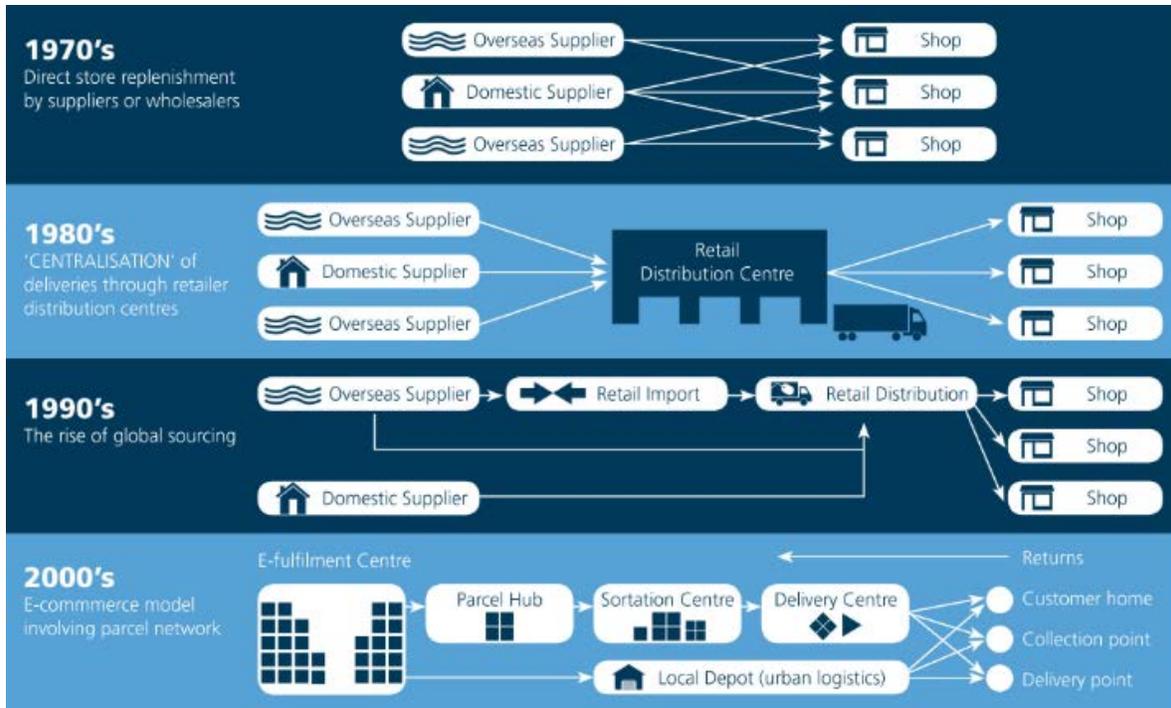


Figura 13. Evolución de la logística del comercio minorista

Fuente: Jones Lang Lassalle (2013)

- Reposición directa (años setenta). Hasta la década de 1970, la mayor parte del aprovisionamiento se gestionaba a nivel nacional y se realizaba un suministro directamente por proveedores (fabricantes) o por mayoristas especializados en categorías específicas de productos minoristas (por ejemplo, juguetes, textil, zapatos, etc.). Dentro del ámbito urbano, estos proveedores tenían sus propios almacenes que abastecían directamente a los clientes que tenían en la ciudad. Cada tienda también mantenía su propio inventario y ordenaba directamente a sus proveedores, muchos de ellos dentro de la región. El material importado, aunque existía, representaba una pequeña parte de las ventas minoristas, generalmente de bienes especializados o de lujo.
- Centralización (años ochenta). Durante la década de 1980, la aparición y expansión de grandes cadenas minoristas incitó a la racionalización de la logística, donde muchos minoristas construyeron centros de distribución en áreas periféricas a la ciudad. Actuaron como instalaciones de recepción y almacenamiento de distintos proveedores y expedición a varias tiendas, a menudo dentro de la misma región. Desde estos centros de distribución regionales realizaban el transporte directamente a los comercios situados en la ciudad.
- Aprovisionamiento global (años noventa). La subcontratación y la deslocalización ampliaron el alcance espacial de las estrategias de aprovisionamiento, que implicaron un número creciente de proveedores en el extranjero y transporte de larga distancia.

A medida que una parte importante de las importaciones minoristas se convirtió en contenedores, se añadieron centros de importación cercanos a las instalaciones portuarias. Estos centros de importación organizaban envíos para distribución nacional a través de los centros de distribución regionales, que seguían entregando mercancía a distintas tiendas dentro del ámbito urbano.

- Comercio electrónico (años 2000). El crecimiento de las ventas minoristas basadas en la web desencadenó el desarrollo de nuevas estructuras logísticas que afectaban a la ciudad. Dado que la mayoría de las compras *online* se envían en paquetes, esta estructura de distribución originó los centros logísticos (*e-fulfilment*), que son grandes instalaciones que preparan pedidos individuales que se envían a través de empresas de paquetería. Posteriormente, los paquetes se trasladan a centros que consolidan envíos o a centros de clasificación que organizan los envíos por sus destinos regionales/locales. De este modo, los centros de clasificación realizan el envío de paquetes a un centro de entrega donde se colocarán en rutas locales específicas que posteriormente realizan la entrega definitiva. En grandes áreas urbanizadas, los almacenes locales también se pueden usar para realizar entregas urbanas utilizando vehículos comerciales pequeños. El destino final puede ser tanto el domicilio del cliente, como un punto de recogida o un punto de entrega distinto al hogar del consumidor.

De forma resumida y dentro del ámbito de los servicios logísticos, se señalan a continuación las principales diferencias entre la venta tradicional minorista y la venta *online* basada en el modelo de comercio electrónico iniciado en el año 2000.

Tabla 1. Diferencias logísticas entre comercio tradicional y comercio *online*

Comercio tradicional	Características	Comercio <i>online</i>
A granel, grandes volúmenes	Tipología, cantidad	Pequeños paquetes
Pocos	Destinos	Numerosos, dispersos
<i>Push</i>	Tipos de demanda	<i>Pull</i>
Estable, consistente	Naturaleza demanda	Estacional, fragmentada
Grande > 1000 USD	Coste de envío	Pequeño (50 USD)
Cliente repetido, no muchos	Clientes	Desconocido B2C, muchos
Generalmente unidireccional, desde el fabricante	Flujo de pedidos	Generalmente bidireccional
Con frecuencia por la empresa, a veces subcontratado	Transporte	Generalmente subcontratado
Propio	Almacenaje	Solo unos pocos gestionan su propio almacén

Fuente: adaptado de Turban *et al.* (2018)

En la actualidad, una quinta fase se está desarrollando dentro del periodo del comercio electrónico y afecta a la logística de la ciudad. Es la conocida *cadena de suministro centrada en el cliente* (*customer-centric supply chains*) que comienza por la demanda del cliente y funciona hacia atrás. Poner a los clientes en primer lugar implica comprender previamente sus preferencias en detalle y ofrecer una buena experiencia, que incluye una amplia selección, precios competitivos, un proceso de compra adecuado y fiabilidad en la entrega (Frazier, 2016). La adaptación a la ola de cambios tecnológicos, las entregas ultrarrápidas, la sensibilidad de las nuevas generaciones hacia el medioambiente y el bajo coste repercutido del transporte han llevado a los operadores logísticos a incrementar los puntos y la frecuencia de entregas, a disponer de almacenes urbanos y al empleo de la economía colaborativa para poder atender los niveles de servicio requeridos por sus clientes.

Dentro de este contexto, el denominado *q-commerce* o comercio rápido aparece como un nuevo modelo dentro del comercio electrónico donde prima la velocidad, la conveniencia y la atención al cliente. Los usuarios valoran la entrega rápida, poder escoger entre distintas formas de entrega y estar informados de la situación de sus pedidos en todo momento. Con respecto a la evolución que ha experimentado el comercio en las ciudades, en la figura 14 se muestran las características principales de las diferentes generaciones del comercio B2C. Se añaden cuatro nuevas características relacionadas con la distribución urbana a las ya establecidas por Delivery Hero (2020).

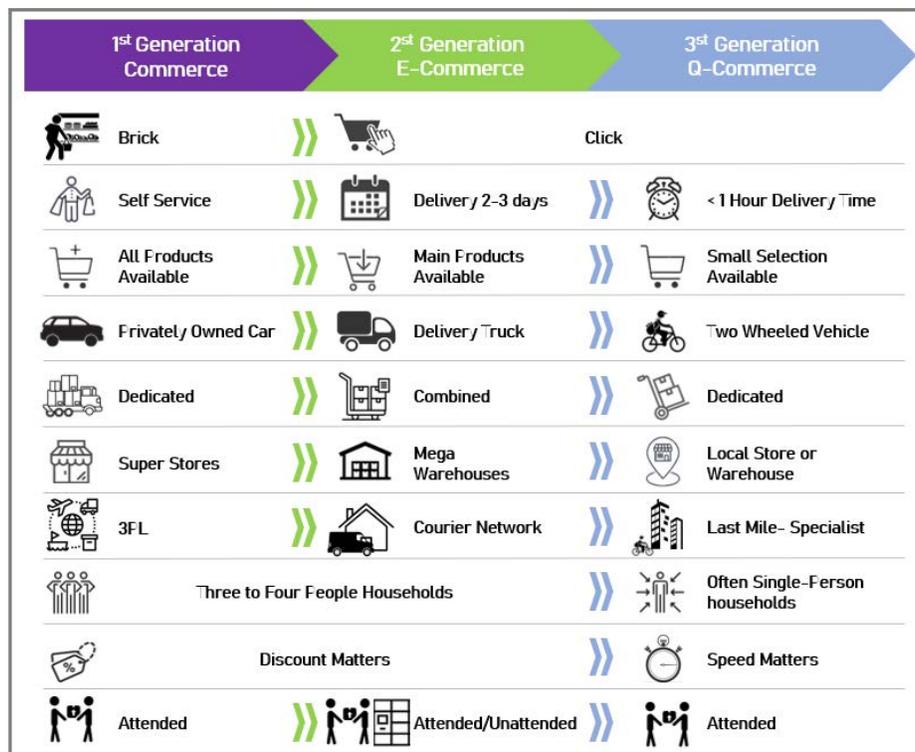


Figura 14. La evolución del comercio rápido  
 Fuente: adaptado de Delivery Hero (2020)

El *q-commerce* acentúa las dificultades que ya presenta la distribución urbana del comercio electrónico: volúmenes pequeños, más direcciones de entrega, frecuencias de reabastecimiento más altas, niveles de inventario más bajos, baja optimización de la carga en los vehículos y entregas justo a tiempo (Lebeau y Macharis, 2014). Todos estos hechos suponen una dependencia creciente de las carreteras urbanas y una necesidad de encontrar soluciones para la logística de la ciudad.

Dentro de estas soluciones, se encuentran los denominados *dark stores*, que son centros de almacenamiento-reparto para el *e-commerce* utilizados principalmente en el ámbito alimentario. Son almacenes (no muy grandes) dotados con estanterías convencionales o lineales como los que tienen los supermercados para posteriormente preparar los pedidos realizados en el ámbito urbano. No se suelen identificar desde el exterior (de ahí la denominación de *dark*) y se sitúan cerca de los núcleos de potenciales clientes (multiclientes). Para poder hacer frente al gran incremento de ventas *online*, las grandes cadenas alimentarias están implantando estos modelos logísticos en las grandes ciudades (Morgan, 2020; Halkias, 2021; Blázquez, 2021; Tobar, 2021).

Por tanto, el comercio electrónico de bienes físicos y el proceso logístico de entregas están estrechamente relacionados ya que, en la actualidad, es casi imposible entender el uno sin el otro. La figura 15 ilustra la interrelación entre las diferentes operaciones que se solapan en la actividad del comercio electrónico y las entregas.

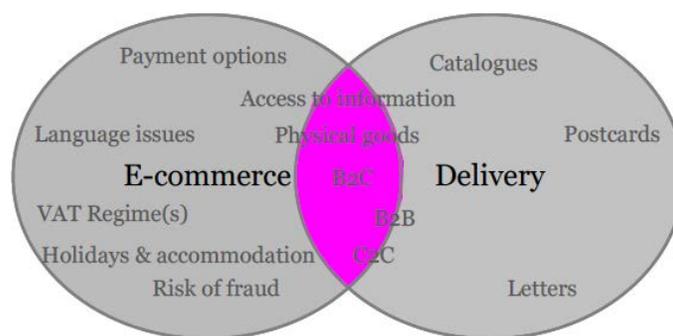


Figura 15. *E-commerce* y entrega  
Fuente: Copenhagen Economics (2013)

El círculo izquierdo incluye ventas *online*: B2B (*business-to-business*), B2C (*business-to-consumer*), C2C (*consumer-to-consumer*), tanto de bienes físicos (más habituales) como de servicios (más puntuales), como pueden ser las compras de vacaciones o el alojamiento. Además, hay que tener en cuenta el amplio espectro de factores que afectan a la disposición de compradores y vendedores a participar en el comercio electrónico (opciones de pago, problemas de idioma, acceso a la información, etc.).

El círculo derecho incluye todos los tipos de entrega de productos físicos, por ejemplo, cartas, catálogos, bienes físicos, etc. Para la entrega exclusiva a hogares e individuos (comercio

electrónico x2C), Eurostat (2019b) la define como: «la realización de pedidos de bienes o servicios a través de Internet. Esta venta de bienes requiere entrega física al comprador, excluyendo pedidos a través de correos electrónicos escritos manualmente».

Por tanto, se considera logística B2C en la última milla «el tramo final en un servicio de entrega de empresa a consumidor mediante el cual el envío se entrega al destinatario, ya sea en casa del destinatario o en un punto de recogida» (Gevaers *et al.*, 2009).

La presente memoria de tesis doctoral se ha desarrollado con un enfoque concreto centrado en el comercio electrónico del tipo B2C que involucra la distribución de bienes físicos al consumidor final a través de un servicio de entrega, es decir, la intersección de los dos círculos presentados en la figura 15.

# Capítulo 2. Comercio electrónico y logística urbana

---

## 2.1. Definición, características y cifras

Eurostat (2019b) define el comercio electrónico como «el proceso de compra o venta de bienes o servicios, ya sea entre empresas, hogares, individuos u organizaciones privadas, a través de transacciones electrónicas realizadas a través de Internet u otras redes o herramientas de comunicación *online*». En esta definición se incluyen también las compras realizadas con dispositivos móviles como los *smartphones* o teléfonos inteligentes (el denominado *mobile commerce* o *m-commerce*).

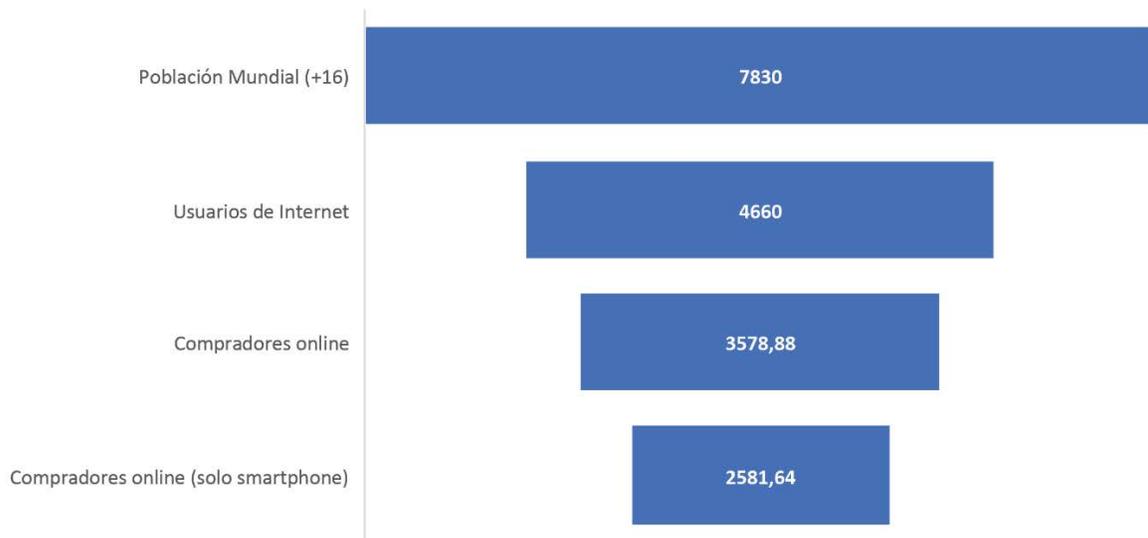
Atendiendo a los servicios y bienes comercializados, el comercio electrónico B2C orientado al consumidor final puede clasificarse en dos grupos (Shukla y Raval, 2018):

- a) Servicios electrónicos (*e-services*): aquí se incluyen los servicios de comercio electrónico como la reserva de billetes de avión, la banca por Internet, los portales de música, las redes sociales, las plataformas para buscar amigos/pareja, etc. Estos servicios no tienen un impacto relevante en el transporte urbano.
- b) Comercio electrónico minorista (*e-retailer*): este es el segmento de comercio electrónico de más rápido crecimiento. Básicamente se trata de las transacciones de vendedores y compradores *online* e incluye superar los límites físicos para entregar los bienes y servicios a los consumidores. Esto incluye compras *online* de productos electrónicos, moda, etc., y varias opciones de entrega de alimentos. Dentro del grupo de comercio minorista *online*, se puede diferenciar entre los *e-tailers* o *pure players* (Amazon, Ebay, Zalando, etc.) y los grandes gigantes de la distribución física (minoristas multicanal) que venden por Internet y que han lanzado y desarrollado servicios *online* para ganar una participación en el mercado minorista electrónico (Walmart, Inditex, Carrefour, Auchan, El Corte Inglés, etc.).

Entre los beneficios más importantes del comercio electrónico, percibidos desde la perspectiva del cliente, cabe mencionar (Chiu *et al.*, 2014):

- Disponibilidad 24/7.
- Entrega a domicilio, no existe necesidad de desplazarse a la tienda.
- Facilidad para comparar ofertas.
- Precios atractivos.
- Facilidad de encontrar productos especializados.
- Abundante información sobre productos y características.
- Surtido más numeroso que en tiendas tradicionales.
- Posibilidad de devolver cualquier compra realizada «a distancia».

En el informe elaborado por We Are Social (2021), se muestra como la población mundial ascendió a los 7830 millones en enero de 2021, de los cuales 4660 millones utilizaron Internet alguna vez, lo que supone una penetración del 59,1 % a nivel global. Dentro del grupo de internautas, el 76,8 % realizó alguna compra en el mes anterior a la fecha de realización de la encuesta (enero de 2021). La figura 16 muestra un resumen de los resultados de este estudio, detallando el volumen de compras realizadas desde el dispositivo *smartphone*.



**Figura 16.** Población, uso de Internet y *e-commerce*  
Fuente: elaboración propia a partir de We are social (2021)

La figura 17 muestra la evolución de las ventas minoristas de comercio electrónico en todo el mundo, desde 2014 hasta 2024 (2021-2024 se corresponde con una previsión, según Clement, 2021). Los resultados recogidos en el gráfico incluyen productos o servicios realizados a través de Internet o a través de cualquier dispositivo, independientemente del método de pago, y excluyendo billetes de avión o *tickets* de eventos.

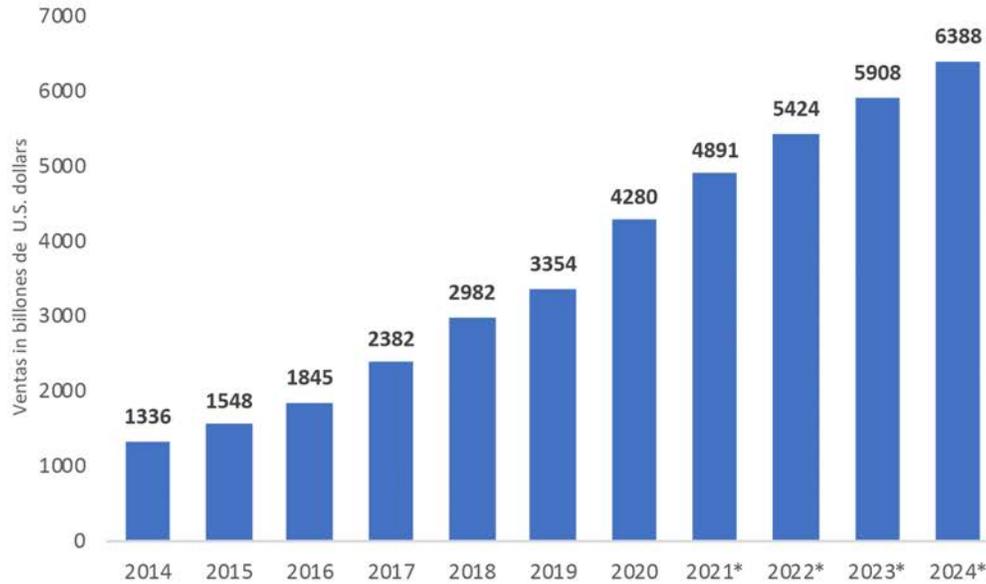


Figura 17. Venta de comercio minorista en el mundo 2014-2024

Fuente: elaboración propia a partir de Sabanoglu (2021)

La serie histórica presenta crecimientos interanuales de dos dígitos en todos los años. Si se toma como referencia el año 2014, en el año 2020 se triplicó ( $\times 3,2$ ) el volumen de comercio electrónico y en 2024 se espera que sea 5 veces mayor. El punto de inflexión en esta tendencia de crecimiento del *e-commerce* a nivel mundial ha sido la pandemia de la covid-19, que ha reescrito las reglas del sector minorista. Entre enero de 2019 y junio de 2020, las plataformas minoristas experimentaron un aumento extraordinario en el tráfico global. Los sitios web de las empresas minoristas recibieron casi 22 mil millones de visitas en junio de 2020, lo que representó un incremento interanual del 35,5 % (Mazareanu, 2020). En Estados Unidos, la participación del comercio electrónico en las ventas minoristas totales aumentó del 11,8 al 16,1 % entre el primer y el segundo trimestre y del 20,3 al 31,3 % en Reino Unido. En la UE-27, si comparamos los meses de abril de 2019 y de 2020, las ventas minoristas *online* aumentaron un 30 %, mientras que las ventas minoristas totales disminuyeron un 17,9 % (OECD, 2020a) para el mismo periodo. Las razones se centran, por el lado de la demanda, en las medidas de bloqueo (confinamiento y movilidad restringida) que llevaron a nuevos consumidores a probar el canal *online* para evitar las tiendas físicas más concurridas y en el aumento de la frecuencia de compra de los clientes que ya realizaban con anterioridad transacciones *online*; y por el lado de la oferta, los minoristas con presencia en el *e-commerce* aumentaron su oferta de productos y, además, aparecieron nuevos actores que se incorporaron al comercio electrónico, ya que, para numerosos negocios que aún no tenían presencia *online*, se convirtió en la única opción viable durante la pandemia.

Sin embargo, el efecto de la crisis de la covid-19 sobre el comercio electrónico no ha sido uniforme en todas las categorías de productos o vendedores. Si bien el impacto de la covid-19

en varias categorías ha sido considerable, ha tenido un impacto mucho menor en otros productos. Los artículos relacionados con la alimentación, la moda, la electrónica, la belleza y el hogar fueron los productos más vendidos, mientras que otros, como el turismo y las aerolíneas, se derrumbaron (OECD, 2020b). En el caso de España, si se comparan los dos primeros trimestres de los años 2019 (pre-covid-19) y 2020 (covid-19), la figura 18 muestra el crecimiento de los productos que requieren entrega física (*e-retailers*) y el descenso de los servicios comprados *online* (*e-services*).

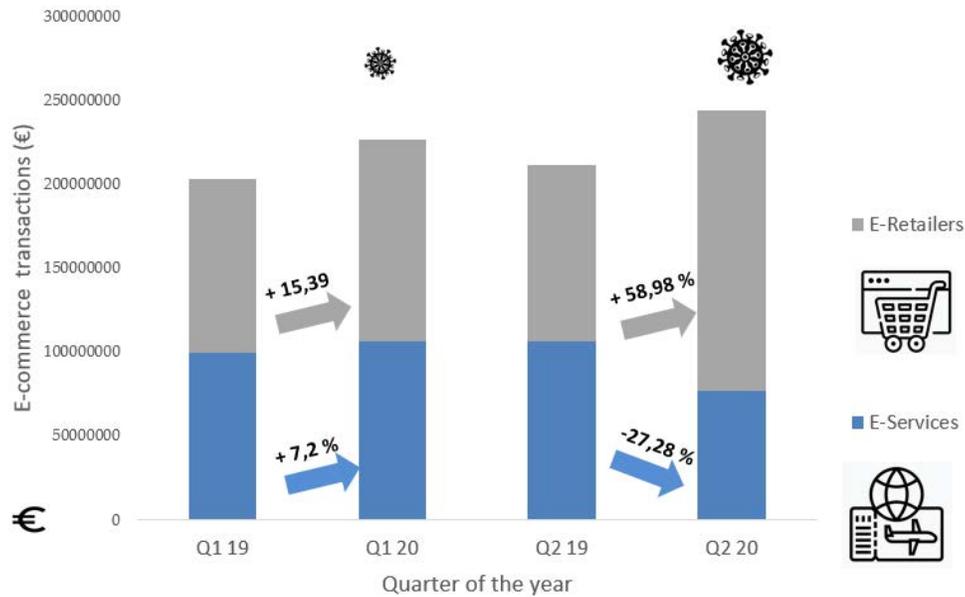


Figura 18. Transacciones de *e-commerce* en 2019-2020 (Q1=primer trimestre y Q2= segundo trimestre)  
Fuente: elaboración propia a partir de CNMC (2020)

Centrándonos exclusivamente en los *e-retailers*, el incremento de transacciones alcanzó el 15,38 % durante el primer trimestre de 2020 (los últimos 15 días de este periodo corresponden al estado de alarma decretado por el Gobierno de España el 14 de marzo). Por el contrario, al comparar el segundo trimestre de ambos años, el aumento de los bienes físicos adquiridos a través del comercio electrónico alcanzó el 58,98 % durante la primera ola de la pandemia. Las compras en hipermercados y supermercados se duplicaron y las compras de bebidas, electrodomésticos y equipos audiovisuales se triplicaron. La tabla 2 muestra las 10 categorías de productos más populares durante la pandemia y su evolución a lo largo del periodo 2014-2020 (segundo semestre).

Tabla 2. 10 principales categorías de productos de *e-commerce* con las tasas de crecimiento más altas

Activity	2014-2020 (Q2)	YOY Growth Rate (Q2: 2019-2020)
Furniture, lighting and home		318 %
Home appliances, visual and audio products		310 %
Beverages		291 %
Toys and sport items		247 %
Hardware, paints and glass		244 %
Other non-specialized trade		243 %
Perfumery, cosmetics		224 %
Medical and orthopedic items		218 %
Hypermarkets, supermarkets and food shops		213 %
Body maintenance		203 %

Fuente: elaboración propia a partir de CNMC (2020)

Según el Observatorio Nacional de las Telecomunicaciones y Sistemas de Información (ONTSI, 2020), 7 de cada 10 compradores *online* realizaba la compra de forma mensual o trimestral (pre-covid-19). Durante el periodo de la pandemia, las compras mensuales o semanales han sido la opción más frecuente para el 69,4 % de los compradores. Sobre los efectos del confinamiento en los hábitos de consumo *online*, 4 de cada 10 consumidores piensan modificar su manera de comprar a través del comercio electrónico en el futuro, incrementando las compras *online*.

En este sentido, es poco probable que las adaptaciones de los consumidores a las compras *online*, aceleradas por la pandemia, terminen o se reduzcan después de que pase la covid-19. Estudios anteriores a la pandemia (Rangaswamy y Gupta, 2000; Wolfinbarger y Gilly, 2001) muestran que las dos motivaciones principales para comprar en tiendas físicas en lugar de comprar *online* son las posesiones inmediatas y las interacciones sociales. A estas motivaciones se les une una barrera importante para potenciar el *e-commerce*, como es el coste de aprendizaje del nuevo canal. En la realidad poscovid-19, tanto la posesión (casi) inmediata como el coste de aprendizaje ya no serán un obstáculo para que los compradores hagan sus pedidos *online*.

Además, existen otros factores que, probablemente, desempeñen un papel importante en el crecimiento futuro de las compras *online*, y tienen en cuenta que (Allen *et al.*, 2018):

- a) Las personas mayores se convertirán en compradores *online* más habituales.
- b) Los jóvenes que han crecido con Internet utilizándolo de forma cotidiana serán actores principales en las compras *online*.

- c) El cierre de tiendas físicas que no pueden competir con los nuevos negocios digitales.
- d) El aumento de las tasas de penetración de las compras *online* en el sector de la alimentación.
- e) El uso creciente de teléfonos móviles (*smartphones*) hará que comprar sea muy fácil y cómodo.

De esta forma, el comercio electrónico es y será el principal motor de crecimiento en los volúmenes de paquetes entregados en el entorno urbano, afectando de forma decisiva no solo a la gestión de la última milla sino a la distribución urbana de mercancías y, por extensión, a toda la logística de la ciudad.

## **2.2. La entrega en el e-commerce (i): elemento clave de éxito**

Las cadenas de suministro evolucionan con bastante rapidez, adaptando sus especificaciones de servicio a los cambios constantes en los requisitos de los consumidores y clientes, al tiempo que aprovechan las oportunidades para mejorar la eficiencia que ofrecen las nuevas tecnologías. Para optimizar completamente la eficiencia de la mayoría de las cadenas de suministro, se debe tener una mejor visión de la entrega final de bienes que se realiza en entornos urbanos.

En este apartado, para clarificar la clave del éxito del comercio electrónico, resulta adecuado formular la siguiente cuestión: ¿por qué las empresas dan tanta importancia a los aspectos relacionados con las entregas en el comercio electrónico?

Aunque influyen diferentes aspectos, una de las respuestas la podemos encontrar en el modelo *service-profit chain* (Heskett, 2008), donde se muestra cómo el valor del servicio percibido por el cliente influye en el beneficio (véase la figura 19). Aquí juegan un papel importante diferentes aspectos, como las relaciones entre rentabilidad, lealtad del cliente, satisfacción del cliente y valor percibido del servicio recibido. De forma resumida y tomando la parte final de la cadena, el valor percibido impulsa la satisfacción del cliente, la satisfacción del cliente impulsa la lealtad del cliente y la lealtad del cliente impulsa los beneficios y el crecimiento.



Figura 19. Modelo service-profit-chain

Fuente: Heskett (2008)

Para los clientes, el concepto valor relaciona los resultados que reciben en función de los costes totales que soportan (tanto el precio como otros costes incurridos en la adquisición del servicio). Una empresa que ofrezca (o el cliente perciba) un alto valor del servicio de una entrega en una transacción de comercio electrónico produce satisfacción al cliente dentro del proceso de compra en general y, además, tiene un efecto directo en su lealtad y permanencia, lo que finalmente generará mayor consumo y, por extensión, aumentará los beneficios a las empresas.

### 2.2.1. Lugar de entrega de los productos en el comercio electrónico

Poniendo el foco en el lugar de entrega de bienes en el comercio electrónico y en la participación de los diferentes actores en el proceso (clientes, vendedores o intermediarios), existen tres modelos de cadena de suministro para la entrega en la distribución de última milla (Lim *et al.*, 2018):

1. *Sistema de envío push*: alguien diferente al vendedor, generalmente un operador logístico, entrega la mercancía en la dirección indicada por el cliente. Desde el punto de partida, que podría ser el fabricante, el minorista o las tiendas físicas, es responsabilidad de los vendedores cumplir con todo el proceso de entrega. Este sistema es frecuente, por ejemplo, en la compra de ropa a través de una web, en la que el vendedor se encarga de entregar en el domicilio del cliente.
2. *Sistema de envío pull*: a diferencia del sistema *push*, los clientes recogen la mercancía de los puntos de venta. Los clientes tienen todas las responsabilidades desde la recogida hasta la entrega del pedido en el último punto deseado. Como ejemplo, tendríamos un pedido de ropa que el cliente realiza *online* y el mismo cliente lo recoge en una tienda.
3. *Sistema de envío híbrido*: la mercancía se envía a un lugar intermedio desde donde los clientes la recogen. Este sistema requiere la participación del cliente y del vendedor

para cumplir con el proceso de entrega. A modo de ejemplo, podríamos considerar un pedido de ropa que el cliente realiza *online* y lo recoge en una taquilla inteligente. En este caso, una parte del transporte corre por cuenta del vendedor y la otra la asume el propio cliente.

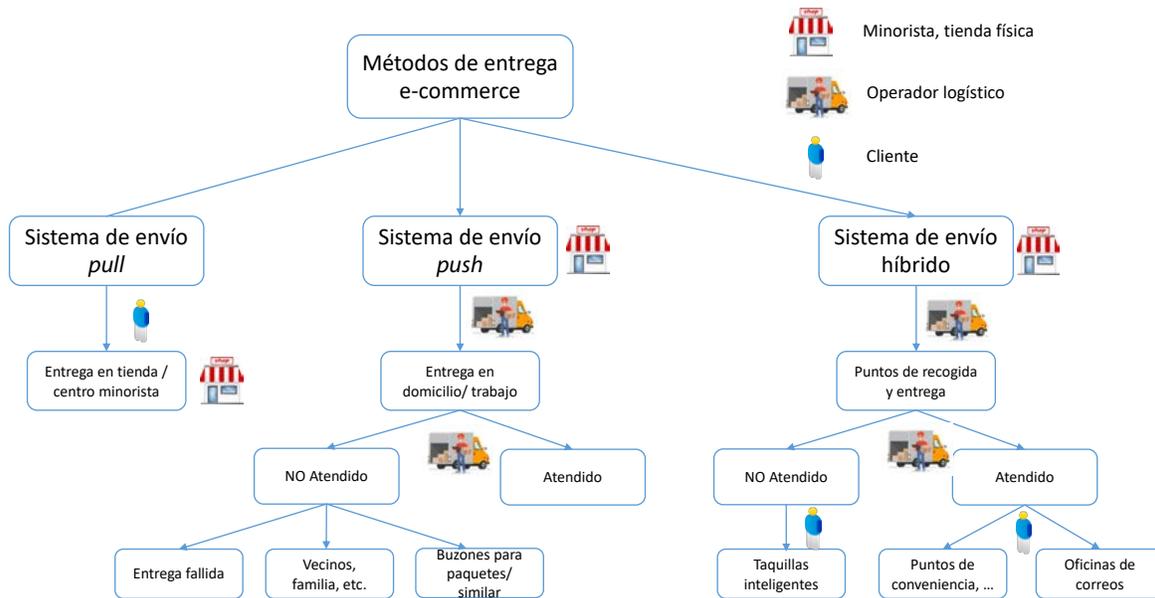


Figura 20. Modelos de entrega de e-commerce en la última milla  
Fuente: elaboración propia

### 2.2.2. Elementos que intervienen en el proceso de entrega en el comercio electrónico

El comercio electrónico ha cambiado el proceso convencional de cómo se transportan los productos del vendedor al cliente. Los productos comprados *online* son entregados por operadores de transporte de comercio electrónico, a través de diferentes esquemas logísticos (entrega a domicilio, puntos de recogida, etc.).

Definir qué factores influyen en el proceso de entrega de la última milla ha sido una cuestión ampliamente explorada en la literatura (Boyer *et al.*, 2004; Allen *et al.*, 2007; Gevaers *et al.*, 2014; Hayashi y Nemoto, 2014). Winkenbach y Janjevic (2018) agruparon estas variables en cinco categorías: pedido y lugar del pago, almacenamiento y preparación de pedidos, servicio al cliente, distribución urbana y entrega del producto. Tanto las categorías como las variables se muestran en la figura 21:

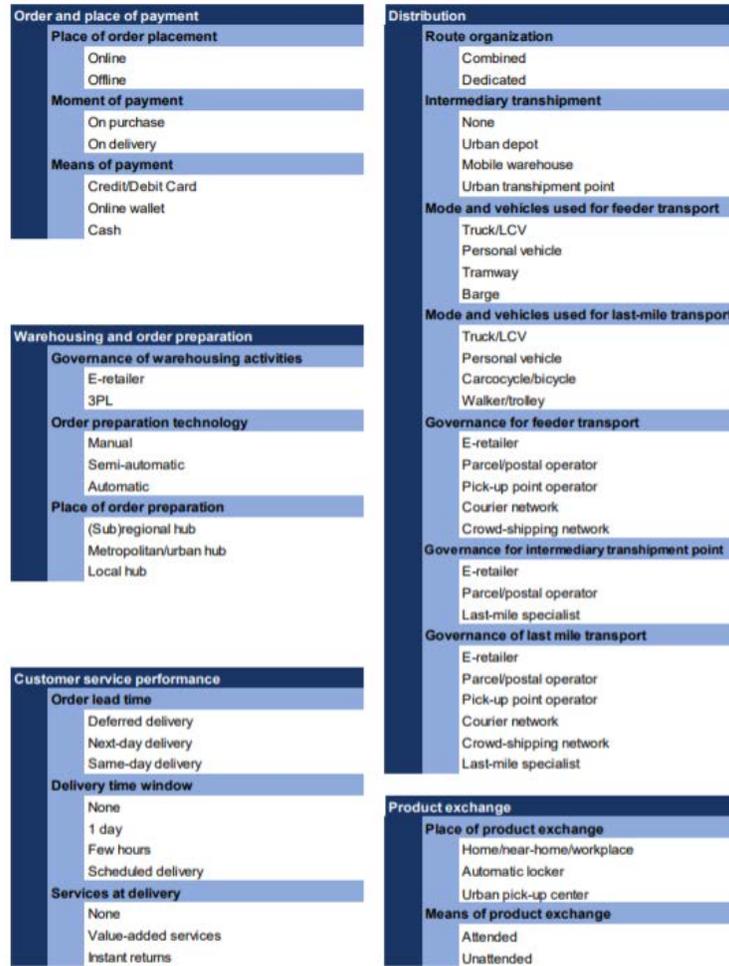


Figura 21. Factores que influyen en el proceso de última milla

Fuente: Winkenbach y Janjevic (2018)

Por ejemplo, dentro de la categoría de almacenamiento y preparación de pedidos, se tienen en cuenta tres variables. La primera está relacionada con la gestión de las actividades de almacenamiento, que a su vez se pueden llevar a cabo a través de un *e-retailer* o a través de un operador que provee las funciones logísticas (3PL). Con respecto a la tecnología de preparación de pedidos, podemos tener una preparación manual (personas), semiautomática (personas y máquinas) o automática (solo máquinas). Por último, el lugar donde se prepara el pedido puede ser un almacén regional, un almacén urbano/metropolitano o un almacén local. Todas estas variables condicionan la forma en que las empresas entregan sus productos en la última milla.

### 2.2.3. Rol crítico de la entrega en el comercio electrónico: factores de éxito

Tradicionalmente, debido a la falta de recursos, de conocimiento del mercado local o por cuestiones de coste, la entrega de la última milla se ha subcontratado a empresas especializadas (empresas de correos, empresas de paquetería, etc.), haciendo que, en cierto grado, se perdiera el control directo de las operaciones físicas de las entregas. El cambio en las tendencias del consumidor hacia el comercio electrónico, así como la demanda actual de mejores condiciones ambientales en las ciudades, insta a profundizar en esta última parte de la cadena de suministro, tratando de encontrar nuevas formas de mejorar la eficiencia en un contexto donde las regulaciones locales también tienen una gran influencia en los resultados (ALICE: (<https://www.etp-logistics.eu>)).

En la era digital actual, es en esta última milla donde se establecen o se rompen las relaciones con los consumidores. Una de las claves del éxito de una empresa como Amazon radica en que participa en todas las actividades de la cadena de valor. Amazon también controla cuándo llega el paquete, que es un momento clave para el cliente y, por tanto, le permite construir una base de clientes fieles. Durante el proceso de la compra *online*, los consumidores tienden a no diferenciar entre el papel del distribuidor y el papel del transportista. Los errores cometidos por el transportista se atribuyen al minorista. Las revisiones de productos en Amazon, por ejemplo, a menudo contienen comentarios sobre la entrega, tanto positivos como negativos.

Las distintas opciones y alternativas de entrega son muy bien valoradas por parte de los clientes y, en consecuencia, tienen un impacto positivo en las ventas. Del otro lado de la cadena de suministro, los minoristas perciben los servicios de entrega como una oportunidad para proporcionar beneficios adicionales a sus clientes. Su objetivo es aumentar la fidelidad del cliente, incrementar la cuantía de cada compra, mejorar la percepción de marca del minorista y, finalmente, aumentar la frecuencia de compra (Lukic *et al.*, 2013).

Los principales actores en el comercio electrónico ponen gran atención en el envío, considerándolo como el único elemento tangible dentro de un proceso digital para el cliente. Los consumidores evalúan a una empresa en función de su experiencia de compra de principio a fin: teniendo en cuenta, no solo el sitio web del minorista y la tienda *online*, sino también la comunicación que se produce por correo electrónico, las diversas opciones de entrega y el servicio real recibido. En resumen, la última milla es crítica para la evaluación general del consumidor del proceso de compra *online* (Xu *et al.*, 2008).

#### **Factores de éxito en la entrega para los clientes de e-commerce**

A continuación, se describen los criterios más importantes que, desde la perspectiva de los clientes de *e-commerce*, deben cumplirse para que estén satisfechos con una entrega. Los actuales servicios de entrega deben tener una propuesta de valor convincente porque los consumidores han desarrollado una «multitud de nuevas exigencias» (Capgemini, 2016). Los clientes que utilizan el

comercio electrónico son más exigentes, están mejor informados, son más digitales y son usuarios más comprometidos.

De igual forma, las expectativas de los consumidores en las compras *online* continúan aumentando, particularmente cuando se trata de envíos realizados mediante comercio electrónico. Seguramente, Amazon ha actuado como catalizador en esta área. El término «efecto Amazon» se refiere a la dificultad a que se enfrentan muchas tiendas (en especial las tiendas físicas) para competir con Amazon. La gran selección de artículos que ofrece Amazon, sumada a sus envíos rápidos, devoluciones gratuitas, bajos costes y suscripciones Prime han elevado las expectativas de los clientes, tanto que ningún otro vendedor puede competir con estos requisitos. Dicho de forma más general, los consumidores se acostumbran a una experiencia de compra con altos estándares, pero no están dispuestos a pagar por ellos (Deloitte, 2018).

La lista de factores críticos de éxito varía en función de las fuentes consultadas. Los siguientes cinco factores prevalecen en la literatura y tienden a obtener puntuaciones más altas en las clasificaciones de importancia para el cliente. Estos son: coste, alternativas de elección, comodidad, velocidad y flexibilidad. La naturaleza heterogénea de las fuentes consultadas no permite concluir en una clasificación unánime. A continuación, se comentan cada uno de ellos.

### 1. Coste

El coste puede ser la única excepción, ya que se enumera constantemente en primer lugar como el factor más importante en la experiencia de compra. La entrega gratuita y los precios bajos de los productos son más importantes para los consumidores que otros aspectos valorados, como pueden ser la entrega en el mismo día, el tiempo de entrega garantizado o el lugar de entrega (Lukic *et al.*, 2013). Cuando se pregunta explícitamente a los compradores *online* cuál de las dos opciones es más importante para ellos, envío gratuito o envío rápido, la respuesta es contundente: el 87 % prefiere el envío gratuito frente al 13 % que selecciona el envío rápido (Deloitte, 2018).

En cuanto a los costes de envío, se puede hacer una distinción interesante entre los minoristas pequeños y los grandes. Los minoristas más pequeños están transfiriendo todo o parte de su coste de envío a sus clientes porque están compitiendo con márgenes más reducidos y menos volumen. Cuanto más grande es el minorista, menos carga económica impone a sus clientes (Temando, 2017).

### 2. Alternativas de elección

La gran mayoría de las personas consumidoras de comercio electrónico considera importante disponer de muchas opciones para las entregas de sus productos. Los consumidores aprecian la elección de la ubicación de entrega, de los tiempos de entrega, de las velocidades de entrega y de otras alternativas adicionales.

En diversos estudios realizados, Accenture (2016) señala que más del 40 % de las personas consideran que las opciones de entrega alternativas son importantes o muy importantes para su

decisión de compra. Joerss *et al.* (2016) se hacen eco de esta situación y afirman que la variedad de opciones de entrega es un criterio de decisión importante para los clientes y que, por lo tanto, afecta directamente al éxito del minorista de comercio electrónico en el mercado.

De hecho, el 50 % de los clientes afirma que ha abandonado una compra *online* debido a que las opciones de entrega han resultado insatisfactorias (Graham, 2013). Los minoristas informan de que la oferta de más opciones de envío en la compra *online* ha generado un aumento en las ventas (según el 86 % de los encuestados), una reducción en el abandono del carrito (75 %) y una mejor capacidad de cumplimiento de las expectativas del cliente (86 %) (Temando, 2017).

Esta lista de opciones de envío debe cubrir la mayoría de las preferencias de los clientes y ayuda a convertir a más compradores en clientes.

### 3. Velocidad

La velocidad de entrega generalmente se refiere al tiempo transcurrido desde la finalización del pedido por parte del cliente hasta la entrega exitosa de un paquete. El cliente puede optar activamente (y pagar) por diferentes velocidades de entrega, por ejemplo, seleccionando la entrega el mismo día en lugar del envío estándar.

Como muestra la figura 22 (Capgemini Research Institute, 2019), si se les ofrecen opciones de entrega más rápidas, los consumidores serán más leales. Por ejemplo, en el estudio analizado, el 55 % de clientes manifiesta que una opción de entrega en dos horas aumentaría su fidelidad, mientras que el 19 % manifiesta la misma opinión para la opción de entrega en el mismo día de realización de la compra. Caso distinto se produce cuando la entrega se extiende a tres días o más, con solo el 30 % de clientes que incrementarían su lealtad a la marca.

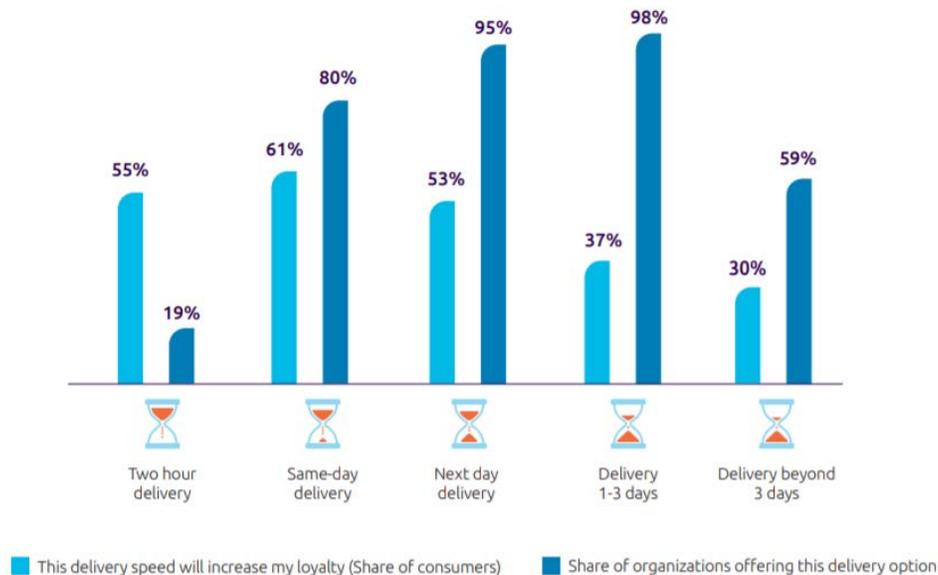


Figura 22. Opciones de entrega en *e-commerce* y fidelidad del consumidor

Fuente: Capgemini Research Institute (2019)

El tiempo de entrega elegido deja de cumplirse, por ejemplo, cuando falla un primer intento de entrega. Esto podría ocasionar un retraso de un día hasta el próximo intento de entrega. En caso de que el consumidor elija una ubicación de recogida, como un punto de conveniencia o una taquilla, la velocidad de entrega percibida es más lenta. Esto se debe a que la recogida por el cliente puede demorarse en función del tiempo que tarde este en llegar al punto de conveniencia.

En general, se debe distinguir entre dos momentos críticos en la entrega de la última milla: uno es la entrega exitosa de un paquete y el otro es la transferencia exitosa del paquete al destinatario. Estos dos momentos pueden ocurrir en el mismo momento, como en el caso de la entrega a domicilio atendida, pero en muchos otros casos no son coincidentes.

#### 4. Comodidad

La consideración de una cierta comodidad presenta diferentes aspectos. En principio, se refiere a todo lo que simplifica la vida del consumidor, le da más tiempo libre y combina con su estilo de vida ocupado. En el comercio electrónico, la comodidad es un aspecto clave que favorece la lealtad (Capgemini Research Institute, 2019). De hecho, para la mayoría de las personas, la comodidad es el factor motivador más importante para utilizar los servicios de compra *online* (Morganosky *et al.*, 2002). Los consumidores que pueden permitírselo optan por la comodidad por encima de otros factores.

Los ejemplos que ofrecen comodidad (al combinar la entrega con los estilos de vida de los consumidores) son: la entrega desatendida, la entrega en fin de semana, los plazos de entrega, las franjas horarias o la entrega dentro de 1-3 horas desde la realización de la compra. Estas opciones están ganando importancia y tienen el potencial de convertirse en elementos generadores de demanda (Temando, 2017).

#### 5. Flexibilidad

Con respecto a la entrega de la última milla, se pueden distinguir dos dimensiones de flexibilidad (DHL, 2016):

- (i) En primer lugar, flexibilidad como «libre elección del destino de entrega». Hoy en día, la cantidad de destinos de entrega a los que un consumidor puede dirigir su envío es muy variada. Más allá de la entrega tradicional a domicilio, un consumidor puede elegir entre una docena de ubicaciones alternativas (oficinas de paquetería, puntos de conveniencia, oficinas de correos, taquillas, etc.). Sin embargo, no solo el número de alternativas existentes continúa creciendo, sino que las empresas de logística trabajan para introducir nuevas alternativas de entrega a clientes. El concepto subyacente de todas las alternativas mencionadas es, por supuesto, la entrega desatendida, lo que resulta inequívocamente en el mayor aumento de la flexibilidad.

- (ii) En segundo lugar, flexibilidad como «cambio de entrega a corto plazo». Por ejemplo, si una reunión de trabajo se retrasa más de lo esperado, el consumidor puede solicitar que el paquete se envíe a su oficina, en lugar de a su hogar. El 65 % de los consumidores a nivel mundial considera que la capacidad de cambiar las instrucciones de entrega es un factor importante al seleccionar una empresa de entrega (Accenture, 2016). Es decir, la posibilidad de realizar cambios en su envío mientras las mercancías están en tránsito es un elemento altamente valorado.

El grado de flexibilidad se basa en el sistema de entrega del proveedor. Si es posible responder a las necesidades especiales del cliente, o a que este introduzca modificaciones durante el proceso de entrega, el grado de flexibilidad se considera elevado.

Otros factores que también influyen en la elección de los clientes de *e-commerce* son:

- Devoluciones: los consumidores desean poder realizar devoluciones fáciles y que se les permita entregar paquetes de devolución a través de varios canales, incluidos canales diferentes al que usaron para recibir el paquete (Deloitte, 2018). Aunque existen minoristas que permiten la devolución a domicilio, el enfoque más generalizado para la gestión de devoluciones es que sea el propio consumidor quien realice esta operación, haciendo uso de una oficina de correos o de cualquier otra oficina de paquetería. Por supuesto, esta no es la forma más popular entre los clientes. La gestión de devoluciones es muy importante para los consumidores, ya que el artículo más comprado *online* es la ropa, seguida en segundo y tercer lugar por artículos electrónicos y libros. La mayoría de los consumidores de hoy en día están acostumbrados a devoluciones sin coste. Esto significa que es el minorista el que corre con un gasto extraordinario que, sin duda, reduce sus beneficios o que puede llegar a producir pérdidas. Los minoristas especialmente grandes, por ejemplo, Amazon, Zalando o ASOS, pueden llegar a ofrecer devoluciones gratuitas.
- Seguimiento (*tracking*): la demanda de transparencia en las operaciones ha aumentado con la dispersión de Internet y el comercio electrónico. Los consumidores esperan estar informados desde el momento que realizan un pedido hasta que la propiedad se transfiera al destinatario (Temando, 2017). Actualmente, todos los transportistas ofrecen el servicio de seguimiento de paquetes, algunos incluso llegan a mostrar la posición geográfica en tiempo real del vehículo de reparto en un mapa. El seguimiento tiene muchas facetas y, entre otras, los consumidores demandan:
  - Visibilidad de la fecha de entrega esperada e idealmente el tiempo de entrega.

- Comunicación por correo electrónico/texto/SMS durante todo el proceso de envío.
- Fácil seguimiento del estado y el paradero de su entrega *online* y a través de sus dispositivos móviles.
- Notificación cuando se entregó el paquete (taquilla, tienda, vecino, etc.).
- Condiciones de entrega: la condición de entrega de un paquete pertenece al grupo de factores de higiene (condiciones básicas). Ningún cliente aceptaría que el paquete donde se encuentra su compra se entregue con daños. La calidad de entrega describe la condición y estado de los bienes cuando son recibidos por el cliente (DHL, 2016).

Todos estos factores han sido percibidos como los más importantes para los consumidores en el proceso de entrega. Juntos forman una propuesta de valor que los participantes de la distribución de última milla deben tener en cuenta al revisar su cartera actual de ofertas de servicios y desarrollar nuevos servicios de creación de valor con anticipación. Pero la propuesta de valor de entrega en la última milla no es estática. Los hábitos y perfiles de los consumidores están evolucionando rápidamente y la ecuación de valor de hoy puede estar desactualizada dentro de cinco años.

Por último, es importante señalar que no existe una solución única y válida para todos. Los clientes buscan cada vez más soluciones personalizadas que se integren sin problemas en sus estilos de vida. Esto crea oportunidades a las compañías, ya que pueden diferenciar aquellos clientes que valoran unos aspectos sobre otros y, sobre todo, que están dispuestos a pagar por ellos.

La tabla 3 recopila una colección de resultados en la literatura y encuestas que subrayan esta relevancia de los servicios dentro del proceso de entrega. Están agrupados en función de los principales factores descritos y se añaden algunos resultados para el caso del mercado español. La conclusión es clara: el cliente ha convertido el proceso físico de entrega en la última milla en un aspecto diferencial y crítico dentro del proceso de compra del comercio electrónico.

Tabla 3. Encuesta de consumidores sobre los aspectos relevantes que inciden en el proceso de entrega en el *e-commerce*

Aspectos relevantes	Fuente
<b>Coste</b>	
El 44 % abandona el carrito porque no se ofreció el envío gratuito (UK).	Temando, 2017
Más del 70 % de los consumidores mencionan la comodidad (77 %) y el envío gratuito (72 %) como sus principales razones para comprar en línea.	Deloitte, 2018
El 82 % de los consumidores en Estados Unidos estaban dispuestos a haber comprado más artículos para aprovechar una opción de «entrega gratuita» de gasto mínimo.	Metapack, 2020
El 72 % de los usuarios de Amazon Prime citan la entrega gratuita ilimitada como el beneficio más importante del servicio.	PWC, 2021

Aspectos relevantes	Fuente
El 41 % de los consumidores están dispuestos a pagar un cargo por la entrega el mismo día, mientras que el 24 % pagarían más para recibir paquetes dentro de una ventana de una o dos horas de su elección.	PricewaterhouseCoopers, 2021
<b>Alternativas de elección y flexibilidad</b>	
El 45 % de los consumidores comprarían <i>online</i> si se mejoraran las opciones de entrega.	Lowe y Rigby, 2014
El 75 % de los minoristas experimentan una reducción en el abandono del carrito después de aumentar el número de opciones de envío al finalizar la compra.	Temando, 2017
El 77 % de los compradores españoles <i>online</i> expresaron su deseo de poder utilizar la opción de entrega de una hora.	Metapack, 2018
El 86 % de los minoristas experimentan mayores ventas después de aumentar la cantidad de opciones de envío en el momento de pagar.	Estudio Anual eCommerce lab Spain, 2019
El 70 % de los consumidores de Estados Unidos eligen comprar productos de un proveedor en línea en lugar de otro porque brinda más opciones de entrega.	Metapack, 2020
<b>Velocidad</b>	
¿Qué consideran los consumidores el envío rápido? Según el 97 % de los consumidores, el envío el mismo día se considera «rápido», mientras que el 95 % considera que el envío al día siguiente es «rápido».	Efulfillment Service, 2017
Entrega el mismo día: el 75 % de los clientes desean esta opción dentro de las compras <i>online</i> y los minoristas cumplen con esta expectativa con poco más del 50 % que ofrecen envío el mismo día.	Efulfillment Service, 2017
Los consumidores dicen que los minoristas digitales a menudo cumplen con sus expectativas de velocidad de entrega, casi el 50 % del tiempo.	García, 2018
El 74 % de los consumidores que recibieron la entrega el mismo día dijeron que es más probable que vuelvan a comprar a esa compañía (Estados Unidos).	Deloitte, 2018
Casi la mitad de los consumidores (44 %) declararon que estaban dispuestos a esperar dos días para que los pedidos se entregaran mediante envío rápido.	Guitérrez, 2019
El 44 % de los encuestados señalan el plazo de entrega como un motivo principal de satisfacción.	Estudio Anual eCommerce lab Spain, 2019
<b>Comodidad y otros</b>	
El 43 % de los compradores comprarían más <i>online</i> si se ofrecieran devoluciones gratuitas y fáciles.	Temando, 2017
Una gestión eficaz de las devoluciones puede mejorar la rentabilidad por cliente en casi un tercio (29 %).	Deloitte, 2018
El 10 % de los <i>e-shoppers</i> encuestados devolvió su último pedido.	Seur, 2019
El 72 % de los <i>e-shoppers</i> considera importante conocer la compañía de transporte en el momento de la compra.	Seur, 2019
El 69 % de los compradores confirman que la calidad del servicio de devoluciones influye mucho en los minoristas a los que comprar.	IMRG Consumer Delivery Review, 2019/2020
Principales razones de devolución: 30 % producto dañado, 27 % diferente a lo descrito.	UPS-Pulse of the Online Shopper, 2018/2019

## 2.3. La entrega en el *e-commerce* (ii): actores, opciones y alternativas preferidas

### 2.3.1. Actores en los servicios de entrega de paquetes en el *e-commerce*

Se puede distinguir entre 4 tipos de actores distintos: operadores postales nacionales, integradores globales, empresas de paquetería y especialistas en la última milla (Cardenas *et al.*, 2016).

- Operadores de servicios postales (NPO): sus oficinas están presentes en todos los países para la prestación del denominado «acceso universal». En los últimos años, el servicio postal ha sido desregulado y dentro del sector de la paquetería la competencia es más intensa. Los operadores proporcionan la entrega a domicilio y las devoluciones a una oficina postal, donde tienen una cobertura de casi el 100 % en toda Europa. Casi todos los operadores de servicios postales permiten que los compradores electrónicos devuelvan un paquete entregándolo en una oficina de correos o en un punto de recogida.

De este modo, posibilitan una importante cuota de mercado para las entregas de paquetes a domicilio en países europeos. Para los envíos B2C, la cuota de mercado en toda la UE es del 35 %, y del 54 % en promedio en países con buen desempeño en el ámbito del comercio electrónico (Reino Unido, Alemania, Francia, Suecia, Finlandia, España, Dinamarca y Países Bajos) (Copenhagen Economics, 2013).

- Integradores globales: estas empresas tienen presencia a nivel mundial. Están integrados verticalmente, brindan servicios puerta a puerta y poseen su propia flota de aviones y camiones (Borbon-Galvez y Vanelslender, 2015). Para ofrecer un servicio integral, poseen amplias redes mundiales, mejoradas con la participación de subcontratistas. Los principales operadores en esta categoría son DHL, UPS y FedEx. Estas empresas actúan como agentes integradores para realizar envíos internacionales, dejando las entregas estándar a empresas de paquetería, o a divisiones de paquetería dentro de la misma empresa integradora, por ejemplo, DHL-Parcel for DHL (Okholm *et al.*, 2013). En el mercado europeo, DHL (Deutsche Post DHL) es el líder del mercado.
- Empresas de paquetería: si bien muchos estudios incluyen a este grupo dentro de la categoría de integradores o especialistas, es importante distinguirlos claramente, porque las empresas o transportistas de paquetería, junto con la familia de operadores de servicios postales, representan el núcleo del mercado de las entregas de comercio electrónico en términos de volumen. Estas empresas generalmente cubren un área regional y, en muchos casos, son subsidiarias de un integrador o un proveedor de logística (Ducret, 2014; Cardenas *et al.*, 2016). Estas empresas están especializadas en

entregas de paquetes y su experiencia proviene de su actividad en el mercado B2B. Se están adaptando al mercado B2C, superando las limitaciones de sus capacidades, la fuerte competencia de los operadores postales y la presencia de una amplia gama de especialistas en la última milla.

- Especialistas en la última milla: este grupo de operadores está compuesto por pequeñas empresas innovadoras (*startups*) que brindan soluciones para entornos urbanos. Cubren un área local y, a menudo, son subcontratistas de los operadores integradores. Se centran en proporcionar una entrega sostenible utilizando vehículos no tradicionales (bicicletas, vehículos sostenibles, etc.) para evitar las externalidades negativas del transporte (Ducret, 2014; Cardenas *et al.*, 2016).

A continuación, se muestra un ejemplo de los diferentes actores que intervienen en los servicios de entrega en el comercio electrónico.

Tabla 4. Actores que participan en el proceso de entrega de paquetes en el *e-commerce*

Servicio postal	Integrador global	Empresas de paquetería	Especialistas en última milla
Correos	DHL	Seur	Citibox
Deutsche Post	FedEx	MRW	Stuart
Royal Mail	UPS	Correos Express	Scoobic
La Poste		DHL Parcel	Doodle

Fuente: elaboración propia a partir de van den Bossche *et al.* (2017)

En el caso español, si atendemos a la cuota de mercado, el sector de transporte de paquetería en España se ha convertido en un sector donde 10 empresas acaparan cerca del 75 % de la cifra de negocios (año 2019). El restante 25 % se reparte entre un número elevado de empresas que tienen una cuota de mercado muy baja.

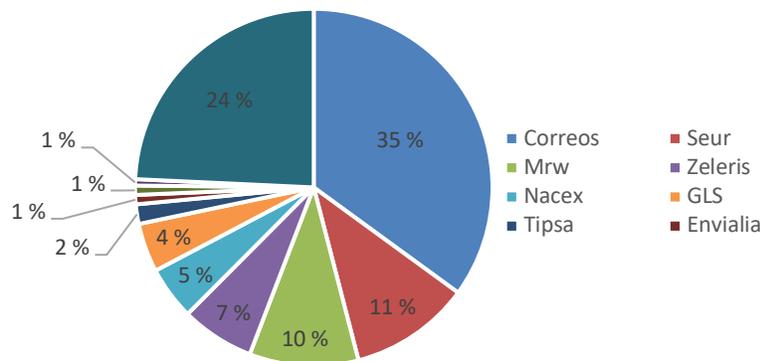


Figura 23. Cuota de mercado de paquetería en España

Fuente: CNMC (2020)

### 2.3.2. Opciones de entrega actuales

Las opciones de entrega son un elemento diferenciador para el cliente de *e-commerce*. A continuación, se describen las dos fórmulas de entrega predominantes que se utilizan actualmente en el comercio electrónico: entrega a domicilio y recogida de entrega.

#### 2.3.2.1. Entrega a domicilio

##### 1. Entrega a domicilio estándar

La entrega a domicilio es la forma más clásica de entrega de paquetes y funciona, desde el punto de vista del consumidor, exactamente como la entrega de correo postal, con la diferencia de que la persona que realiza la entrega no deposita el paquete en el buzón del receptor, sino que llama al timbre e intenta entregar el paquete al destinatario en persona. El transportista recoge los paquetes en un punto de consolidación y los entrega directamente a los destinatarios. El servicio de entrega a domicilio es una forma de entrega atendida y requiere la presencia física del destinatario.

Si bien la entrega a domicilio sigue siendo la forma de entrega más popular y la más utilizada, su popularidad entre los consumidores disminuye en favor de otras alternativas de entrega. Aun así, según Schröder *et al.* (2018), más del 70 % de los consumidores aún prefiere la entrega a domicilio en comparación con las otras opciones. Los consumidores valoran la seguridad y comodidad de la entrega directamente en su puerta (Joerss *et al.*, 2016). En España, una amplia mayoría de los compradores (86 %) recibe sus paquetes en casa, aunque el lugar de trabajo también se valora como opción alternativa para un 18 % de los usuarios (ONTSI, 2019).

##### *Problemas de la entrega a domicilio*

Los servicios fallidos por la ausencia del destinatario en su domicilio durante el momento de la entrega constituyen el principal problema tanto para los transportistas como para los consumidores. Según un estudio realizado en Reino Unido, entre el 50-70 % de los hogares estaban vacíos durante el día de realización de la entrega (Lowe *et al.*, 2014).

El problema de «no estar en casa en el momento de la entrega» se convierte en el factor más crítico para el éxito de la fórmula de entrega a domicilio. Este fracaso conduce a numerosos inconvenientes y, finalmente, a una menor satisfacción entre los clientes (UPS, 2019).

Cuando una entrega es fallida, se producen disfuncionalidades a diferentes niveles. Desde el punto de vista del cliente, pueden considerarse las siguientes (IMRG, 2015):

- El destinatario de una entrega fallida tiene que recorrer, de media, 5 km (ida y vuelta) para recoger el paquete y emplea 30 minutos para hacerlo.
- Al mismo tiempo, debe cumplir con los horarios de apertura del punto de recogida, que a menudo coinciden con el horario laboral habitual.

- Puede existir un coste adicional en función del transporte empleado, público o privado, y del aparcamiento.
- Además, después de la recogida, el destinatario debe transportar hasta su domicilio el paquete, que puede ser pesado o difícil de manejar.

Todos estos factores constituyen exactamente la percepción contraria a las expectativas depositadas por el consumidor cuando realiza una compra y contrata su entrega a domicilio.

La mayoría de clientes prefiere las entregas a domicilio realizadas los fines de semana y después del horario comercial, para asegurar su presencia en el lugar de entrega y, de este modo, evitar la exposición del paquete a la intemperie y posibles robos (Lee *et al.*, 2016).

Además, los costes del transporte de entrega a domicilio en el comercio electrónico están estrechamente relacionados con la cantidad de vehículos necesaria durante el mismo periodo de tiempo. Cuanto más pueda controlar o seleccionar el cliente la ventana de tiempo de entrega a domicilio, mayores serán los costes. La razón de esto es sencilla: menor porcentaje de carga ocupada en los vehículos y mayores distancias recorridas para cumplir con las ventanas de tiempo de entrega prometidas. Esto se traduce en un mayor número de horas de trabajo para el servicio de reparto y en un número creciente de vehículos necesarios, lo que lleva aparejado un crecimiento significativo de los costes totales de la solución de entrega a domicilio (Punakivi y Saranen, 2001).

En la entrega a domicilio, también existen ineficiencias desde el punto de vista de los operadores de transporte ante una entrega fallida (Hepp, 2018):

- Tiempo de no actividad del vehículo.
- Consumo de combustible adicional del vehículo.
- Costes de los nuevos intentos en próximos días.
- Costes de almacenamiento extra.

Y, por último, es necesario tener en cuenta todas las externalidades negativas que producen la repetición del servicio de entrega. Según un estudio de la Universidad de Heriot-Watt (Edwards *et al.*, 2010):

- La principal causa de que no se produjese la entrega en el domicilio del destinatario fue la ausencia de personas en el domicilio (54,9 %).
- La emisión media de CO<sub>2</sub> por entrega en el domicilio, en el caso del 100 % de éxito, se ha estimado en 181 g. En cambio, en el caso de producirse un 50 % de entregas fallidas, la emisión de CO<sub>2</sub> por entrega en el domicilio se elevaba a 271 g.
- Una gran mayoría de las emisiones asociadas con la entrega fallida tradicional provienen del viaje del cliente al depósito u oficina de recogida.

Debido a las debilidades que presenta este tipo de entrega, los grandes operadores de paquetería, en términos de cuota de mercado, expresan que la entrega a domicilio no será la forma estándar de entrega en el futuro (Lowe *et al.*, 2014). En función de cómo evolucione el mercado, los operadores planean introducir cargos adicionales para la entrega a domicilio, por el esfuerzo que supone al transportista. Este sería un cambio fundamental para los consumidores.

## 2. Buzones inteligentes (*smart parcel box*)

Un buzón inteligente es una caja instalada en la casa, piso o edificio de un cliente. Es un sistema seguro de entrega y recogida de paquetes que actúa como un buzón para entregas y una caja de recogida para el envío.

Algunos buzones se pueden compartir entre muchos usuarios, proporcionando privacidad y seguridad para cada usuario (reduciendo el coste de inversión inicial). El buzón está diseñado para ser resistente a la intemperie y lo suficientemente fuerte como para hacer frente a los ataques de vandalismo. Por lo general, incluye un sistema de bloqueo avanzado con teclado, así como un bloqueo de anulación manual. Este dispositivo es lo suficientemente grande como para recibir alrededor del 85 al 98 % de los productos comprados *online* (van den Bossche *et al.*, 2017).

El buzón inteligente está totalmente integrado con aplicaciones presentes en los teléfonos inteligentes para que los clientes puedan realizar un seguimiento de las entregas y recogidas en tiempo real.

A continuación, se detallan algunas ventajas de la utilización de los buzones inteligentes como posibilidad de realizar las entregas a domicilio (van den Bossche *et al.*, 2017):

- *E-retailers*: los minoristas pueden ofrecer mejores niveles de servicio, tiempos de entrega más cortos, mejorar el servicio de las devoluciones y evitar las entregas fallidas.
- Operadores de transporte: en este caso, las ventajas se centran en la eficiencia operacional y, por tanto, en la contención de los costes. No necesitan invertir en el medio para facilitar la entrega.
- Autoridades locales: se reduce el número de entregas fallidas, lo que reduce el número de kilómetros totales recorridos y, por tanto, las externalidades derivadas del tráfico.
- Clientes: garantía de recibir el pedido sin tener que estar presente en el domicilio y sin molestar a otros vecinos para su recogida.

Las desventajas se centran en el coste de los dispositivos inteligentes. El cliente es quien paga por el servicio, por lo tanto, son los clientes quienes asumen el coste de un mejor nivel de calidad en las entregas. Otro efecto es que las preocupaciones de seguridad por robo o vandalismo se transfieren al cliente.

### 3. Entregas según demanda

*On-demand delivery* (ODD), o entregas según demanda, es un concepto de entrega que ha sido implementado desde finales de 2014 por *startups* y empresas de nueva creación (E-commerce News, 2015; Wired, 2016). Los compradores electrónicos pueden solicitar productos usando aplicaciones en sus *smartphones* y recibir su pedido en casa en menos de dos horas. Los mensajeros utilizan su bicicleta o su propio automóvil para llegar con el pedido (Wired, 2016).

Las empresas ODD, respaldadas por su plataforma tecnológica, utilizan una amplia red de mensajeros de entrega independientes, monitorean el estado de la entrega en tiempo real y verifican la entrega a los clientes finales (Joerss *et al.*, 2016). Al utilizar estos servicios, los comercios y minoristas locales pueden establecer entregas a domicilio para atender a sus clientes urbanos sin desarrollar sus propias plataformas tecnológicas y soluciones logísticas.

El concepto ODD se ha implantado para satisfacer las principales demandas del consumidor electrónico (UPS, 2019). Entre ellas, se pueden considerar las siguientes:

- Entrega a domicilio.
- Entrega rápida.
- Precio bajo.
- Monitoreo de la ubicación del producto en tiempo real.
- Facilidad de uso.

Los grandes *e-retailers* están apostando por la entrega según demanda: PrimeNow (Amazon), El Corte Inglés, Decathlon, Fnac, etc., son algunos de los principales usuarios de este concepto. Sus plataformas atienden los pedidos *online* y, posteriormente, seleccionan a la empresa ODD más conveniente. En otros casos, se utiliza directamente el operador ODD (Deliveroo, Glovo, Postmates o Uber), donde a través de su aplicación, se selecciona el producto dentro de un catálogo más amplio.

#### 2.3.2.2. Recogida de entregas de *e-commerce*

Dada la gran cantidad de personas que no están en casa durante el día, cada vez más individuos optan por opciones de entrega desatendida. Al comprar *online*, el consumidor puede elegir entre una amplia gama de lugares de entrega que no sean su propio domicilio, pudiendo ver las posibles ubicaciones de entrega en un mapa. De este modo, pueden seleccionar el lugar de recogida según sus necesidades en términos de proximidad, horario de apertura o accesibilidad. En este caso, el destinatario tiene la ventaja de que no necesita estar presente durante el reparto y que puede elegir entre un número cada vez más creciente de ubicaciones. Las opciones más frecuentes son:

### 1. Oficinas de correos, oficinas de paquetería y puntos de recogida

Las oficinas de correos ofrecen toda la gama de servicios de una empresa postal en particular, entre otras, el manejo de paquetería y correo, servicios financieros o telecomunicaciones. Generalmente son propiedad y están operados por la firma postal respectiva. En España existen cerca de 2400 oficinas de correos repartidas alrededor de toda la geografía española.

Las oficinas de paquetería o las instalaciones de la empresa de transporte funcionan de forma similar a las oficinas de correos, pero disponen de un número de locales mucho menor, con lo que es necesario llegar a acuerdos con otros comercios para disponer de una mayor capacidad de entrega y estar más cerca del cliente.

Los puntos de recogida, o puntos de conveniencia, no son propiedad ni están operados por las compañías postales ni por las empresas de paquetería. Son gestionados por empresas de terceros que ofrecen servicios de paquetería como servicio adicional a su negocio principal. No solo están ideados para recoger paquetes, sino que en caso de que la entrega sea contra reembolso, se puede abonar en el mismo punto de recogida. En el supuesto del servicio de gestión de una devolución, es posible entregar directamente la mercancía allí mismo, y será el vendedor quien se encargue de su recepción. Los puntos de conveniencia están constituidos por un amplio abanico de comercios. Así, una quinta parte de los puntos de recogida son quioscos de prensa y estaciones de servicio. El resto se distribuye entre los comercios de servicio de tintorerías, copisterías, panaderías, supermercados, etc. (Kim y Farr, 2017).

Los clientes generalmente eligen el punto de recogida donde les gustaría recoger su paquete. Esto ofrece oportunidades para aprovechar viajes, ya que los clientes pueden, por ejemplo, visitar un punto de recogida en su camino a casa desde el trabajo o desde su hogar a un centro comercial. Su beneficio, en comparación con las oficinas de correos, es una mayor flexibilidad en términos de horarios.

En un estudio realizado por la empresa española de transporte urgente Tipsa (2019), sobre las preferencias de sus clientes a la hora de la entrega de los productos, se constata el crecimiento de los puntos de conveniencia, pasando de un 16 % en 2018 a un 31 % en 2019. El estudio señala la adaptabilidad, comodidad y sostenibilidad como las principales aportaciones de los puntos de conveniencia tanto al operador del comercio electrónico como a los clientes.

### 2. Recogida en tienda

BOPIS (*buy online, pickup in store*), traducido al castellano como compra *online* y recoge en la tienda, es otra forma de entrega desatendida. El punto de recogida es una tienda física del minorista. Muchas empresas importantes de la distribución, como Zara, permiten a sus consumidores comprar *online* y recoger su compra en la tienda Zara más cercana.

Según el informe *Global Shopper Trends Report* de Ivend Retail (2019), el evitar costes de envío sigue siendo la principal razón del cliente para utilizar la recogida en tienda (47,4 %). A partir de aquí, las dos siguientes motivaciones tienen que ver con el tiempo: por un lado, el ahorro

de tiempo que produce la compra *online* (44,4 %), y, por otro, la posibilidad de recoger los artículos comprados durante el mismo día (38,9 %).

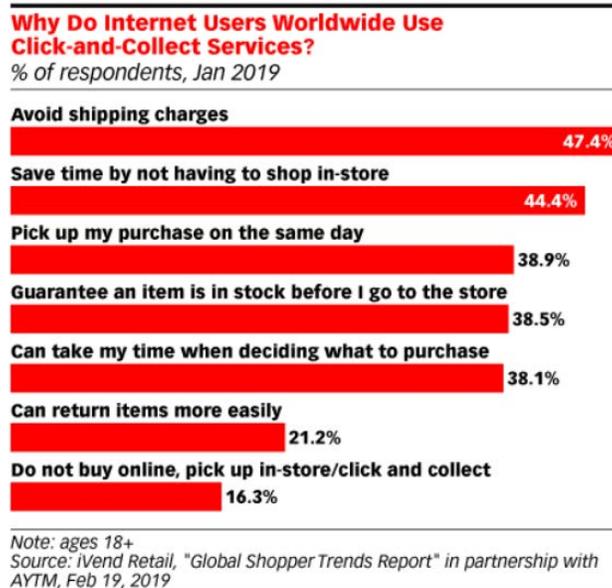


Figura 24. Cuota de mercado de paquetería en España  
Fuentes: Ivend Retail (2019) y CNMC (2020)

Desde el punto de vista de la distribución, según un estudio de Lowe y Rigby (2014), casi el 30 % de los minoristas usarían la entrega en tienda como su opción de entrega preferida por dos razones fundamentales:

1. Pueden ahorrar en costes de envío, ya que la compra *online* del cliente toma la misma ruta desde su almacén central, o centro de distribución, hasta la tienda física que se suministra de forma regular.
2. Pueden fomentar nuevas oportunidades de compra cuando los consumidores recogen sus compras *online* en la tienda. La recogida en tienda, por lo tanto, tiene el potencial de aumentar los ingresos a través del aumento del tráfico peatonal.

Además, otro factor a considerar es que elimina la impersonalidad que se da en las tiendas *online*, ya que, aunque la compra se realiza *online*, la venta se cierra en la tienda física.

Para el cliente final, existen desventajas tanto en la recogida de productos comprados *online* en puntos de conveniencia/oficinas de correos, como en las entregas en tiendas, si se comparan con la entrega a domicilio. A continuación, se consideran las más relevantes (Deloitte, 2018):

- Tiempo de desplazamiento al lugar de entrega.

- Costes asociados al desplazamiento al lugar de entrega: gasolina, estacionamiento, etc.
- Horarios definidos y coincidentes con la actividad laboral.
- Colas de espera en tienda para recoger el producto.

### **3. Taquillas inteligentes**

Las taquillas inteligentes, o consignas automáticas, son una evolución de las oficinas de correo postal. Desde la perspectiva del consumidor, las taquillas inteligentes se asemejan a las oficinas de correos en muchos aspectos. Sin embargo, el punto clave diferencial es la accesibilidad de estos servicios durante todo o gran parte del día.

La otra gran diferencia es que las taquillas inteligentes emplean una tecnología de autoservicio que no requiere la presencia de personal. Hasta la recogida del paquete del casillero, el proceso para el consumidor es igual a la entrega en las oficinas de correos y en otros tipos de puntos de recogida. Antes del proceso de pago *online*, el comprador elige la taquilla más cercana (o más accesible) para él. Al depositarse el paquete en la taquilla, el comprador recibe una notificación por SMS y (o) correo electrónico con un código PIN que le permite abrir el compartimento en el que está depositado su paquete y poder recuperarlo. Las taquillas inteligentes también se pueden usar para envíos C2C.

Estos dispositivos son accesibles las veinticuatro horas del día, los siete días de la semana, a menos que se encuentren dentro de otro sitio que tenga diferentes horarios de apertura, por ejemplo, dentro de un centro comercial o una estación de Metro.

En la siguiente imagen se muestra, de forma gráfica, el funcionamiento de las taquillas inteligentes.

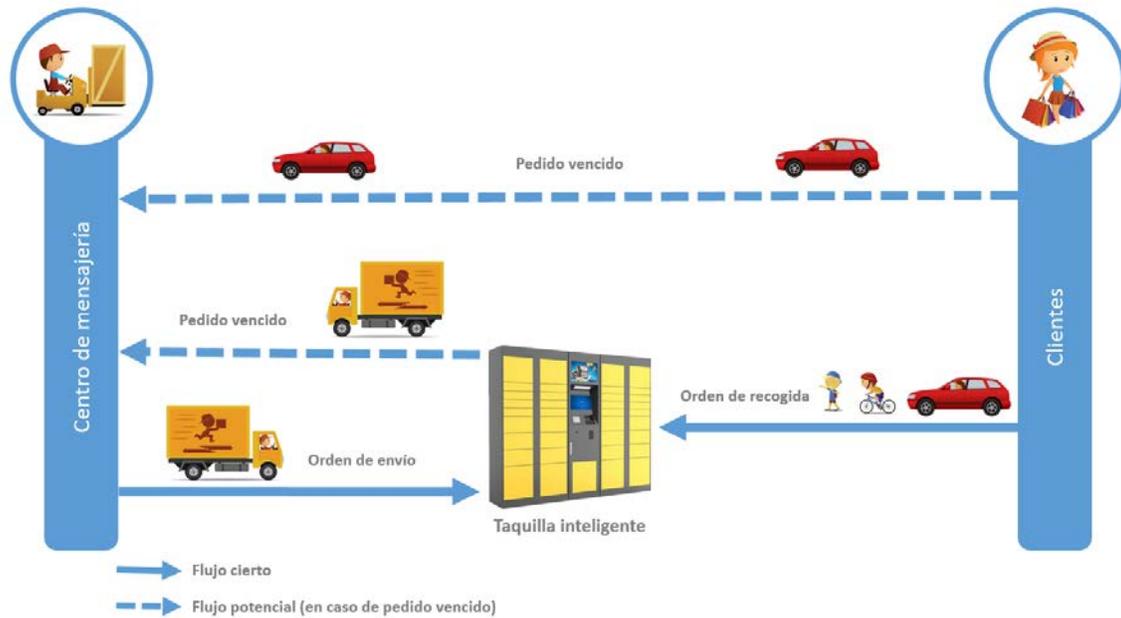


Figura 25. Flujo de paquetes de e-commerce y recogida en taquilla  
Fuente: elaboración propia a partir de CNMC (2020)

Además de la entrega y recogida del paquete, la taquilla automática también se puede utilizar como opción para la logística inversa. Un cliente puede disfrutar del servicio adicional enviando los paquetes o, en el caso de que estén dañados, utilizando el casillero para devolver el producto al minorista, reduciendo, así, los viajes del transportista. Una impresora dentro de la máquina permite imprimir recibos o franqueo autoadhesivo.

Las taquillas inteligentes presentan beneficios mutuos tanto para los consumidores como, sobre todo, para los operadores logísticos:

- El beneficio principal es el servicio fiable, disponible y seguro que se brinda a los clientes.
- La accesibilidad es, en muchos casos, de 24/7. Por lo tanto, los destinatarios adaptan el proceso de recogida a sus propios horarios. Esto se demuestra en el hecho de que alrededor del 35-40 % de los paquetes se recogen en un momento en el que las oficinas de correos y los operadores no trabajan (Parcel and Postal Technology International, 2014):
  - El 30 % de los paquetes se recogen los fines de semana.
  - El 32 % de los paquetes se recogen entre las 8 p. m. y las 9 p. m.
- Las taquillas son seguras contra el robo (a través de bloqueos automáticos y videovigilancia).

- En comparación con el alto porcentaje de entregas a domicilio fallidas, las taquillas no sufren este problema y se supone que la tasa de éxito en la primera entrega es del 100 %. Por lo tanto, ahorra todos los costes asociados a una segunda entrega y sucesivas.
- La densidad de entrega (número de direcciones de entrega dentro de un área específica) es significativamente mayor que para la entrega a domicilio. Los vehículos solo deben realizar una parada en un solo lugar para varios clientes en lugar de varias paradas individuales (Joerss *et al.*, 2016).
- Al agrupar varios paquetes y hacer que se entreguen en un solo lugar ahorran tiempo y costes. Finalmente, debido a que no se entrega personalmente el paquete en la casa de cada destinatario, se pueden programar rutas de entrega más optimizadas. Estos factores conducen a costes operativos reducidos. A continuación, se muestra, siguiendo a distintos autores, el rango de coste de entrega por paquete en una taquilla inteligente.

Tabla 5. Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes.

Author/Study	Cost of delivery via CDP per parcel
Giuffrida <i>et al.</i> , 2016	0,24 €-2,3 €-0,36 €-5,35 €
Gevaers <i>et al.</i> , 2014	1,16 €-2,91 €
Iwan <i>et al.</i> , 2016	2,18 €

Fuente: adaptado de Lemke *et al.* (2016)

- Finalmente, podemos considerar como ventaja adicional que las taquillas no requieren de personal y precisan de bajo coste de mantenimiento.

Por otro lado, las taquillas inteligentes también presentan una serie de desventajas y limitaciones que se consideran a continuación:

- La división de la última milla. El proceso de entrega se divide en dos etapas, una parte la desarrolla el operador logístico y la otra el usuario. Considerando el proceso de entrega de forma individual, puede generar más costes que si fuera gestionado de forma conjunta por un solo operador.
- Volumen o peso del paquete: en función del tipo de producto, puede ser un problema adicional, ya que algunos paquetes podrían no ser depositados en el casillero de una taquilla por exceder el volumen o peso permitidos. Alrededor del 5 % de los paquetes pesan entre 15 y 30 kg (Joerss *et al.*, 2016).

- Para determinados usuarios, el uso de taquillas inteligentes puede representar una limitación por el hecho de no contar con la interacción humana durante el proceso de entrega (Hepp, 2018).
- Encontrar la ubicación adecuada representa una molestia adicional para una gran parte de clientes.

Si se compara con el impacto ambiental de la entrega a domicilio, el uso de taquillas inteligentes parece más amigable con el medioambiente. No solo se pueden reducir las emisiones, sino también los atascos de tráfico y el ruido relacionados con el transporte, ya que las taquillas generalmente se colocan en lugares públicos donde el servicio de paquetería recorre un kilometraje más bajo en comparación con una entrega estándar (Weltevreden y Rotem-Mindali, 2009; Giuffrida *et al.*, 2016; Moroz y Polkowski, 2016; Iwan *et al.*, 2016).

Una vez realizada la entrega en el casillero por parte del transportista, corresponde al comprador realizar el tramo final del viaje. Debido al posicionamiento estratégico de las taquillas, los clientes viajarán a pie o, si el consumidor viaja en automóvil, lo más probable es que esta segunda parte de la entrega se combine con otra actividad (compras, repostaje, etc.).

Dentro de la literatura es muy difícil obtener información específica sobre la última parte de la cadena de suministro en la que el cliente recoge personalmente el paquete. Un estudio realizado por Edwards *et al.* (2009) ha estimado las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de estos viajes realizados por los clientes hasta un depósito local para recoger una entrega, teniendo en cuenta el medio de transporte que se utiliza.

Tabla 6. Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes

gCO <sub>2</sub> per trip	Distance to local depot		
	15 km	25 km	40 km
Car	3,113 g	5,188 g	8,300 g
Bus	1,340 g	2,234 g	3,574 g

Fuente: adaptado de Edwards *et al.* (2010)

Posteriormente, la investigación realizada por Giuffrida *et al.* (2016) muestra que las taquillas inteligentes son menos costosas y más ecológicas que la entrega a domicilio estándar. Aunque existen algunas limitaciones a estas conclusiones. Desde una perspectiva ambiental, los clientes que viven dentro de un área urbana deberían viajar en coche para recoger su paquete cubriendo una distancia que no debe exceder los 0,94 km. Cuando esto sucede, la entrega/recogida en una taquilla inteligente generará más emisiones que la entrega a domicilio. Por lo tanto, la recogida a pie o dentro de otro desplazamiento (compras, repostaje, etc.) es un aspecto fundamental para evitar la externalidad negativa.

La investigación de Lemke *et al.* (2016) indica que el 43 % de los usuarios de taquillas recogen su paquete de camino al trabajo o al colegio. Casi el 62 % combina la recogida de sus productos mientras realiza otras actividades, y más del 29 % de los encuestados nunca combina la recogida de su paquete con otras actividades, siendo estos viajes de un solo propósito muy contaminantes cuando se realizan en automóvil. Además, otro estudio realizado por Iwan *et al.* (2016) mostró que, para los usuarios actuales, el precio, la velocidad y la disponibilidad son los criterios principales para elegir una taquilla inteligente.

En España, Correos, a través de citypaq, dispone de cerca de 4000 taquillas inteligentes. SEUR, por su parte, cuenta con más de 2400 taquillas repartidas en toda la península (julio de 2020).

### 2.3.3. Alternativas de entrega preferidas

En términos de preferencia de los clientes cuando compran *online*, los consumidores esperan poder elegir diferentes opciones de entrega, si bien la preferencia se decanta por las entregas a domicilio.

Según Morganti *et al.* (2014), aunque Alemania disponía de una red de puntos de recogida bastante densa donde los clientes están aproximadamente a 10 minutos de las taquillas inteligentes u otros puntos de recogida, el 90 % de los clientes todavía prefieren la entrega a domicilio. El mismo hecho está respaldado por una investigación realizada por Loew *et al.* (2014), que establece que el 94,9 %, 79,6 % y 87,2 % de los clientes encuestados en Reino Unido, Francia y Alemania, respectivamente, preferían la entrega a domicilio.

Más recientemente, la figura 26 muestra la encuesta publicada por International Post Corporation en 2020 (en la cual participaron más de 33 500 consumidores en 41 países diferentes), que revela que la entrega en el domicilio fue la opción utilizada por el 66 % de los encuestados en 2019. Después, a mucha distancia de esta, se sitúa como segunda opción de recogida la oficina de correos (21 %). Adicionalmente, casi el 40 % de los encuestados también está abierto a la recogida de paquetes en puntos de conveniencia, incluyendo tiendas físicas, oficinas de los operadores y depósitos centrales de almacenamiento.

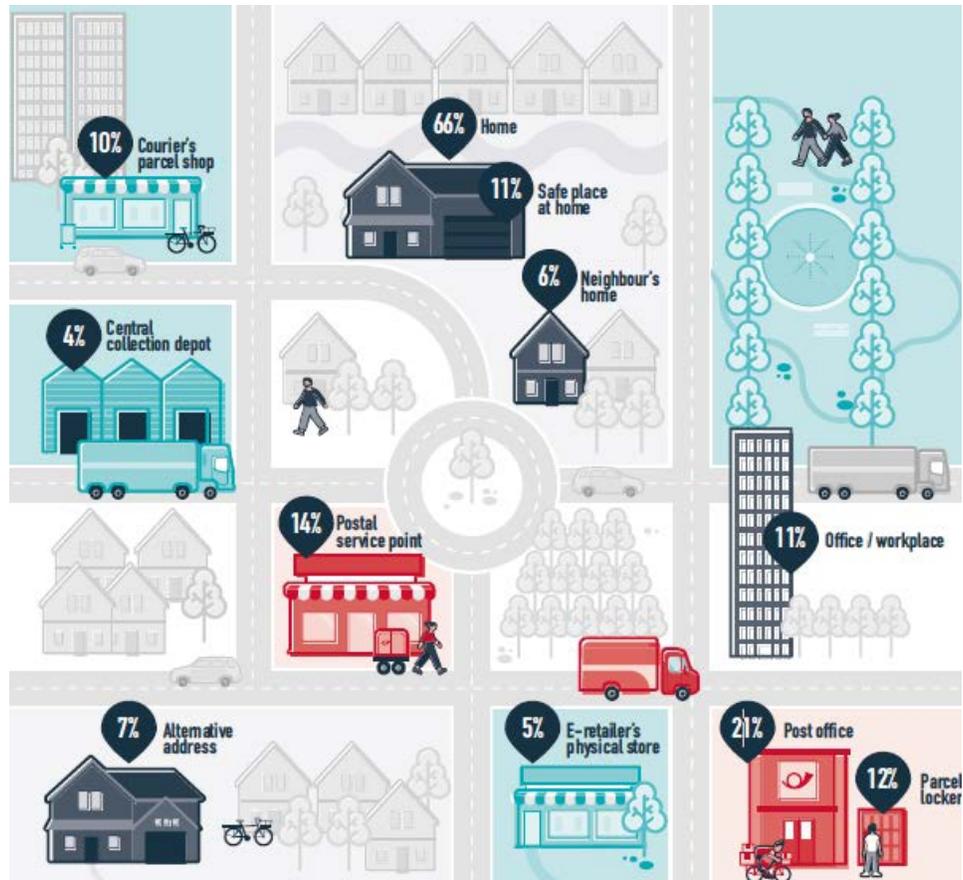


Figura 26. Alternativas de entrega utilizadas  
 Fuente: International Post Corporation (2020)

Aunque la preferencia por la entrega en el hogar es indiscutible, sin embargo, debido al trabajo y a los horarios de los clientes, las entregas se realizan normalmente cuando los clientes no están en casa para recibirlos. Por esto, los clientes, con más frecuencia, tienen que optar por una solución alternativa a la entrega del paquete en el domicilio.

Durante la pandemia, la presencia en los hogares de los consumidores *online* se ha incrementado de forma forzosa, lo que ha permitido minimizar los problemas de entrega. El futuro escenario de movilidad en las ciudades (poscovid-19), así como la preferencia por un comercio cada vez más sostenible, marcarán de forma sustancial las preferencias de los consumidores a la hora de elegir los lugares de entrega de sus compras de *e-commerce*.

## 2.4. Factores del *e-commerce* que afectan el desempeño de la logística urbana

«Sin demanda, no habría transporte de mercancías y, por lo tanto, no habría necesidad de ninguna iniciativa de transporte de carga urbana» (Allen *et al.*, 2000).

En la actualidad, el crecimiento sustancial en los volúmenes totales de paquetería, en gran parte debido al crecimiento en el comercio electrónico (Allen *et al.*, 2018), genera problemas de eficiencia para minoristas y operadores logísticos. De igual forma, se están dando una serie de factores operativos y comerciales que afectan directamente a la actividad de los *e-retailers* y de los actores de la cadena de suministro, condicionando la logística urbana de las grandes ciudades:

- (i) *Picos de actividad y máxima presión*: hace referencia a la capacidad de un operador para hacer frente a la creciente demanda adicional de entregas de paquetes durante los periodos pico y a la inversión en infraestructura necesaria para mantener dicho servicio. Los minoristas se suman a estas presiones de demanda máxima a medida que buscan aumentar las ventas y su posición competitiva mediante la importación de conceptos como el Black Friday y el Cyber Monday (Herson, 2015). Los minoristas también están instando a los operadores logísticos a retrasar los tiempos de corte para poder aumentar las entregas al día siguiente y así ganar cuota de mercado.
- (ii) *Demandas cada vez más complejas de los clientes*: los consumidores exigen servicios de entrega cada vez más rápidos, más fiables y adecuados a sus necesidades, lo que ha llevado a los transportistas a ofrecer ventanas de entrega programadas, trazabilidad de paquetes y alternativas de ubicación para la entrega, incluidos puntos de conveniencia y taquillas inteligentes. Todos estos aspectos presentan implicaciones en sus costes operativos y de inversión (Copenhagen Economics, 2013).
- (iii) *Demanda de entregas B2C*: las entregas B2C y C2C también involucran más ubicaciones de entrega urbanas en comparación con las entregas realizadas por B2B. La entrega B2C ha experimentado un crecimiento considerable, pero genera ingresos promedio más bajos para los transportistas de paquetería en comparación con las entregas B2B. Estos mercados también tienen atributos que hacen que la entrega sea menos eficiente, por ejemplo, las entregas fallidas asociadas a domicilios particulares o el porcentaje de paquetes individuales en comparación con la entrega de múltiples artículos por destinatario en operaciones B2B.
- (iv) *Las consecuencias de la entrega «gratis»*: la decisión de muchos minoristas de proporcionar opciones de entrega gratuita para atraer a los clientes ha dado como resultado que se multipliquen los operadores y se exijan modelos de precios bajos (Deloitte, 2018).

Como ya se ha señalado anteriormente, las entregas fallidas y (o) la devolución gratuita son uno de los principales motivos de abandono de la compra *online* por parte de los clientes.

- (v) *La presión por cumplir con los plazos de entrega:* los usuarios demandan servicios de entrega más rápidos, mientras que los minoristas *online* y los transportistas de paquetería ofrecen una gama de servicios de entrega con garantía de tiempo que abarca desde un número de días desde el pedido realizado, hasta entregas en 2 horas en zonas urbanas. Este hecho restringe la planificación en el transporte y, por tanto, la capacidad de programar la actividad. Desde 2013, ha habido un aumento en la proporción de paquetes enviados para la entrega al día siguiente y una disminución relacionada en los paquetes enviados por el servicio más económico (IMRG, 2015; Metapack, 2018). La proporción de minoristas *online* que ofrecen 6 o más opciones de entrega a los consumidores aumentó, para Reino Unido, del 3 % en 2015 al 10 % en 2016. Del mismo modo, la proporción de minoristas que ofrecen solo una o dos opciones de entrega se redujo del 55 % en 2015 al 35 % en 2016 (Oracle, 2016).
- (vi) *Devoluciones de productos:* a diferencia de otras cadenas de suministro, los productos devueltos de compras por Internet representan una proporción considerable de todos los productos entregados, con un 20-30 % del importe de toda la ropa y calzado comprados *online* que se devuelven (Lowe *et al.*, 2014). Un incremento en las compras *online* llevará consigo un incremento en las devoluciones por parte de los clientes finales. Las estimaciones indican que entre el 50-75 % de estas devoluciones son pagadas por los minoristas *online* en lugar de por los clientes (Oracle, 2016). Esto refleja la supremacía del precio y el nivel de servicio (factores clave en la retención de clientes) en lugar de la rentabilidad.
- (vii) *Entregas fallidas:* las tasas de fallos son más altas para entregas a direcciones particulares (B2C) en comparación con las direcciones comerciales (B2B), debido a que menos del 10 % de todos los paquetes y pedidos *online* (en valor) son compatibles con un buzón estándar (Oracle, 2016). Además, dentro de las horas de trabajo convencionales, los clientes están a menudo lejos de su lugar de residencia. Debido a esto, se crea la necesidad de una repetición de la entrega en la misma dirección y, en algunos casos, incluso es necesaria una tercera visita del mensajero. El problema de una entrega repetida varía entre el 10 y el 30 % de los destinatarios (SEUR, 2019; Deloitte, 2018).

Por último, es preciso resaltar el primero de los factores considerados anteriormente: el crecimiento sustancial de los volúmenes totales de paquetería. A raíz de la crisis de la covid-19, gran parte del incremento del comercio *online*, durante los meses de confinamiento, se convertirá

en estructural en el futuro, lo que supone un crecimiento acelerado del número de clientes *online* y del número de sus operaciones de comercio electrónico.

Desde este prisma económico, tanto los factores comerciales descritos anteriormente como las mejoras en el servicio demandadas por el cliente final del comercio electrónico empujan a un incremento notable del número de entregas en la ciudad. A mayor número de entregas, mayor número de vehículos en circulación que llevan a cabo las operaciones de reparto y recogida en entornos urbanos.

La figura 27 ilustra los factores que afectan a la logística del comercio electrónico y que se han comentado anteriormente. El crecimiento imparable de las operaciones de *e-commerce*, como ya se ha mencionado, conlleva un número de externalidades (efectos negativos) que también quedan reflejadas en la columna de la derecha.

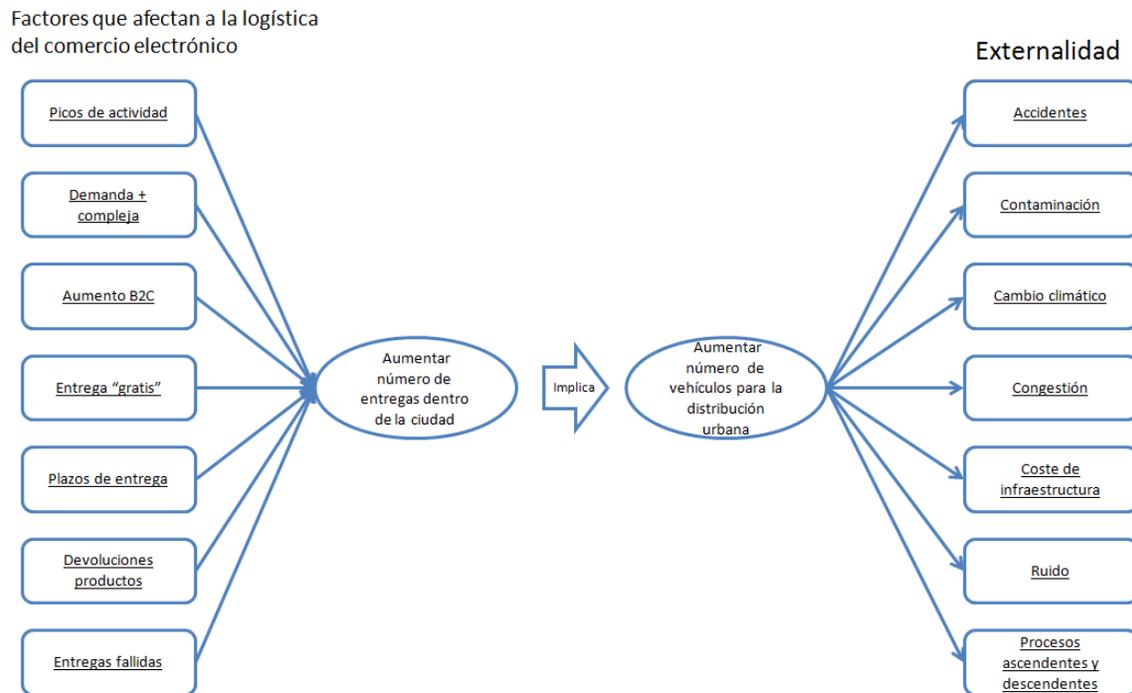


Figura 27. Factores relacionados con el *e-commerce* que afectan a la logística urbana y externalidades producidas

Fuente: elaboración propia

Los operadores logísticos que realizan la distribución urbana de mercancías están sujetos a la presión de varios factores: sus clientes, la infraestructura de la ciudad, los bienes que transportan y sus propios vehículos. Enfrentados a varias limitaciones, generalmente suelen priorizar las necesidades de sus clientes para mantener su cuota de negocio.

Este incremento del número de entregas, si no se dan soluciones alternativas, implica un mayor número de vehículos en el ámbito urbano, lo que puede suponer un aumento de las externalidades provocadas por la actividad de distribución urbana. Las grandes ciudades, que están

evolucionando para desplazar al vehículo en favor del ciudadano, no facilitan las posibilidades del reparto por carretera, lo que se traduce en una mayor complicación para los operadores logísticos en sus actividades de reparto en la última milla.

Lógicamente, todos estos factores se deben tener en cuenta dentro de los desafíos que tiene que afrontar la ciudad, definiendo un sistema urbano eficiente que permita constituir marcos apropiados para el crecimiento económico y la eficiencia, así como minimizar el consumo de recursos (Alonso *et al.*, 2017).

## Capítulo 3. Medidas y soluciones para la mejora de la logística urbana

---

Diferentes autores han organizado las numerosas medidas para la mejora de la logística de la ciudad en distintas categorías. Sobre la base de los resultados de los proyectos europeos, Russo y Comi (2011) proponen cuatro categorías de medidas, que están relacionadas con: (i) la infraestructura material, (ii) los sistemas de transporte inteligentes o telemáticos, (iii) los equipos de carga y unidades de transporte, y (iv) la gestión de la red de tráfico. Los autores proponen esta categorización de medidas como una herramienta para ser utilizada por las autoridades de la ciudad, al diseñar elementos de regulación para las actividades de logística y transporte de mercancías en las ciudades.

Browne *et al.* (2012) parten de la relación existente entre cinco características del transporte urbano de mercancías y sus externalidades. Estas características son: (i) niveles de ruido causados por cada transporte de mercancías, (ii) emisiones de contaminantes atmosféricos, (iii) consumo de combustible fósil, (iv) kilómetros totales recorridos por el vehículo, y (v) riesgo de accidente por kilómetro recorrido por el vehículo. Para cada una de estas características, los autores combinan iniciativas específicas que pueden reducir los impactos. Estas pueden agruparse en tres categorías: (a) compartir espacio y tiempo, (b) fomentar la cooperación (también entre el sector público y el privado), y (c) cambiar el comportamiento de los usuarios.

Por otro lado, Stathopoulos *et al.* (2012) definen seis clases de medidas para reducir los problemas de transporte: (i) medidas basadas en el mercado, (ii) medidas regulatorias, (iii) planificación del uso del suelo, (iv) medidas de infraestructura, (v) nuevas tecnologías y (vi) medidas de gestión. En esta misma línea, el proyecto Civitas (2015) enumera una serie de iniciativas para ciudades de entre 50 000 y 250 000 habitantes, tanto desde un punto de vista estratégico como desde la propuesta de medidas de pequeño impacto que podrían implementarse con mayor facilidad. Las citadas medidas pueden resumirse en las siguientes: (i) compromiso de los grupos de interés, (ii) medidas regulatorias, (iii) medidas basadas en el mercado, (iv) planificación del uso del suelo y medidas de infraestructura, (v) nuevas tecnologías y (vi) concienciación ecológica.

Esta breve descripción general de las distintas categorizaciones demuestra la gran variedad de medidas con relación a la logística urbana que se han introducido, probado y (o) implementado en las ciudades. Sin embargo, la literatura se ha centrado principalmente en la perspectiva de las autoridades locales y los responsables políticos, a pesar del papel clave del sector privado en muchas de estas medidas. En respuesta a esto, Macharis y Kin (2017) se centran en las medidas de logística urbana que incluyen explícitamente a los grupos de interés que son responsables y actúan en la logística en las ciudades. Las clasifican según las llamadas «cuatro aes» (inglés): (i) concienciar (*awareness*), (ii) evitar (*avoidance*), (iii) actuar y cambiar (*act*), y (iv) anticipación de nuevas tecnologías (*anticipation*).

En esta investigación, se abordan las medidas e iniciativas desde dos grandes perspectivas:

- Medidas de intervención pública:
  - a) Medidas reguladoras.
  - b) Medidas basadas en el mercado.
  - c) Infraestructura y planificación y uso del suelo.
- Iniciativas de actores que participan en la logística urbana:
  - d) Medidas de innovación tecnológica.
  - e) Infraestructura y sistemas de distribución urbana.

A continuación, se desarrollan los diferentes aspectos de interés sobre estas medidas e iniciativas que permitirán analizar y potenciar el desarrollo del comercio electrónico y la logística de distribución de última milla en las ciudades.

### **3.1. Medidas de intervención pública**

Hoy en día, además de tener en cuenta que la eficiencia en la distribución de mercancías desempeña un papel importante en la competitividad de las zonas urbanas, tanto en términos de ingresos como de empleo, resulta indispensable mejorar la calidad de vida y proporcionar mejores servicios a los ciudadanos dentro de un marco de ciudad sostenible a través de las intervenciones públicas, que generalmente apuntan a reequilibrar los costes y beneficios sociales. Por tanto, se hace necesario definir las prioridades de intervención pública y garantizar que las políticas desarrolladas sean compatibles con el contexto local. Los ciudadanos y los grupos de interés tienen grandes expectativas, tanto en términos de calidad como de cantidad (Garau y Pavan, 2018).

En la actualidad, los gobiernos de todos los niveles tienen dentro de sus principales prioridades los conceptos de sostenibilidad y ciudad inteligente, mediante el desarrollo de políticas y programas específicos que apuntan al desarrollo sostenible, el crecimiento económico y a una mejor calidad de vida para los ciudadanos (Ballas, 2013). Varias ciudades, incluidas Barcelona,

Madrid, París, Londres, Ámsterdam, Berlín, Manchester y Edimburgo, han emprendido diferentes proyectos de transformación e iniciativas de ciudades inteligentes para servir mejor a sus ciudadanos y mejorar su calidad de vida. Por lo tanto, la presencia y distribución de espacios, servicios y actividades mediante ciudades sostenibles inteligentes se ha convertido en una meta a conseguir por buena parte de las ciudades del mundo.

La cumbre mundial de ciudades sobre el cambio climático, C40 Cities, es una red de megaciudades del mundo comprometidas con erradicar el cambio climático. Las ciudades miembros (ver imagen) utilizan un enfoque basado en la ciencia y el intercambio de mejores prácticas para tomar las medidas urgentes y efectivas necesarias, con el fin de enfrentarse a la crisis climática y mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C, y con el objetivo de reducir colectivamente a la mitad las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030. Los alcaldes de C40 Cities están comprometidos con conseguir un aumento de la calidad de vida de sus ciudadanos, a través de la resiliencia, mejorar la calidad del aire que respiramos y adoptar medidas climáticas inclusivas para crear un futuro más saludable y sostenible. En 2019 se llevó a cabo la reunión de la cumbre de las C40 Cities, seleccionando como sede la ciudad de Copenhague.



Figura 28. Ciudades que componen C40 Cities  
Fuente: C40 Cities (2019)

El concepto de calidad de vida incluye diferentes componentes como la salud, el desarrollo personal, el entorno físico, los recursos naturales, la seguridad, la comodidad, la satisfacción personal de las personas con su entorno de vida y sus sentimientos con respecto a la vida (Garau *et al.*, 2018). Dentro de estos componentes que definen el concepto de calidad de vida, se consideran diferentes factores que están directamente influenciados por la actuación de la logística urbana de las grandes ciudades. En la figura 29 se recogen dichos factores dependientes de la

logística urbana. Entre ellos, cabe destacar la importancia de la accesibilidad, el bienestar emocional y social, la calidad de vida y las afecciones originadas al suelo, especialmente el urbano:



Figura 29. Componentes de la logística urbana que influyen en la calidad de vida en las ciudades

Fuente: elaboración propia a partir de Garau (2018)

A continuación, se detallan una serie de medidas y prácticas que se emplean, principalmente a nivel local, para corregir el desequilibrio entre el coste social y el beneficio social de la logística urbana. Estas medidas y prácticas relacionadas con la movilidad en las ciudades afectan a la eficiencia operativa de la logística urbana en general, y al desarrollo de las actividades de la distribución de última milla derivadas del comercio electrónico en particular.

### 3.1.1. Medidas reguladoras

Las medidas reguladoras establecen restricciones para controlar las actividades de los operadores de transporte con el objetivo de limitar el impacto negativo de los vehículos de reparto en las zonas urbanas (Letnik *et al.*, 2018). A continuación, se detallan las principales medidas regulatorias que afectan a la logística urbana.

#### 3.1.1.1. Restricciones de acceso temporales

Básicamente, consisten en imponer restricciones sobre los tiempos (frangas horarias) en que puede tener lugar la actividad de transporte de mercancías. La intención es reducir el tráfico de carga durante las horas pico en áreas urbanas o prohibir las entregas nocturnas para minimizar el impacto del ruido (Civitas, 2015).

Las limitaciones de acceso se utilizan, básicamente, para vehículos pesados y disminuir así la congestión, y, al mismo tiempo, mejorar el atractivo, la habitabilidad y la seguridad de los centros de las ciudades. Estas limitaciones tienen dos propósitos distintos (Comi *et al.*, 2008):

- Evitar la interferencia con el tráfico de automóviles en las horas punta en la ciudad.
- Evitar la interferencia con el tráfico peatonal en la ciudad.

En general, en la medida en que las ventanas de tiempo suponen una restricción para las actividades de entrega y recogida, producen una pérdida de eficiencia. Esto explica por qué los operadores logísticos no están a favor de esta medida. Un estudio sobre los impactos de las limitaciones de tiempo en las ciudades holandesas (Quak y de Koster, 2006) demostró que el aumento de las restricciones de tiempo en las actividades de los vehículos de transporte urbano produce un aumento de los costes para los operadores y un aumento de las emisiones de los vehículos con los consiguientes impactos negativos sobre el entorno.

Los principales tipos de restricciones de acceso de tiempo se pueden dividir en: restricciones de entrega durante el día, prohibiciones de entrega durante el día y entregas silenciosas durante la noche.

### **3.1.1.2. Regulaciones de estacionamiento**

El estacionamiento durante las operaciones de entrega y recogida de mercancías es muy problemático, especialmente en centros urbanos densos. La falta de espacio y la competencia de otros usuarios de la red de carreteras resultan en una escasez de plazas de aparcamiento disponibles y, por lo tanto, en la pérdida de tiempo para los conductores de reparto, que luego tienden a estacionar ilegalmente (Dablanc, 2015).

Para hacer frente a la situación, una posibilidad para los encargados de formular políticas es reservar áreas específicamente designadas como espacios de estacionamiento para vehículos de reparto, potenciando el uso de las zonas de carga y descarga. Una ciudad como Madrid (2019) dispone de 2621 reservas de estacionamiento para carga y descarga de mercancías en vía pública.

En ocasiones, la ubicación de las áreas de carga/descarga en muchas ciudades a menudo es inadecuada. Muchas zonas no son válidas para camiones y, a veces, las zonas reservadas están diseñadas de acuerdo con una visión fragmentada. Por ejemplo, a menudo se diseñan zonas de carga y descarga en respuesta a la demanda de un comerciante local, sin una planificación a gran escala que tenga en cuenta las necesidades de otros establecimientos cercanos. Las iniciativas más recientes han generado enfoques más eficientes. Se han implementado medidas especiales, también llamadas «zonas libres en horas punta», que son calles con estacionamiento o restricciones de parada durante las horas punta. Este tipo de medidas facilitan el movimiento de todos los vehículos al aumentar la capacidad de la carretera (Civitas, 2015).

Según la encuesta de la distribución urbana de la región de París (Dablanc, 2015), más del 50 % de las operaciones de los establecimientos encuestados se realizaron con un vehículo estacionado en doble fila, y más del 60 % con un vehículo estacionado ilegalmente (en un carril de autobús o bicicleta, en la acera). Esto conlleva varios costes: congestión de la red de carreteras, contaminación adicional y problemas de seguridad vial (tanto para el conductor de la entrega

como para los demás usuarios). Sin embargo, la mayoría de los conductores prefieren estacionarse ilegalmente que perder tiempo en una entrega.

Una forma de organizar y optimizar las operaciones de carga/descarga es proporcionar un número adecuado de zonas públicas de carga y descarga reservadas en la vía pública, correctamente ubicadas y dimensionadas para el número adecuado de vehículos de carga y descarga. En este sentido, resulta importante realizar una previsión realista para que, en cada ciudad, los vehículos de reparto puedan hacer un uso adecuado (Alho *et al.*, 2014).

Los principales tipos de medidas de regulación de estacionamiento son los siguientes: restricciones de carga y descarga, sistemas de reserva de estacionamiento de vehículos, tiempo compartido de espacios de estacionamiento y zonas libres en horas punta.

### **3.1.1.3. Restricciones ambientales**

Este tipo de medidas tiene como objetivo preservar la habitabilidad de los centros de las ciudades al tratar de reducir las externalidades negativas producidas por los vehículos de distribución urbana, tanto en términos de emisiones como de ruido. Estas estrategias tienen un doble efecto positivo: por un lado, reducen el impacto ambiental del tráfico de mercancías, mientras que, por otro lado, fomentan el uso de tecnologías limpias al promover el uso de vehículos eléctricos o de bajas emisiones para entregas urbanas (Civitas, 2015).

Las zonas de bajas emisiones (LEZ) tienen como objetivo promover la utilización de vehículos más limpios y reducir la cantidad de vehículos más antiguos y contaminantes que circulan en áreas del centro de la ciudad (Taniguchi *et al.*, 2014). La introducción de zonas de baja emisión puede prohibir todo el tráfico de vehículos, o solo de aquellos que no cumplan con un estándar ambiental mínimo (restricciones relacionadas con el motor y el consumo de combustible).

Muchas ciudades han puesto en marcha acciones que tienen como objetivo limitar o prohibir el acceso a ciertas zonas por parte de los vehículos más contaminantes.

En Europa existen 280 ciudades que han declarado zonas de bajas emisiones con restricción al tráfico (2020), de las cuales el mayor número de ellas se encuentra en el norte de Italia, Alemania y Países Bajos. En España solo Madrid y Barcelona presentan LEZ.

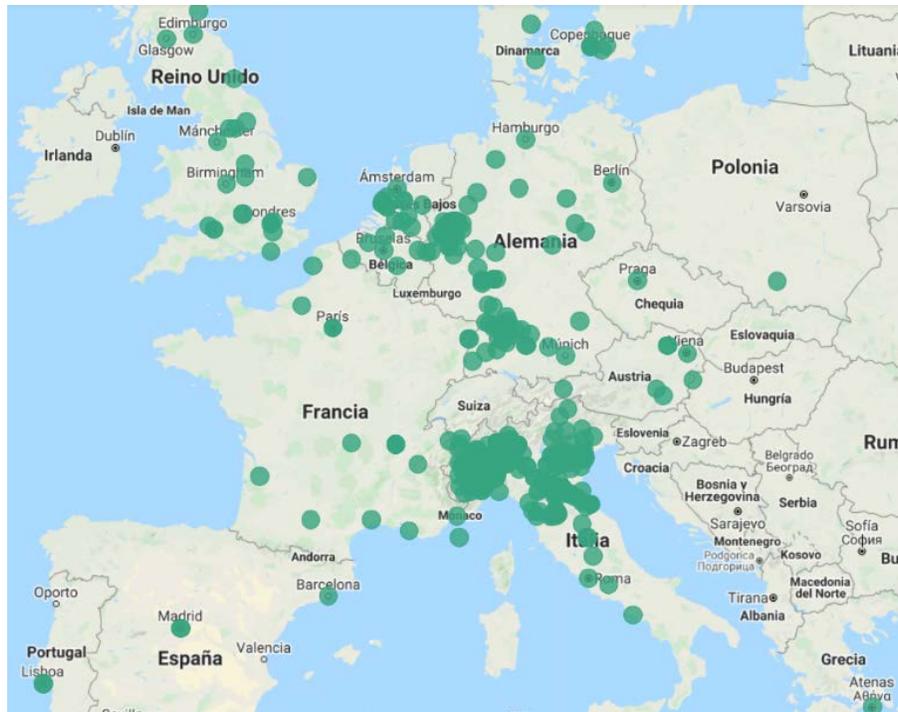


Figura 30. Zonas de bajas emisiones (LEZ) en Europa

Fuente: Urban Access Regulation by Map (<https://urbanaccessregulations.eu/userhome/map>)

En Londres, desde 2008, además de restringir el tráfico rodado al centro de la ciudad por medio de peajes que funcionan con un sistema de identificación de matrículas, se ha establecido una zona de emisión reducida que cubre la mayor parte del área metropolitana (1572 kilómetros cuadrados), y que afecta tanto al área central de la ciudad como a casi todos los distritos. Además, se ha puesto en marcha, desde abril de 2019, la zona ultrareducida de emisiones (ULEZ), siendo más restrictivos con el tipo de vehículos que pueden acceder (vehículos diésel anteriores a 2015) a esta zona. Esta nueva regulación no está exenta de polémica, ya que ha producido una reacción en contra por parte de los transportistas debido a que se verán obligados a realizar la inversión de una cantidad significativa de dinero para adquirir nuevos vehículos que les permitan adecuarse a los requisitos impuestos por la nueva normativa. Por supuesto, la necesidad de nuevas inversiones es crítica para los operadores logísticos ya que afecta negativamente a la rentabilidad de un negocio que ya se ve afectado por un estrecho margen de beneficios (Freight in the City, 2017).

En la ciudad de París, el sistema implantado por el Gobierno francés obliga a llevar una etiqueta ambiental en los vehículos y así acceder a determinadas zonas. Existen seis tipos de distintivos ecológicos (verde para vehículos «limpios» y del 2 al 6, según su nivel de contaminación ambiental) que permiten a la Policía controlar fácilmente el acceso y la circulación de vehículos en las zonas de bajas emisiones. Cada distintivo se expide con base al permiso de circulación del vehículo, e indica cómo de ruidoso y respetuoso con el medioambiente es el coche.

La ciudad de Berlín decidió la declaración de una zona ambiental, de acceso restringido, a partir del 01/01/2008. Esta ciudad, al igual que Londres, solo permite la entrada a los vehículos que cumplan ciertas normas en cuanto a la emisión de gases. Las prohibiciones dependen de varios factores (antigüedad del vehículo, norma EURO, tipo de combustible empleado, etc.). Esta área de bajas emisiones es una de las más restrictivas de toda Europa, ya que ocupa en total 88 kilómetros cuadrados.

Otros casos similares con zonas de bajas emisiones los encontramos en Ámsterdam, Roma, Lisboa, Stuttgart, etc. («Madrid Central: Así actúan otras ciudades contra la contaminación», 2019).

En la ciudad de Madrid se definió la zona de bajas emisiones Madrid Central, que comenzó a funcionar el viernes 30 de noviembre de 2018. Esta medida, rebautizada como Madrid 360 a partir del año 2020, restringe el acceso del vehículo privado al distrito Centro de la capital. El objetivo principal es favorecer la movilidad del peatón, las bicicletas y el transporte público. Los vehículos deben disponer de distintivos ambientales que los identifiquen (de menor a mayor contaminante: Cero, Eco, C y B), y en función de ellos pueden acceder a las 472 hectáreas de extensión.

Las principales medidas de restricción ambiental adoptadas son las siguientes: estándares de emisión y restricciones relacionadas con el motor, programas/regulaciones de ruido y zonas de baja emisión.

#### **3.1.1.4. Restricciones de acceso por tamaño o carga**

Este tipo de medidas tienen como objetivo aumentar la habitabilidad de las áreas urbanas y optimizar el uso del espacio público, específicamente de las calles públicas. Más específicamente, las restricciones que impiden que los vehículos de cierto peso o tamaño (largo o ancho) usen una calle o área en particular pueden generar beneficios en los niveles de congestión y en las tasas de accidentes de tránsito causados por camiones grandes. Estas iniciativas a menudo se implementan debido a las preocupaciones sobre la congestión percibida por los ciudadanos o los accidentes de tránsito producidos por vehículos de gran tonelaje. Al mismo tiempo, estas medidas van acompañadas de tasas que penalizan a los transportistas y que podrían experimentar un aumento en sus costes operativos (International Conference on City Logistics y Taniguchi, 2004).

Por otro lado, estas medidas generalmente inducen a la consolidación de carga en los centros de transporte y aumentan la eficiencia de las entregas urbanas. Sin embargo, las medidas de restricción del factor de carga no son fáciles de implementar (Civitas, 2015). En la ciudad de Madrid, por ejemplo, como norma general, se prohíbe la circulación de los camiones de 18 Tm en toda el área delimitada por la M-30, durante los días laborables y entre las 7 y las 22 horas (2021).

Las principales medidas de restricción de acceso a la carga/tamaño son: restricciones de peso y tamaño del vehículo, restricciones de factor de carga.

### **3.1.2. Medidas basadas en el mercado**

Las medidas políticas basadas en el mercado están utilizando mecanismos fiscalizadores que afectan a los precios para obligar a los operadores de transporte y a los clientes a cambiar su comportamiento dentro de la ciudad. Se ha comprobado que los cambios en los precios tienen un efecto directo en el comportamiento de los operadores de la industria logística, ya que el sector es altamente competitivo y con márgenes estrechos (Civitas, 2015).

A continuación, se detallan las principales medidas fiscales basadas en el mercado.

#### **3.1.2.1. Precios (peajes, tarifas de congestión y tarifas de estacionamiento)**

##### **Peajes por uso de carreteras**

Peajes por uso de carreteras: la necesidad de fijar precios para el uso de carreteras surge desde el punto de vista de que tanto los conductores como los operadores de transporte solo consideran dentro de sus propios costes algunos aspectos, como el tiempo de conducción, el kilometraje, el consumo de combustible y otros, pero no tienen en cuenta la cantidad de externalidades producidas (Holguín-Veras, 2010). La idea principal de la fijación de precios por el uso de las carreteras (peaje) es hacer que la escasa capacidad de la carretera esté sujeta al funcionamiento del mercado con la idea de distribuir mejor el volumen del tráfico a lo largo del tiempo para reducir la congestión.

En el caso del transporte realizado con vehículos, existe un amplio respaldo teórico y evidencia empírica que, de hecho, muestran que el peaje es una técnica efectiva de gestión de la demanda de transporte. Además, el pago de peajes no solo aumenta el bienestar económico ciudadano, sino que genera una cantidad significativa de ingresos para la Administración que podrían respaldar la inversión en transporte y en infraestructuras (Sullivan, 2002).

Una reducción en la congestión y un flujo de tráfico mejorado conducen a menos emisiones contaminantes, lo que podría ser un objetivo para la fijación de peajes. Por lo general, el peaje afecta a todos los participantes del tráfico y no solo al transporte urbano de mercancías, aunque los precios del peaje pueden discriminar entre el transporte de pasajeros y el de carga.

##### **Tarifas de congestión**

Se refiere a los peajes de carretera variables (precios más altos en condiciones de tráfico congestionado y precios más bajos, o libre circulación para franjas horarias de menor congestión del tráfico) establecidos en áreas centrales para reducir los volúmenes de tráfico durante los periodos pico. Los peajes pueden ser dinámicos, lo que significa que las tasas cambian según el nivel de congestión que exista en un momento determinado. Las tarifas de congestión son una de las

herramientas que, en sus distintas modalidades, han sido utilizadas por ciudades como Londres, Estocolmo, Singapur, Milán o Goteborg para tratar de solucionar el problema del tráfico.

La mayoría de los programas de este tipo delimitan una determinada zona de la ciudad, típicamente el centro, y establecen una tarifa por acceder al mismo que puede ser fija, como las 11,50 libras diarias que cuesta acceder al centro de Londres (2020), o dinámica y establecida en función del nivel de congestión, e instrumentada mediante diversos mecanismos, como cámaras de vigilancia, algoritmos de reconocimiento y lectura de matrículas, o dispositivos en los vehículos (Dans, 2019).

### **Tarifas de estacionamiento**

El principal desafío que afecta al estacionamiento de vehículos de carga en las ciudades es la falta de espacio, especialmente en los centros históricos. A través de esquemas de tarifas de estacionamiento, los conductores pagan directamente por usar los espacios de estacionamiento disponibles y señalizados en las ciudades. Las estrategias de fijación de precios intentan fomentar una rotación más rápida de vehículos para aumentar las posibilidades de aparcar. Este objetivo puede mejorarse imponiendo un límite máximo de estacionamiento o adoptando una estructura de tarifa creciente, en función del tiempo de estacionamiento (The City of New York, 2012). La implementación de medidas exitosas como la de San Francisco (2011) ha garantizado reducciones considerables de los tiempos de aparcamiento, mientras que el ajuste dinámico de los precios de estacionamiento ha logrado equilibrar la demanda y la oferta en diferentes barrios dentro de esta ciudad (Flores y Rayle, 2017).

#### **3.1.2.2. Impuestos, desgravaciones fiscales e incentivos**

En este caso, se pueden establecer impuestos sobre las emisiones del vehículo, el combustible utilizado, la propiedad o el uso del vehículo. Por el contrario, se pueden aplicar desgravaciones fiscales para la compra de vehículos nuevos (menos contaminantes) e incentivos para su uso (Civitas, 2015).

Con los programas de incentivos se busca fomentar las prácticas sostenibles, aplicándolos a uno o más participantes en la cadena de suministro, o utilizando incentivos tanto monetarios como no monetarios. En este contexto, es probable que la combinación de la aplicación de incentivos y la imposición de regulaciones tenga un impacto significativo en la mejora del comportamiento de los transportistas.

A modo de ejemplo, a continuación, se indican las propuestas de impuestos y desgravaciones consideradas por algunos autores (Mirhedayatian y Yan, 2018):

- Impuestos elevados para vehículos contaminantes y subsidio de compra para vehículos eléctricos: se otorga un subsidio directo para reducir el precio de compra de vehículos eléctricos (EV).

- Impuestos sobre vehículos con exenciones fiscales para vehículos eléctricos: existen dos tipos principales de impuestos sobre vehículos. Por una parte, el impuesto de matriculación del vehículo que se paga por la primera matriculación, y por otra, el impuesto anual de circulación, que se paga para usar el vehículo en la ciudad. Con una tasa de descuento (o de recarga) adecuada, estos dos impuestos pueden diseñarse para incentivar la compra y uso de vehículos menos contaminantes.

En el caso del Ayuntamiento de Madrid, existen distintos incentivos para el fomento de los vehículos menos contaminantes: bonificación del impuesto de vehículos de tracción mecánica, estacionamiento gratuito en el servicio de estacionamiento regulado, libre acceso a las áreas de prioridad residencial y, para el caso de vehículos industriales y comerciales, ampliación de 5 horas en operaciones de carga y descarga (Ayuntamiento de Madrid, s. f.).

Estas medidas tienen una afección económica importante para los operadores de transporte dentro de las ciudades, ya que les obliga a invertir en renovaciones de flota si desean beneficiarse de las desgravaciones fiscales o evitar impuestos elevados, que serían de aplicación solo si deciden mantener una flota de vehículos antigua.

### **3.1.2.3. Permisos negociables y créditos de movilidad**

Estas medidas implican la introducción de una estructura de precios basada en el modelo de créditos de movilidad para reducir los altos niveles de congestión y contaminación en los centros de las ciudades ocupadas. El modelo de créditos de movilidad establece la cantidad total de emisiones «aceptables» dentro de una zona específica de una ciudad y luego las asigna a operadores económicos como minoristas y ocupantes de oficinas para que puedan «comprar» servicios de transporte de carga que no están sujetos a servicios adicionales (Civitas, 2015).

Cuando los créditos se han agotado, se pueden comprar más créditos a la autoridad municipal o, si se ha establecido un mercado, a aquellos operadores económicos que tienen un excedente de créditos. Por lo tanto, proporciona un incentivo financiero para que los receptores de carga en los centros de las ciudades analicen y planifiquen cuidadosamente sus entregas con el fin de evitar exceder su presupuesto de crédito de movilidad.

La estructura de créditos negociables es un mecanismo de «atracción» que ha evolucionado durante un periodo de tiempo relativamente largo, particularmente en relación con el control de la contaminación, donde ha sido estudiado y utilizado en la práctica. Sin embargo, hasta la fecha, en el sector del transporte urbano no existen implementaciones significativas a gran escala de dicha estructura (Tian *et al.*, 2019). A modo de ejemplo, podemos considerar diferentes situaciones, como son las tasas de congestión basadas en créditos en Austin (Estados Unidos), un esquema de derechos de día de conducción negociable en Ciudad de México (México), los derechos de movilidad de Génova (Italia), y los derechos de conducción negociables en Lyon (Francia) (Fan y Jiang, 2013).

### 3.1.2.4. Medidas relacionadas con las infraestructuras y con la planificación del suelo

Las medidas de planificación del uso del suelo permiten recalificar el uso privado del espacio disponible en áreas urbanas para su utilización pública. No obstante, además del coste que conllevan, estas modificaciones solo pueden lograrse con una política consistente aplicada durante un largo periodo, debido al tiempo necesario para cambiar los patrones de uso del suelo existentes. Sin embargo, para ser efectivas, estas medidas requieren del desarrollo de políticas de planificación territoriales a largo plazo y dentro de contextos nacionales y locales específicos. Estas medidas de planificación del uso del suelo deben integrarse completamente en los planes de logística de la ciudad, los cuales constituyen los planes de transporte desarrollados específicamente para el sector de distribución urbana. Siguiendo lo expuesto por la UE en el proyecto Civitas (2015), se destacan las principales medidas relacionadas con las infraestructuras:

- Adaptación de las zonas de carga/descarga en las calles: pretende adaptar y ajustar la configuración actual de las calles y zonas de carga existentes al volumen de vehículos que realizan la distribución urbana. Las medidas se centran en asignar suficiente espacio en la calzada para realizar las actividades de estacionamiento y carga.



Figura 31. Calle de Nueva York utilizada para carga de paquetes (2019)

Fuente: *The New York Times* (<https://www.nytimes.com/2019/10/27/nyregion/nyc-amazon-delivery.html>)

- Códigos de edificación o normas de construcción: para garantizar que los nuevos locales comerciales proporcionen un espacio adecuado para el manejo y almacenamiento de mercancías. Al asegurarse de disponer de áreas de entrega o zonas de almacenamiento adecuadas fuera de la vía pública, se puede reducir el número de actividades de carga/descarga que causan congestión y obstrucción debido al gran número de camiones de reparto y la pesada carga relacionada en las vías públicas.

Los mercados, bares y restaurantes son los objetivos más relevantes de esta medida ya que generan entregas muy frecuentes.

- Áreas de entrega cercanas: el objetivo es dotar de espacios y áreas, fuera de la vía pública, situadas en negocios o instalaciones que reciben mercancía de forma regular. El establecimiento de áreas de carga comunes para sitios con mucho tráfico permite concentrar los vehículos en un espacio destinado para ello, de forma más organizada. Estas áreas pueden implementarse en estacionamientos públicos o privados, parcelas vacías u otros espacios que puedan acomodar una cantidad de vehículos de carga para realizar actividades de carga y descarga.



Figura 32. Centro de consolidación de Legazpi, Madrid (2015)

Fuente: Merchán y Blanco (2015)

## 3.2. Iniciativas de actores que participan en la DUM

### 3.2.1. Medidas de innovación tecnológica

La revisión de la literatura científica de los últimos años sobre la logística de la última milla para el desarrollo del *e-commerce* se centra en mejorar el servicio requerido por el cliente final y en reducir los costes de las externalidades del transporte. Estas innovaciones se pueden agrupar en cuatro categorías principales: innovación en los vehículos, puntos de recogida, colaboración en la logística urbana y algoritmos avanzados y optimización.

#### 3.2.1.1. Innovación en los vehículos

El desarrollo de la industria de vehículos y del transporte está evolucionando muy rápidamente y se espera que las grandes tendencias, como la digitalización, la automatización y la electrificación, tengan un gran impacto en la sociedad y en cómo evolucionará la planificación del transporte.

Las innovaciones introducidas en el mercado de vehículos han sido disruptivas: las nuevas tecnologías de motores, los vehículos autónomos y los nuevos medios de entrega son el verdadero motor de cambio que la industria automotriz ha presentado en los últimos años.

### **Vehículos menos contaminantes y vehículos autónomos**

Los vehículos eléctricos, híbridos y de pila de combustible de hidrógeno (FCEV) son innovaciones tecnológicas capaces de reducir las externalidades medioambientales provocadas por la distribución urbana de mercancías. La principal restricción de los vehículos eléctricos (VE) está, actualmente, relacionada con la autonomía de la batería y el amplio tiempo de carga necesario. La autonomía en la distribución urbana es un aspecto clave que ha ido mejorando de forma paulatina en los últimos años. Un estudio del Departamento de Eficiencia Energética y Energías Renovables de Estados Unidos (U. S. Department of Energy, 2020) refleja que la autonomía media de los coches eléctricos (Estados Unidos) ha pasado de 384 (2019) a 416 kilómetros (2020).

Entre los citados anteriormente, son los vehículos híbridos los más vendidos actualmente, ya que tienen un menor coste de inversión y una alta autonomía (combustible + batería eléctrica). Los vehículos eléctricos de categoría L (EL-V), como ciclomotores y motocicletas, así como vehículos de cuatro ruedas y otros pequeños (patinetes), constituyen otra propuesta innovadora con la introducción de medios ligeros para la movilidad y la entrega, muy adecuados para áreas urbanas. Estas alternativas son ágiles, con bajos impactos en la ciudad, necesitan poco espacio para estacionamiento y son útiles para entregar paquetes. Los EL-V, más pequeños y livianos que los medios tradicionales, son muy útiles para lograr estos objetivos porque reducen el tiempo de entrega sin necesidad de perder tiempo de estacionamiento, consumo de combustible, aire y emisiones de ruido.

Los costes de adquisición de los vehículos comerciales eléctricos son más caros que los vehículos diésel convencionales. Sin embargo, los costes operativos de los vehículos comerciales convencionales resultan más elevados que para los vehículos eléctricos (Davis y Figliozzi, 2013).

Los vehículos eléctricos, ya sean puramente eléctricos, enchufables o híbridos, se enfrentan, actualmente, a una serie de limitaciones relacionadas con los siguientes aspectos (Foltyński, 2014; Das *et al.*, 2020):

- Autonomía en kilómetros limitada.
- Tiempo de carga (en condiciones normales, 6-8 horas para carga completa).
- Red de infraestructuras de carga insuficiente.
- Altos costes de inversión (en comparación con vehículos convencionales).
- Falta de incentivos o incentivos insuficientes.
- Falta de información o desinformación.

- Evoluciones muy rápidas en los modelos y características de los vehículos.

Parece evidente que, en el futuro cercano, cada una de estas limitaciones podrá ser mejorada con la evolución de la tecnología y la apuesta de las Administraciones públicas por la implantación definitiva de vehículos no contaminantes. Dentro de las alternativas sostenibles basadas en vehículos con presencia humana, Machado de Oliveira *et al.* (2017) han identificado los principales tipos de vehículos que se han estudiado en los últimos años y que podrían utilizarse en la distribución urbana de mercancías de las ciudades para aumentar la sostenibilidad de esta actividad. La figura 33 recoge, a modo de resumen, la tipología de vehículos empleada en la distribución urbana de mercancías (DUM) para el desarrollo del comercio electrónico B2C. Los resultados indican una tendencia en la implementación de vehículos más pequeños y ligeros para realizar las entregas de última milla en áreas urbanas: el 42 % de los estudios sugieren, entre otras alternativas, el uso de bicicletas y patinetes, mientras que el 58 % de los artículos de investigación apoyan el uso de vehículos comerciales ligeros. Otra tendencia observada, para realizar este tipo de distribución, es la tendencia mayoritaria al cambio de combustibles fósiles convencionales por fuentes alternativas de energía (electricidad).

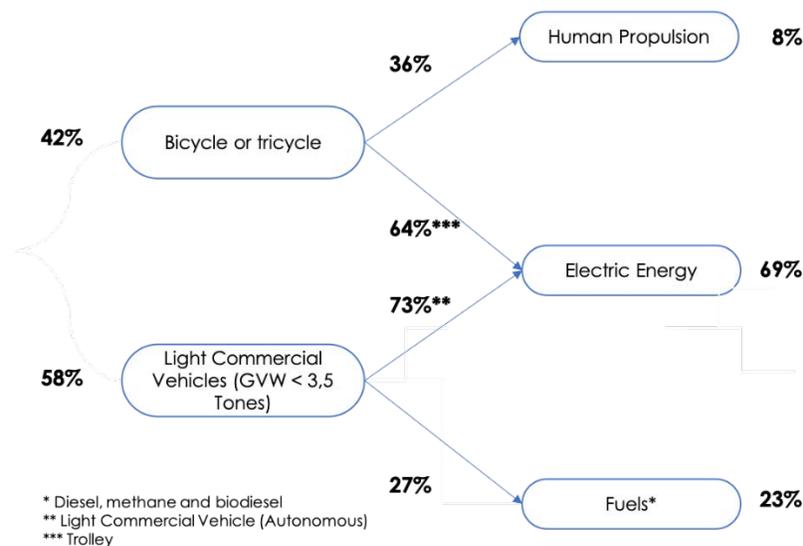


Figura 33. Tipos de vehículos utilizados en la distribución urbana  
 Fuente: Machado de Oliveira *et al.* (2017)

A medida que las ciudades ajustan sus estándares de emisiones, tiene sentido que el despliegue de vehículos eléctricos utilizados en la entrega de la última milla sea una de las primeras tecnologías en lograr una adopción significativa (Schroöder *et al.*, 2018). Se considera que los vehículos autónomos y los vehículos autónomos bajo demanda sean algunas de las tecnologías más atractivas para los próximos años. El grado de automatización puede variar en función de las necesidades y los condicionantes que existan para aplicar esta evolución hacia los vehículos

autónomos. Esto permitirá que los vehículos puedan ser guiados sin intervención humana (automatización completa) y que puedan coexistir con vehículos semiautónomos y vehículos no automatizados. Los vehículos totalmente autónomos están en fase de prueba y muchas empresas están invirtiendo actualmente en esta tecnología, incluyendo las actividades dedicadas al transporte de mercancías. No obstante, debe tenerse en cuenta que la difusión e implementación de vehículos autónomos puede verse afectada significativamente por la aceptación de la sociedad (Jing *et al.*, 2020).

Para Schröder *et al.* (2018), los vehículos de entrega autónomos (ADV) serán la tecnología dominante en este sentido, y tendrán una elevada influencia para reorganizar toda la industria. En los próximos años, se espera que los vehículos de entrega semiautónomos grandes que siguen al personal de entrega de paquetes sean la próxima tendencia a ser adoptada por las compañías en el segmento del comercio electrónico. Este es un primer paso hacia la automatización completa, el cual servirá de apoyo al personal de entrega y aumentará la productividad al reducir el tiempo necesario para conducir y estacionar camiones o furgonetas.

### **Vehículos autónomos no tripulados**

Derivados del sector militar, los sistemas autónomos y no tripulados se dividen en vehículos aéreos no tripulados (UAV), sistemas terrestres no tripulados y sistemas marítimos no tripulados. En los últimos años, la tecnología de los UAV, también denominados drones, ha captado una gran atención por parte de múltiples industrias interesadas en explotar su potencial para diferentes aplicaciones civiles: inspección, agricultura, topografía, respuesta a desastres naturales, etc. Se estima que el mercado de drones crezca de 4,4 mil millones (USD) en 2018 a 63,6 mil millones (USD) en 2025, con una tasa de crecimiento anual del 55,9 % (Markets Insider, 2019). Por otro lado, la investigación sobre la posible optimización en repartos intensivos también ha previsto problemas futuros en los que los drones podrían reemplazar o podrían usarse en combinación con las redes de distribución tradicionales en áreas urbanas.

Las principales empresas de logística, empresas líderes mundiales de comercio minorista y empresas tecnológicas más relevantes, están inmersas en una carrera por conseguir que los drones puedan entregar paquetes:

- Amazon con Amazon Prime Air (<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air>), 2021). Un cuadricóptero que volará de forma autónoma gracias a la información de sus sensores y a la aplicación de algoritmos de inteligencia de máquina avanzada. Los drones recorrerán una distancia de hasta 16 kilómetros y el servicio comenzará en áreas de baja densidad de población, zonas rurales o zonas residenciales en las afueras de las grandes ciudades, incluyendo un trayecto de ida y vuelta. Podrán repartir paquetes con un peso máximo de 2,7 kilos, tamaño medio del 75-90 % de los paquetes que el *marketplace* reparte en Estados Unidos.

- Google y Project Wing (<https://x.company/projects/wing>), 2019). Inician su trayectoria en Australia poniendo en marcha el primer servicio comercial del mundo. El servicio de drones mensajeros se utiliza para enviar productos desde los comercios locales. Alphabet ha establecido una alianza con cafeterías y farmacias cercanas para enviar comida, bebidas o medicamentos «en cuestión de minutos», según describe la compañía.
- DHL («DHL Express inicia entregas con drones urbanos automatizados en China», 2019). DHL, junto con la compañía de vehículos aéreos autónomos inteligentes EHang, han establecido una asociación estratégica para lanzar conjuntamente una solución de entrega, y totalmente automatizada e inteligente para abordar los desafíos de la última milla en el área urbana de Guangzhou (China).
- Uber Elevate (<https://www.uber.com/es/es-es/elevate>), 2020). Uber anunció que comenzará las pruebas de entrega a domicilio con drones mediante su popular aplicación de *delivery*. Estas pruebas se llevarán a cabo en la ciudad de San Diego, en Estados Unidos, y serán posibles gracias a que la compañía se adjudicó la aprobación de la Administración Federal de Aviación de ese país para formar parte del Programa Piloto de Integración para probar la primera aplicación comercial de entrega de alimentos a domicilio con drones.
- UPS Flight Forward (<https://es-us.ups.com/us/es/services/shipping-services/flight-forward-drones.page>), 2020). Cuenta con una aerolínea de drones con licencia para realizar envíos comerciales operando fuera de la línea visual del operador, sobre personas y sin límite de tamaño. En este caso, se realiza el transporte de muestras médicas a los laboratorios de pruebas en el hospital WakeMed de Carolina del Norte.
- Alibaba (Popular Science, 2019). Alibaba, la mayor empresa de comercio electrónico de China, está realizando entregas con aviones no tripulados en Shanghái. A través del *software* de su filial Ele.me, los drones de Alibaba recogen los alimentos y otros paquetes y los hacen volar hacia los puntos de entrega. Posteriormente, los conductores (personas) realizan la entrega final de los paquetes al cliente. Mediante el uso de drones, el servicio de entrega puede evitar las congestionadas carreteras de China, reduciendo el tiempo total de entrega a 20 minutos para los clientes.
- Walmart (Walmart, 2020). Walmart ha lanzado un proyecto piloto para la entrega de artículos esenciales y comestibles seleccionados de las tiendas Walmart, utilizando drones en Carolina del Norte. Además, están investigando cómo los drones llegan a un punto de intercambio de entrega, verificando su identidad a través del intercambio

inalámbrico de *blockchain* y luego transfiriendo la información de las entregas a otros drones.

A pesar de las indiscutibles fortalezas y oportunidades que presentan los drones en zonas urbanas, existen todavía numerosas barreras que es preciso eliminar para que el reparto urbano con drones pueda ser una realidad en muchas regiones. La limitada capacidad de envío de los UAV para áreas urbanas (2,5-5 kg), el limitado radio de vuelo, la indefinición y falta de unificación en la normativa de seguridad y en las autorizaciones de los vuelos, la dificultad en entornos urbanos para la entrega final de los paquetes, y la contaminación acústica generada por los drones, son algunos ejemplos de las limitaciones que actualmente presentan los drones en su aplicación logística para la ciudad (Roca-Riu y Menéndez, 2019).

En España, el Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, establece que los drones pueden utilizarse en cinco escenarios operativos, incluyendo la posibilidad de que vuelen también en entornos urbanos. A pesar de ello, existen actualmente diversos factores que dificultan su utilización: la exigencia de que un operador humano esté controlando en todo momento el dron, el peso máximo a transportar no puede superar los 10 kg, el campo de visión debe situarse a 100 metros de distancia, que pueda volar a un máximo de 120 metros y que exista una separación de 50 metros de cualquier persona o edificio. Todas estas restricciones imposibilitan que se hagan repartos en muchas de las calles de las grandes ciudades (sobre todo en ciudades históricas). Sin embargo, pueden ser útiles para alcanzar niveles de servicio más altos para áreas rurales y áreas suburbanas de baja densidad, que actualmente no pueden recibir algunos servicios establecidos para las áreas urbanas de alta densidad. Este es el caso de las entregas dentro del mismo día o la entrega instantánea debido a las restricciones de la tecnología disponible.

Con respecto a los vehículos terrestres no tripulados (autónomos) para el reparto en la ciudad, también se están produciendo investigaciones e interesantes proyectos piloto. Estos robots de reparto autónomos funcionan con motores eléctricos, tienen un conjunto de cámaras para permitir maniobrar por la vía pública u otros lugares, e identifican obstáculos en ruta hacia su destino. Disponen de sensores externos, un maletero para paquetes y cerradura para evitar el acceso no autorizado a la carga.

FedEx, por su parte, también estudia cómo repartir sus productos con robots terrestres autónomos. El robot se compone de una pequeña caja sobre 4 ruedas y está equipado con una cámara que cuenta con tecnología segura para los peatones mientras circula por las aceras y por la carretera a la hora de realizar las entregas a los clientes en la última milla. Además, existen otros proyectos en marcha como el de Starship, que propone el uso de sistemas terrestres no tripulados mediante robots avanzados que pueden transportar artículos dentro de un radio limitado de kilómetros. Los paquetes y alimentos se entregan directamente desde las tiendas, en el momento en que el cliente los solicita a través de una aplicación móvil, y son incorporados a la caja del robot para realizar el reparto correspondiente (Fortune, 2019; <https://www.starship.xyz>).

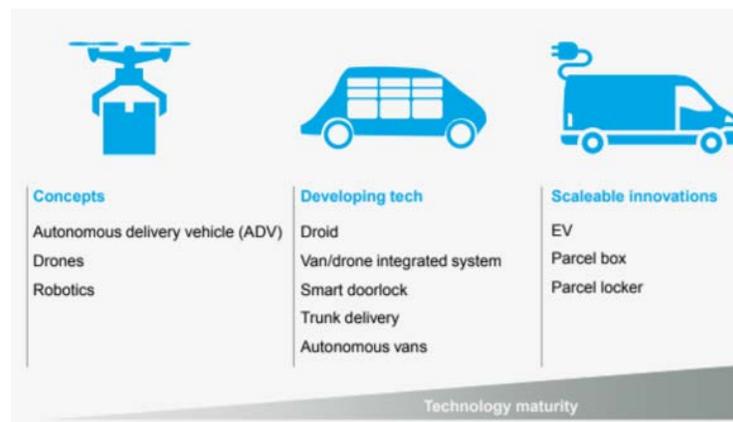
En la misma línea (ver figura 34), Neolix (<http://www.neolix.ai/index.html>), Nuro (<https://nuro.ai>), Udelv (<https://www.udelv.com>), y drive.ai (CNVC, 2019) trabajan en una especie de furgoneta robótica que circula de manera similar a los coches autónomos y sirve para hacer entregas y recogidas de pedidos (*robodeliveries*).



**Figura 34.** Furgonetas autónomas de Neolix y Nuro  
Fuente: Neolix (<http://www.neolix.ai/index.html>) y Nuro (<https://nuro.ai>)

Por seguridad, el compartimento de carga está bloqueado mecánicamente durante todo el viaje y solo lo puede abrir el destinatario con su aplicación para teléfono inteligente. Se realiza un seguimiento de la ubicación de los robots, para que sepa exactamente la ubicación de su pedido y reciba una notificación al momento de su llegada.

En la siguiente ilustración (figura 35) se muestra el desarrollo de las tecnologías clave que se está produciendo en la actualidad y su grado de madurez. Como es bien conocido, la tecnología más madura es la integrada por el uso de vehículos eléctricos de reparto, seguida del uso de vehículos autónomos y, finalmente, el uso de drones.



**Figura 35.** Características y grado de madurez de diferentes tecnologías en la última milla  
Fuente: Schröder *et al.* (2018)

### 3.2.1.2. Puntos de entrega

Las estaciones de proximidad o puntos de proximidad son enfoques innovadores para la entrega de la logística urbana, especialmente para el tamaño de productos pequeños y medianos relacionados con el comercio electrónico. Esta solución se basa en el concepto de un lugar donde los productos pueden almacenarse cuando los clientes no están en casa hasta que puedan realizar la recogida, evitando así el riesgo de una entrega fallida. Dentro de los más utilizados destacan:

- Buzones para paquetes: cajas de recepción, fijadas permanentemente a una pared fuera de la casa del cliente, a las que se puede acceder mediante una llave o un código electrónico; el cliente puede ser alertado de la entrega por teléfono móvil o correo electrónico; se utiliza principalmente para paquetes, pero se puede usar para alimentos si las cajas tienen temperatura controlada.
- Puntos de conveniencia, centros de recogida o puntos de entrega: consiste en una red de comercios o establecimientos físicos que sirven como lugares de entrega y de recogida de pedidos (oficinas de correos, locales minoristas o las propias tiendas físicas del vendedor). Lo fundamental de este método es que la red que ofrece el operador logístico o la tienda *online* sea amplia para que el desplazamiento a realizar para la recogida no sea demasiado grande. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de este método es el horario, ya que, aunque el repartidor no vaya a la casa del cliente ha de efectuar la entrega, y existe una dependencia del horario comercial para poder recoger el paquete.
- Taquillas inteligentes: actúan como una alternativa a la entrega a domicilio estándar y la idea principal detrás de las ellas es brindar comodidad a los clientes. Estas taquillas contienen casilleros para paquetes, de los cuales los clientes pueden recoger pedidos sin la ayuda del personal. Las taquillas suelen estar ubicadas en estaciones de transporte público, centros comerciales y otras áreas públicas, pero también en edificios de apartamentos y espacios de oficinas concurridos, y pueden ser accesibles para los clientes las 24 horas del día (en la mayoría de los casos). En la figura 36 se muestra, a modo de ejemplo, uno de los dispositivos instalados en los vestíbulos de las estaciones de transporte público de Madrid.



Figura 36. Taquilla inteligente instalada en Metro de Madrid.  
Fuente: Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

La tabla 7 muestra una comparativa de los conceptos de entrega presencial (directa) con entrega no presencial (indirecta). Para los tipos de entrega indirecta existe más flexibilidad en términos de tiempos de entrega, un mejor uso de la capacidad del vehículo y la mayoría de las entregas sin fallos, en comparación con la entrega directa de última milla, lo que resulta en un coste de entrega más bajo. Sin embargo, al mismo tiempo, los conceptos de entrega indirecta plantean nuevos desafíos en términos de los tipos de entregas permitidas y las capacidades limitadas en los lugares de entrega. Además, la inversión en estos equipos puede suponer un desembolso elevado al comienzo de la instalación (taquillas).

Tabla 7. Costes operativos (€) por paquete entregado en taquillas inteligentes

	Entrega presencial	Puntos de recogida, tiendas u oficinas de correos	Taquillas inteligentes
Tipo de entrega	Directa	Indirecta	Indirecta
Presencia del cliente	Sí	No	No
Tiempo de entrega	Ventana de tiempo ajustada	Horario comercial	Cualquier hora
Tipo de entregas	Todo tipo de entregas	Dependiendo de los medios de almacenamiento	Dependiendo del diseño de la taquilla
Capacidad del lugar de entrega	Sin límite	Limitada	Limitada
Recogida del cliente	-	Horario comercial	Cualquier hora
Utilización carga del vehículo	Pobre	Alta	Alta
N.º de entregas fallidas	Alta	Casi cero	Casi cero
Coste de entregas	Alto	Bajo	Bajo
Coste de inversión inicial	Bajo	Medio-bajo	Alto
Imprevistos	Presencia cliente, tiempo del viaje	Tiempo del viaje, tiempo de almacenamiento y capacidad disponible	Tiempo del viaje, tiempo de almacenamiento y capacidad disponible

Fuente: elaboración propia a partir de Rohmer y Gendron (2020)

Según un estudio realizado en Polonia (Iwan *et al.*, 2016), las razones para el uso de taquillas inteligentes son el bajo precio de las entregas, su disponibilidad y ubicación. Las expectativas más importantes de los usuarios de estas taquillas con respecto a la ubicación de las mismas incluyen estar cerca de casa o de camino al trabajo, y disponer de espacio de aparcamiento disponible. La ubicación de las taquillas es un factor determinante para permitir un mayor aprovechamiento de estos sistemas, tanto para las empresas de transporte como para los clientes. La idea es combinar los viajes de casa al trabajo o viajes de ocio con los viajes para llegar a la taquilla. Por tanto, los mejores lugares son supermercados, centros comerciales, estaciones de metro, estaciones de servicio, zonas peatonales, etc. El uso de taquillas tiene beneficios tanto para los consumidores como para los mensajeros y las empresas de transporte.

### **3.2.1.3. Algoritmos avanzados y optimización**

El desarrollo de las TIC (tecnologías de la información y comunicación), ITS (sistemas de transporte inteligente) y la industria 4.0 (con una gran cantidad de sensores, Internet de las cosas —IoT— y *big data*) se aplica tanto en los procesos operativos como en las infraestructuras y en los vehículos, permitiendo un enfoque diferente de la distribución urbana. El coste de los sensores se ha reducido considerablemente a lo largo de los últimos años, lo que permite adoptarlos para monitorear varios aspectos del vehículo y de sus trayectos. De igual forma, toda esta información generada se puede procesar para optimizar el desempeño ambiental, económico y social.

Siguiendo lo expuesto por un estudio realizado en la Universidad de Stanford (Lee *et al.*, 2016), se destacan las siguientes innovaciones en materia de algoritmos avanzados y optimización:

- Gestión de inventario integrada: los minoristas suelen tener inventarios en numerosos lugares distintos, incluidos los centros de distribución y las tiendas físicas. En el pasado, la mayoría de las cadenas minoristas administraban los inventarios de los pedidos *online* por separado de los inventarios de las tiendas. Sin embargo, se ha demostrado que actualmente las empresas pueden cumplir con los pedidos *online* de manera más rápida y, potencialmente, a un coste menor, cuando utilizan plataformas que gestionen el inventario de forma integrada, haciendo que el inventario en todas las ubicaciones esté disponible para todos los clientes. Con una plataforma de este tipo, los minoristas pueden proporcionar a los clientes información más precisa sobre la disponibilidad del producto y el tiempo de entrega esperado. También pueden cumplir con un pedido desde una ubicación más cercana al cliente, reduciendo así el tiempo de entrega. Asimismo, pueden ofrecer a los clientes la opción de comprar *online* y recoger en una tienda cercana (BOPIS), lo que podría evitar por completo a las empresas de reparto.

- Búsqueda y coincidencia de productos: la búsqueda y coincidencia de productos es relevante para las empresas intermediarias, que agrupan a compradores y vendedores y facilitan el intercambio de los artículos comprados. Los clientes utilizan el sitio web o la *app* del intermediario virtual para seleccionar los artículos que desean comprar.
- La analítica de datos avanzada puede ayudar a presentar los resultados de la búsqueda de una manera que aumente la probabilidad de que los clientes seleccionen artículos que generarán el mayor beneficio para la empresa intermediaria.
- *Task-courier matching* (coincidencia entre tareas y mensajería). Cuando se realiza un pedido *online*, la asignación de la empresa de mensajería para realizar la entrega de última milla depende de varios factores fundamentales. Entre ellos, podemos señalar como factores clave: la ubicación de los lugares de recogida y entrega, la franja horaria solicitada para realizar la entrega, el precio del servicio a realizar y la disponibilidad del operador logístico. La correspondencia entre tareas y mensajería identifica a la mejor persona para llevar a cabo un servicio de entrega. Una forma de hacer coincidir las tareas con los repartidores consiste en emplear un mecanismo de asignación centralizado que utilice un algoritmo de coincidencia teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente.
- Selección de la empresa de reparto: una vez que se preparan los artículos, se embalan, se etiquetan y se fija el precio del envío, comienza la función de las empresas de reparto y mensajería. Las empresas minoristas suelen tener varias opciones de mensajería, incluidas las empresas tradicionales y otros nuevos actores que realizan las funciones de reparto. Las soluciones de *software* avanzadas pueden ayudar a los minoristas a seleccionar el mejor servicio de mensajería para cada pedido en cuestión, según el precio, la velocidad y la disponibilidad de servicios, así como el seguimiento de pedidos.
- Optimización de rutas: el proceso de enrutamiento de vehículos (VRP) ha sido, durante varias décadas, uno de los problemas más estudiados en ingeniería logística, matemáticas aplicadas e informática. En realidad, se trata de un problema de optimización combinatoria y programación que encuentra la ruta óptima para entregar bienes y servicios a un conjunto finito de clientes. El objetivo es hallar las rutas óptimas para varios vehículos que visitan un conjunto de clientes geográficamente dispersos, partiendo desde un almacén o depósito concreto. Sin embargo, cabe preguntarse qué se entiende por «rutas óptimas». Si no existen otras limitaciones o condicionantes, la ruta óptima de reparto, con carácter general, será la de menor coste o la que implique una menor distancia total a recorrer. El proceso VRP presenta diversas variantes que tratan de ajustarse a la realidad cambiante e incluyen, entre otras (Ibrahim *et al.*, 2019): el problema del vendedor ambulante (TSP), el problema de generación de rutas para

vehículos capacitados (CVRP), el problema de generación de rutas periódicas para vehículos (PVRP), el problema de generación de rutas para vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), el problema de generación de rutas del vehículo con recogida y entrega (VRPPD), y el VRP con vehículos eléctricos (*green* VRP).

A continuación, una muestra gráfica (figura 37) en la que se esquematiza el problema de generación de rutas para vehículos capacitados para transportistas que tienen que atender tres rutas, haciendo uso de tres vehículos de transporte.

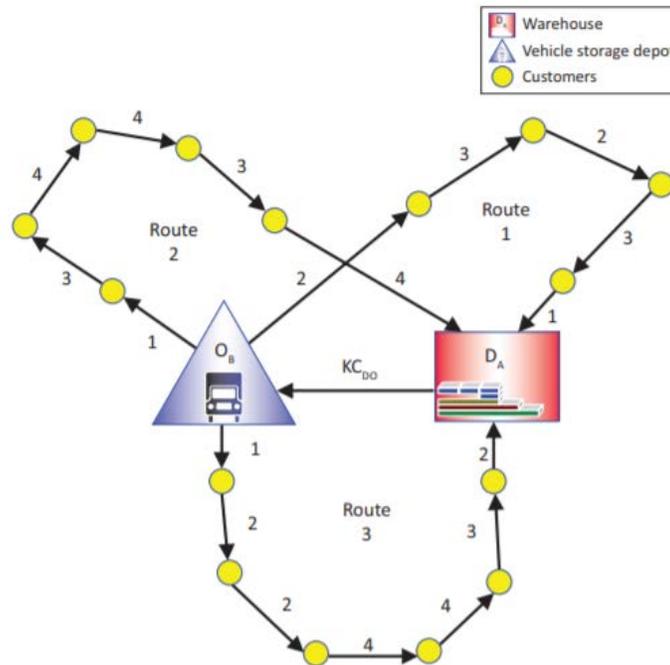


Figura 37. CVRP con tres transportistas y tres rutas distintas  
Fuente: Rojas-Cuevas *et al.* (2018)

Las rutas de entrega pueden ser estáticas o dinámicas. Una vez que se ha determinado una ruta estática, no cambia hasta que se completa. Por otro lado, los cambios en los requisitos de entrega y la información de tráfico se pueden utilizar para modificar una ruta dinámica en tiempo real. Si bien el enrutamiento dinámico permite a las empresas de entrega responder mejor a los requisitos y restricciones en evolución, debemos tener en cuenta que se requiere un sistema de retroalimentación oportuno y preciso, capaz de alimentar los datos de algoritmos de optimización avanzados. Actualmente, existen varios proveedores de soluciones que ofrecen herramientas para mejorar las rutas, en función de los requisitos de entrega, la disponibilidad del conductor y la capacidad disponible. Algunas herramientas también permiten que las empresas modifiquen dinámicamente la ruta de entrega, según la información de nuevos pedidos que se incorporan al sistema en tiempo real, así como otras actualizaciones relevantes. A través de los *softwares* de última generación y de la inteligencia artificial, las nuevas soluciones permiten a las empresas

determinar la mejor ruta posible con restricciones adicionales con respecto a los plazos de entrega esperados.

El enrutamiento dinámico también ofrece una mayor flexibilidad y ayuda a los operadores de transporte para responder mejor a las solicitudes de los clientes, como, por ejemplo, ante un cambio en la hora de entrega programada. Al informar a los conductores, en tiempo real, sobre los cambios en la ruta y al utilizar innovaciones como las *geovallas* (perímetro virtual de un área geográfica real), se permite que estos, a su vez, puedan informar a los clientes sobre el estado de la entrega y el proceso se vuelve mucho más eficiente y flexible. Los clientes valoran positivamente conocer cuándo deben estar en casa para aceptar una entrega y los conductores también valoran saber cuándo pueden omitir un lugar de entrega si el cliente no estará disponible para recogerla.

### **Comunicación con los clientes**

Actualmente existen varias herramientas que permiten a los minoristas y operadores de transporte actualizar la información destinada a los clientes sobre el estado de sus pedidos. Por ejemplo, se puede informar a los clientes de cuándo se ha enviado su pedido, así como de la fecha y hora de entrega previstas, según el caso. La información también puede enviarse mediante correo electrónico o mensaje de texto, con la confirmación de entrega y, a su vez, se pide valorar la calidad del servicio realizado. Alternativamente, los operadores logísticos también pueden notificar a los clientes cuándo un paquete está disponible para ser recogido en un lugar alternativo a su domicilio.

Al mismo tiempo, son varias empresas las que permiten a los clientes comunicarse con los operadores de transporte para que puedan personalizar la entrega en función de sus limitaciones y preferencias (seleccionar una fecha y hora de entrega preferidas, solicitar un cambio en la ubicación de entrega, retener el paquete en una oficina, proporcionar instrucciones de entrega específicas, etc.). Todas estas actuaciones están encaminadas a reducir la tasa de entregas fallidas en los repartos de *e-commerce*.

### **Previsión de demanda basada en datos (*data-driven demand forecast*)**

Así como los minoristas suelen utilizar análisis avanzados para pronosticar la demanda y determinar los niveles óptimos de inventario en cada ubicación de almacenamiento, los operadores de transporte pueden utilizar análisis avanzados para pronosticar la demanda de servicios de entrega. Para realizar este análisis, pueden emplearse datos anteriores, combinados con otra información de mercado, para predecir mejor el volumen futuro esperado de pedidos y planificar sus operaciones (por ejemplo, el número requerido de conductores, la programación de las entregas y la administración de vehículos). Las empresas que hacen uso de estos modelos de previsión utilizan herramientas de *machine learning*, inteligencia artificial e inteligencia de negocio para que las empresas de transporte también puedan compartir las predicciones de pedidos con sus socios minoristas, con el fin de ayudarlos a prepararse mejor de cara a la demanda futura.

#### 3.2.1.4. Colaboración en la logística urbana

El concepto principal de la logística colaborativa estriba en compartir los recursos, las infraestructuras y los medios de transporte para realizar las entregas en áreas urbanas y poder ayudar a aliviar los problemas asociados con la logística de la última milla en centros urbanos congestionados.

El objetivo fundamental de la logística urbana colaborativa es que los transportistas, fabricantes y proveedores de servicios logísticos mejoren de forma individual y (o) colectiva sus economías de escala/alcance en términos de eficiencia de la cadena de valor (coste logístico total en toda la cadena), productividad y eficacia general del sistema, sin comprometer su ventaja competitiva (de Souza *et al.*, 2014).

A diferencia de la colaboración vertical, que involucra socios posicionados en diferentes niveles de una cadena de suministro, la colaboración horizontal tiene como objetivo identificar y lograr situaciones de beneficio mutuo (por ejemplo, mejorar la optimización, la capacidad de carga y la utilización de activos) (Audy *et al.*, 2012) entre organizaciones que pueden o no ser competidores y que operan al mismo nivel de una misma cadena de suministro.

Los dos enfoques principales para la colaboración logística horizontal en la distribución urbana son el intercambio de pedidos y el intercambio de capacidad (Verdonck *et al.*, 2013):

- Intercambio de pedidos: implica el intercambio de solicitudes de servicios de transporte de los clientes entre participantes de una red cooperativa de transportistas, y se logra mediante una de las siguientes técnicas: planificación conjunta de rutas, mecanismos basados en subastas, intercambios bilaterales o esquemas de compensación, etc.
- Intercambio de capacidad de carga: significa compartir las capacidades de los vehículos, en lugar de las solicitudes de los clientes, donde cada transportista participante entrega su conjunto de pedidos de forma individual. Se puede compartir la consolidación de la carga para el mismo destino, compartiendo sus depósitos y flotas de satélites (red colaborativa).

Los beneficios obtenidos con tales asociaciones incluyen la reducción de los costes de las distancias recorridas hasta en un 16 %, de los costes ambientales en un 24 %, y aumentos del volumen de carga en un 25 % para los socios cooperantes, siendo la capacidad compartida el método más utilizado para la colaboración (Allen *et al.*, 2017).

Una idea reciente para resolver el problema de la última milla consiste en utilizar el concepto de economía colaborativa, en particular el *crowdsourcing*. En el contexto de la última milla, la sociedad y sus recursos aparecen como nuevos actores de la cadena de suministro. Estos operan involucrados en la prestación de servicios de envío de paquetes y en la creación de valor

logístico. Las empresas más importantes brindan dichos servicios a través de aplicaciones especiales, como Amazon Flex, Deliveroo, Uber eats, etc. Su desarrollo dinámico ha sido posible principalmente gracias a los dispositivos móviles y al acceso universal a Internet. Se relacionan principalmente con entregas urbanas rápidas y directas, por lo que son más un servicio complementario que competitivo para los operadores de transporte.

Atendiendo a la naturaleza del servicio logístico que se realice, se pueden distinguir cuatro tipos de logística de colaboración abierta o logística de *crowdsourcing* (Carbone *et al.*, 2017):

- Almacenamiento colaborativo (*crowd storage*): consiste en la provisión de espacios como sótanos, cuartos libres, garajes o patios. La mayoría de las ofertas se encuentran en las grandes ciudades, donde los altos precios inmobiliarios desplazan los espacios de almacenamiento comercial a las afueras. Este tipo de servicio colectivo brinda a los habitantes de la ciudad el acceso a un espacio de almacenamiento de proximidad de bajo coste, en el que los bienes (muebles, cajas, etc.) se pueden almacenar por periodos de tiempo variables.
- Entrega local colaborativa (*crowd local delivery*): la prestación de estos servicios se basa en la gestión compartida de los recursos de transporte a los que la comunidad tiene acceso y hace uso de las capacidades logísticas individuales, como recoger mercancías, conducir y entregar. Los recursos de transporte pueden ser furgonetas, automóviles, motos, bicicletas, transporte público o incluso peatones. Las iniciativas en este campo operan utilizando aplicaciones de teléfonos inteligentes y se encuentran principalmente en las grandes ciudades, donde miles de personas se mueven todos los días. La movilidad de esta multitud urbana permite ofrecer servicios de entrega rápida y de bajo coste, que son particularmente atractivos para la entrega de paquetería o comidas preparadas por restaurantes.
- Envío de cargas colaborativas (*crowd freight shipping*): ofrece servicios de envío de carga dentro de un país o continente. La prestación de estos servicios también depende de los recursos de transporte a los que tiene acceso la comunidad, principalmente vehículos de carretera (furgonetas y coches). El éxito de estas iniciativas depende de la capacidad de activar una red de conductores que puedan recoger, transportar y entregar los productos en el destino final a tiempo, ofreciendo una alta adaptabilidad a las necesidades del cliente (en términos de volumen, tipo de carga, etc.). El envío de carga colaborativa incluye tanto a los conductores profesionales empleados por empresas de mensajería, que tienen espacio y tiempo disponibles, entre dos entregas o viajes de regreso inactivos para completar, como a los conductores ocasionales.

- Actividades transitarias colaborativas (*crowd freight forwarding*): en este caso, se trata de iniciativas que operan utilizando motores de búsqueda capaces de asignar las solicitudes de los clientes a las ofertas disponibles de los viajeros con el mismo origen y destino. Los usuarios potenciales del servicio pueden colocar anuncios que informen a la comunidad colaborativa sobre sus propias necesidades de envío, mientras que los porteadores publican sus próximos itinerarios de viaje. Estas iniciativas se despliegan en todo el mundo y pueden tener cobertura global, aunque la mayoría de ellas están especializadas en algunas conexiones. El éxito de estas iniciativas depende de la capacidad de la comunidad para transportar los productos necesarios a nivel internacional. Sin embargo, pueden surgir riesgos importantes y responsabilidades inesperadas para los cargadores debido a las regulaciones aduaneras y las limitaciones de los viajes aéreos.

A continuación, en la tabla 8, se muestran las principales características de los cuatro tipos de logística de *crowdsourcing*, siendo los dos primeros los más empleados en la logística de distribución urbana:

Tabla 8. Características de los tipos de logística colaborativa

	Crowd storage	Crowd local delivery	Crowd freight shipping	Crowd freight forwarding
Types of items	Muebles No usado Pesados Archivos	Comida Paquetes	Tamaños raros Paquetes	Productos valiosos Productos ligeros Productos locales
Types of logistics connections	Proximidad	Local Corta distancia	Larga distancia (regional o continental)	Larga distancia (internacional o intercontinental)
Logistics value for users	Proximidad	Velocidad	Adaptabilidad	Accesibilidad
Logistics risk for users	Seguridad (mercancía) Accesibilidad	Falta de confianza en los actores (colaborativos)	Falta de confianza en los actores (colaborativos)	Fiabilidad del servicio (normativa de aduanas y transporte aéreo)
Crowd physical resources	Bodegas, <i>lofts</i> , habitaciones, garajes, patios	Coches, furgonetas, motocicletas, transporte público	<i>Cars</i> , furgonetas, camiones, autobuses, trenes	Aviones Barcos Equipaje
Crowd logistics capabilities	<i>Handling</i> Almacenar	Recoger Conducir <i>Riding</i> Entregar	Cargar Conducir Entregar	<i>Handling</i> <i>Packing</i> Gestión trámites Entregar
Logistics operational support by the platform	<i>Software</i> de cálculo de espacio	GPS <i>Software</i> de programación	GPS	Proceso aduanero
Logistics transactional support by the platform	Modelos de contrato de seguros	Sistema de precios Comprobación de permisos de conducción	Escala de precios Comprobación de permisos de conducción	<i>Software</i> de cálculo de derechos de aduana

Fuente: elaboración propia a partir de Carbone *et al.* (2017)

### 3.2.2. Infraestructuras y sistemas logísticos urbanos

Dentro de esta categoría de medidas se puede, a su vez, diferenciar entre dos principales alternativas: las vinculadas a las infraestructuras y las relacionadas con los sistemas logísticos multimodales.

#### 3.2.2.1. Infraestructuras o instalaciones logísticas urbanas

##### Centros urbanos de distribución, *hubs* urbanos o centros de consolidación urbana

Los centros de consolidación urbana (UCC) han sido estudiados durante muchos años en la literatura logística. Son instalaciones logísticas, cercanas a la ciudad, para llevar a cabo la consolidación de flujos de mercancías que, posteriormente, deben ser distribuidas en una región urbana, en una ciudad concreta, o en ubicaciones individuales (por ejemplo, centros comerciales).

En las UCC, al igual que sucede en las operaciones de *cross-docking*, los envíos de mercancías que se van a entregar a una región urbana se clasifican, consolidan y reparten. Los UCC tienen un papel central en muchos conceptos de soluciones para reducir el impacto del transporte urbano de mercancías. Un UCC ubicado en las afueras de la ciudad permite que los camiones entrantes descarguen sin entrar en ella y realicen el transporte de última milla de manera más eficiente y respetuosa con el medioambiente. Para aquellos casos en los que los camiones presentan una utilización deficiente de la capacidad transportada, se pueden obtener ganancias significativas de eficiencia agrupando las mercancías en un solo vehículo de reparto.

En este sentido, se pueden distinguir dos modelos de negocio relacionados con la gestión de los UCC (van Rooijen y Quak, 2010):

- Los transportistas subcontratan sus entregas urbanas a la UCC. En este caso, los costes de distribución de última milla son desproporcionadamente altos para los transportistas. Esto se debe a que las velocidades de cada viaje son bajas, la descarga requiere mucho tiempo, la capacidad de los camiones puede estar significativamente subutilizada y las regulaciones locales pueden ser restrictivas. A pesar de que existen incentivos para contratar las entregas al UCC, el precio de la subcontratación suele ser demasiado elevado para los transportistas.
- El receptor en el área urbana selecciona el UCC como su dirección de entrega. En este caso, pueden agruparse varias entregas en un único envío, por lo que el receptor dedica menos tiempo (y, por lo tanto, costes) a distribuir los productos. Sin embargo, como los costes de envío generalmente están incorporados en los precios de los pedidos, los costes de subcontratación generalmente exceden las ganancias de eficiencia.

A pesar de los beneficios teóricos, la gran mayoría de los UCC han fracasado en la práctica (Anderson *et al.*, 2005). Los UCC de la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey se cerraron después de cinco años de operaciones (Doig, 2001). Dablanc (2011) detalla que, de los 150 proyectos UCC que se iniciaron en Europa durante los últimos 25 años, solo cinco proyectos sobreviven. Incluso en el caso de sobrevivir, los UCC activos continúan teniendo dificultades para cubrir los gastos y requieren importantes subsidios de los gobiernos. Por ejemplo, a un UCC en La Rochelle le costaba 3,8 € entregar un paquete a un cliente al que se le cobraba solo entre 1,7-3 €. Un UCC en Mónaco cobraba a sus clientes 2,30 €/100 kg y recibía 2,59 €/100 kg como subsidio del gobierno local (Dablanc, 2008).

En la misma línea, Allen *et al.* (2012) recopilaron e identificaron 114 esquemas de UCC presentes en 17 países (12 en la UE y 5 fuera de la UE) que fueron objeto de estudio de viabilidad. Francia, Alemania, Italia, Países Bajos y Reino Unido acapararon la mayoría de las iniciativas

UCC que prestaron, o prestan, servicio en un área urbana, completa o parcialmente. Como conclusión, las UCC que operan adecuadamente presentan la capacidad tanto de mejorar el desempeño de la cadena de suministro como de reducir los impactos ambientales y sociales de la actividad de transporte de mercancías. Por tanto, pueden generar beneficios tanto internos como externos.

Tabla 9. UCC implantadas en 17 países durante el periodo 1970-2010

País	Desconocido	1970-1975	1976-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	Total
Austria					1			1
Bélgica					1			1
Canadá			1					1
Finlandia						1		1
Francia		1		5		3	2	11
Alemania				8	6			14
Italia					1	5	8	14
Japón	1		1			2		4
Mónaco			1					1
Países Bajos			2	3	1	1	7	14
Portugal					1			1
Eslovenia							1	1
España						1	2	3
Suecia					2	2	1	5
Suiza				2	1			3
Reino Unido		4	4	1	4	4	21	38
Estados Unidos		1						1
Total	1	6	9	19	18	19	42	114

Fuente: adaptado de Allen *et al.* (2012)

Por el contrario, los intentos fallidos a la hora de establecer centros de consolidación urbana presentan cinco errores en común:

1. Fueron desarrollados sobre la base de datos inexactos sobre la logística de la ciudad. Muchas de las iniciativas se centraron en la distribución a comercios. Sin embargo, eso solo constituye una pequeña parte de la logística de la ciudad y, a menudo, ya implica la operación de grupaje. Los principales flujos de transporte,

como los de construcción, eliminación de residuos, adquisición de gestión de instalaciones y la industria de la restauración, permanecieron fuera de este esquema.

2. Las soluciones propuestas no fueron solicitadas por los clientes. En algunos casos, incluso aumentaron los tiempos de entrega en un día adicional.
3. La solución logística de la ciudad mediante centros de distribución urbana terminó siendo más cara para los transportistas. Toda la cadena de distribución, desde el origen, pasando por el centro, hasta la entrega en la ciudad, fue mal concebida.
4. El modelo de ingresos para la logística de la ciudad no fue sólido y, por lo tanto, no logró alcanzar una masa crítica.
5. La situación política local resultó volátil, lo que perjudicó la consolidación de esquemas que requieren de una cierta continuidad.

Los costes adicionales, introducidos en la cadena de suministro, han demostrado ser una barrera importante y difícil de superar. La dependencia excesiva de los subsidios también es un problema común para las UCC. Las investigaciones más recientes revelan que combinar las operaciones de grupaje con iniciativas como las entregas fuera del horario de atención, así como proporcionar los incentivos adecuados, podrían ayudar a la adopción de este modelo por parte de los distintos usuarios (Marcucci y Gatta, 2017).

A modo de resumen, la tabla 10 muestra las ventajas e inconvenientes que presentan las UCC. La recopilación se realizó dentro del proyecto BESTUFS (Allen *et al.*, 2007), pero las conclusiones siguen estando vigentes en la actualidad.

Tabla 10. Ventajas e inconvenientes de la implantación de UCC en las ciudades

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beneficios ambientales y sociales de operaciones de transporte más eficientes y menos intrusivas</li> <li>• Mejor planificación e implementación de la operación logística</li> <li>• Oportunidad de introducir nuevos sistemas de información</li> <li>• Mejor control de inventario, disponibilidad de productos y servicio al cliente</li> <li>• Facilitar un cambio de la logística <i>push-pull</i> mediante un mejor control y visibilidad de la cadena de suministro</li> <li>• Potencial para vincularse con iniciativas normativas y de políticas más amplias</li> <li>• Beneficios de costes teóricos al subcontratar los beneficios de relaciones públicas de última milla para los participantes</li> <li>• Potencial para permitir un mejor uso de los recursos en los lugares de entrega</li> <li>• Ventajas de transporte específicas</li> <li>• Oportunidad para realizar actividades de valor agregado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes de instalación potencialmente altos (especialmente con los altos precios del suelo en áreas urbanas)</li> <li>• Complejidad en las actividades resultantes de los diferentes requisitos de almacenamiento y manipulación de una amplia gama de productos</li> <li>• Posible penalización de coste (y tiempo) por introducir un punto adicional en la cadena de suministro</li> <li>• La introducción de un punto de entrega adicional puede anular los ahorros de transporte para la distribución posterior</li> <li>• Problemas organizativos y contractuales</li> <li>• Potencial para crear situaciones de monopolio</li> <li>• Pérdida de la interfaz directa entre proveedores y clientes</li> </ul>

Fuente: adaptado de BESTUFS (Allen *et al.*, 2007)

### Microhubs

Este tipo de infraestructuras puede considerarse como un caso especial de UCC con una proximidad más cercana al punto de entrega y sirviendo a un rango más pequeño de área de servicio. Un *microhub* es una instalación logística donde los bienes/paquetes se agrupan dentro de los límites del área urbana, que sirve a un radio espacial limitado y que permite un cambio de modo a vehículos de bajas emisiones o modos de transporte limpios (por ejemplo, bicicletas o andarines) para el último tramo de entregas (University of Washington, 2020).

Las implementaciones de *microhub* tienen el potencial de aumentar la eficiencia en términos de tiempo, viajes y costes para las empresas de transporte. Los estudios han demostrado que el total de kilómetros por vehículos recorrido se reduce en áreas donde se han implementado instalaciones de *microhub* (Janjevic y Ndiaye, 2014).

Además, presentan otro tipo de ventajas en el reparto de la última milla:

- Reducen el tiempo operativo total para las empresas de transporte, a pesar de que se requieren tiempos de viaje más largos para completar todas las entregas. Esto es debido a que el tiempo de servicio (es decir, el tiempo para descargar el vehículo

y entregar el paquete al receptor) se reduce y esto compensa el tiempo invertido en cubrir rutas más largas (Lee *et al.*, 2019).

- Estas instalaciones de transporte urbano también permiten entregas fuera de horario, lo que puede ahorrar hasta un 35 % de los costes de distribución, debido a la mayor productividad de las cadenas de suministro urbanas (Holguín-Veras *et al.*, 2018).
- Los *microhubs* ofrecen la garantía de un área de descarga disponible y segura cerca del centro de la ciudad, donde existe una mayor competencia por el espacio limitado en la acera (Allen *et al.*, 2007).
- Los centros de las ciudades suelen ofrecer valores culturales y atracciones turísticas asociados a los lugares históricos, edificios e infraestructura. Por su parte, los *microhubs* permiten la preservación de sitios culturales en el centro de las ciudades porque reducen la cantidad de vehículos que ingresan a las áreas urbanas (Janjevic y Ndiaye, 2014).
- Tanto la seguridad del tráfico como el entorno comercial mejoran con el empleo de menos camiones grandes en la ciudad (van Rooijen y Quak, 2010).

#### *Modelos o iniciativas de microhubs*

Los proveedores de servicios logísticos pueden implementar diferentes modelos operativos para integrar los *microhubs* en sus operaciones de logística y cadena de suministro. Para determinar un modelo operativo, una consideración clave es si el *microhub* se utilizará únicamente para un operador o si se diseñará para permitir una combinación de esfuerzos de consolidación de múltiples operadores. A continuación, se muestran los sistemas logísticos con diferentes modelos operativos UCC (University of Washington, 2020):

- En este sistema, una empresa es la responsable de organizar esta forma de consolidación, pero solo esa empresa se beneficia de ella. Este modo de trabajo puede realizarse siguiendo las dos alternativas que se muestran en la figura 38:
  - El transporte de mercancías hacia el área urbana se inicia desde un camión situado a las afueras de la ciudad con destino a un *microhub* (móvil o estático) en horas valle. El camión pesado traslada todas las entregas del día correspondientes hasta el centro de la ciudad, a un *microhub* con una ubicación central en la ciudad y, posteriormente, se entregan los paquetes al destinatario final, de manera limpia. Para la entrega, se emplean vehículos con asistencia eléctrica o personas para completar las rondas de entrega.

- El transporte de mercancías hacia el área urbana se realiza desde un camión situado a las afueras de la ciudad a distintos «puntos de acceso». Estos puntos son tiendas minoristas o puntos de conveniencia donde los clientes pueden recoger o dejar sus paquetes. Aquí las entregas de la última milla las completan los clientes.

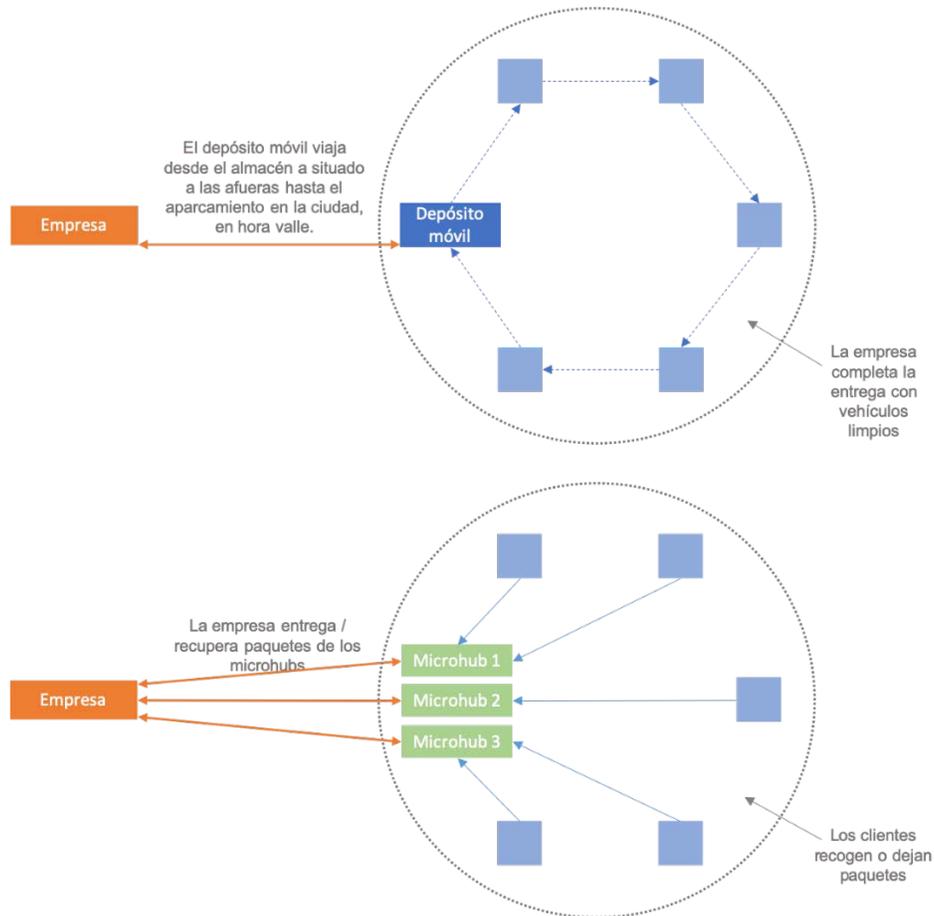


Figura 38. Modelo de consolidación UCC con un solo operador

Fuente: University of Washington (2020)

- Consolidación de múltiples operadores: el enfoque de las operaciones de consolidación de múltiples operadores es más difícil de organizar que la logística de un centro de un operador único porque requiere la cooperación entre las partes interesadas y no siempre está claro quién se beneficiará financieramente.

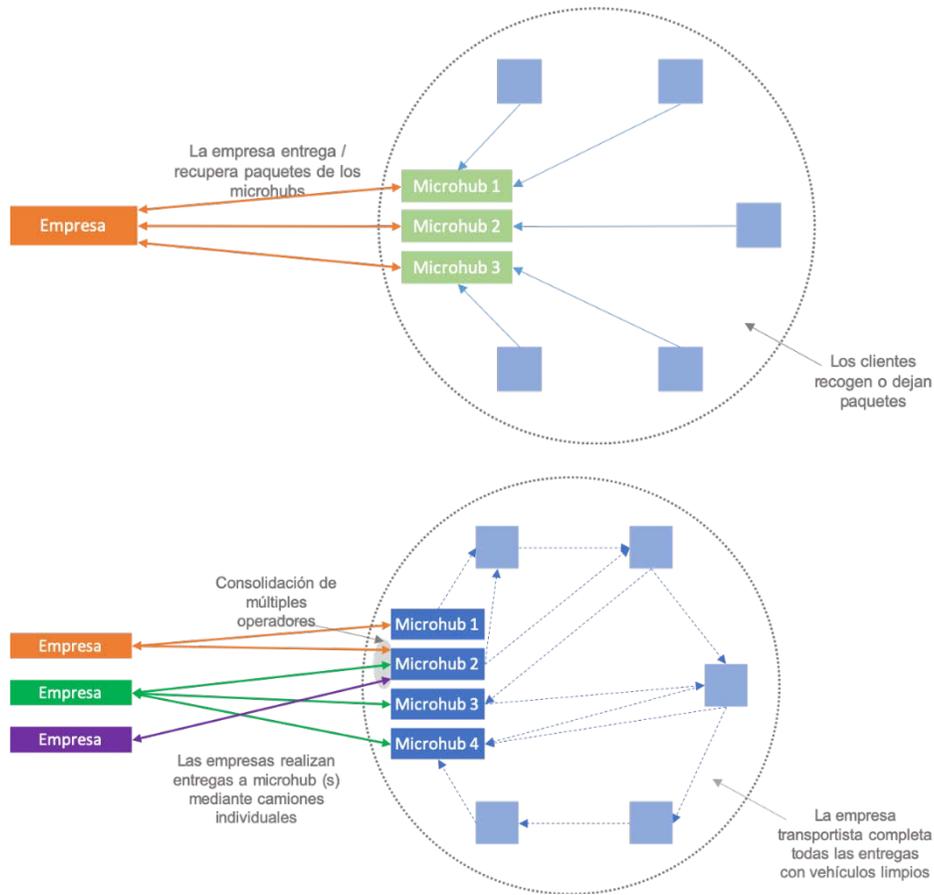


Figura 39. Modelo de consolidación UCC con múltiples operadores

Fuente: University of Washington (2020)

En la figura 39 se muestra cómo se configura un *microhub* para permitir la operación en el enfoque de consolidación de múltiples operadores. Se adopta un enfoque centrado en el receptor, que en la mayoría de los casos suelen ser tiendas y solicitan al LSP que reciba sus productos de los transportistas, los almacene y luego los entregue cuando el propietario de la tienda los necesite. Es un almacén colectivo de recepción y envío en nombre de distintos minoristas y otras organizaciones ubicadas en la ciudad. Este servicio está actualmente establecido en ocho ciudades de Países Bajos, incluidas Rotterdam y Utrecht. Las operaciones comenzaron en 2008 con 20 clientes, en su mayoría minoristas pequeños e independientes, y aumentaron a 98 tiendas conectadas en un año.

En el segundo caso de consolidación de múltiples operadores (figura 39), la configuración se produce cuando se implementan varios *microhubs* en la ciudad y algunos de ellos permiten la consolidación de múltiples operadores. En este modelo mixto, algunos *microhubs* reciben entregas de varias empresas y todas las entregas de última milla las realiza un solo operador. Un ejemplo es Gnewt Cargo, que completa las entregas a sus clientes como Hermes, TNT y minoristas en el

área mediante el uso de centros de microconsolidación en Londres, algunos de los cuales son compartidos por múltiples clientes (Clarke y Leonardi, 2017).

A continuación, en la figura 40, se muestran diversas iniciativas de *microhubs* incluyendo, entre otros, la localización, el enfoque de consolidación utilizado, el modo de entrega en la última milla y los resultados obtenidos.

	NAME	LOCATION	CONSOLIDATION APPROACH	OPERATION TYPE	LAST MILE DELIVERY MODE	GOVERNMENT CONTRIBUTION	REPORTED RESULTS
1	TNT Mobile Depot	Brussels, Belgium	Single carrier (TNT)	Mobile	Electric powered tricycles	Investment cost partly covered by European Commission	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduced pollutant emissions (CO2 by 24%, PM2.5 by 59%)</li> <li>•Reduced diesel kilometers miles traveled per stop from 1.34 km to 0.52 km</li> </ul>
2	UPS Access Point	Several locations	Single carrier (UPS)	Fixed	Customer pick-up drop-off	-	Unknown
3	Oslo City Hub	Oslo, Norway	Single carrier (DB Schenker)	Fixed	Electric powered tricycles and vans	Contribution of multiple public agencies at planning process	Unknown
4	Binnenstad service	Nijmegen, Netherlands	Multi-carrier	Fixed	Electric powered tricycles and natural gas trucks	Government subsidy for 1 year	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduced number of trucks and truck miles traveled in the city</li> <li>•Less inconvenience for residents</li> <li>•Reduced CO2 and pollutant emission by 40%</li> </ul>
5	Motomachi Shopping Street	Yokohama, Japan	Multi-carrier	Fixed	Natural gas trucks and human powered carts	Financial support for a prior pilot project	•Reduced number of trucks
6	Gnewt Cargo	London, United Kingdom	Multi-carrier	Fixed	Electric powered tricycles and vans	Operational funding of EUR 288,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Reduced CO2 emissions by 88% per parcel</li> <li>•Reduced total vehicle distance traveled by 52%</li> </ul>

Figura 40. Características y resultados de diferentes iniciativas de *microhubs*

Fuente: University of Washington (2020)

Durante 2019, el autor de la tesis participó en un estudio cualitativo sobre las principales ventajas, barreras y recomendaciones para la implementación de *microhubs* en las grandes ciudades. Esta iniciativa fue promovida por parte de CITET (Centro de Innovación para logística y Transporte de mercancías) y el Ayuntamiento de Madrid a través del proyecto MARES. El decálogo de recomendaciones se presenta a continuación:

## Decálogo de recomendaciones

1. Impulsar incentivos y herramientas para favorecer la colaboración horizontal entre pares o verticales, por ejemplo con el uso de plataformas tecnológicas.
2. Plantear a la administración pública que sea un agente facilitador de espacios destinados al uso como *micro-hub* pero sin intervención en su gestión.
3. Crear *micro-hubs* operados de manera independiente a los usuarios (p.e. fabricantes, operadores y repartidores) a través de entidades autónomas (p.e. *blind trust*) que actúen como torre de control y coordinen a los operadores de entrada y los de salida.
4. Definir reglas de uso iguales para todos, independientemente de su tamaño y según contratos de confidencialidad gestionados de forma imparcial que reduzcan el miedo por compartir: origen/destino de mercancías, conocimientos, tecnologías, etc.
5. Diseñar *micro-hubs* que pongan a disposición de sus usuarios múltiples servicios tanto para la logística de entrega (depósito de mercancías, puntos de recarga, etc) como para la logística inversa (puntos de recogida, etc).
6. Utilizar el tipo de *micro-hub* que más encaje en función del negocio: *B2C* (p.e. *e-commerce*) de 50m<sup>2</sup> a 400m<sup>2</sup> ó *B2B* (p.e. HORECA) de 800m<sup>2</sup> a 2.000m<sup>2</sup>.
7. Buscar la localización del *micro-hub* óptima en función del tipo de mercancías y destinatarios. Por regla general debe estar a no más de 2km del centro y a una milla del destino final de la entrega.
8. Promover la definición y uso de estándares (Comunicación, Identificación de Mercancías...) que favorezcan la interoperabilidad entre los diferentes agentes que participan en el *micro-hub*.
9. Aprovechar el uso de los *micro-hubs* para optimizar y asignar en tiempo y espacio preciso las rutas más eficientes y sostenibles para la entrega de mercancías al destinatario final.
10. Desarrollar una red de *hubs* interconectados que facilite la expansión del modelo y las entregas verdes socialmente sostenibles.

Figura 41. Decálogo de implementaciones de *microhubs* en Madrid  
Fuente: MARES y CITET (2019)

### 3.2.2.2. Sistemas logísticos urbanos o estructura de la cadena de suministro

A través de los sistemas logísticos urbanos se puede planificar, definir, seleccionar y evaluar diferentes escenarios que permitan encontrar resultados para dar soluciones y mejorar la situación de los grupos de interés relacionados con la logística urbana. Dentro de estos sistemas logísticos se encuentran: diseño de la cadena de suministro, terminales de mercancías urbanas, planificación urbana, estructuras de transporte urbano y diseño de redes (Olsson *et al.*, 2019).

En el contexto de esta tesis, los sistemas logísticos urbanos se concretan en los sistemas de transporte urbano ferroviario de mercancías, y en cómo, a través de ellos, podemos mejorar y dar respuesta a las ineficiencias que presenta la logística urbana.

## Capítulo 4. Logística urbana ferroviaria

---

Los sistemas de transporte subterráneo se han utilizado durante mucho tiempo para el transporte de pasajeros. El metro de Londres abrió por primera vez en 1863, el metro de Nueva York lleva utilizándose durante más de 110 años, y Metro de Madrid cumplió su centenario el 17 de octubre de 2019. Se pueden señalar dos razones principales para la aparición de sistemas de transportes metropolitanos (Haupt, 1981):

- A finales del siglo XIX, las ciudades crecían rápidamente y se hacían más pobladas y contaminadas.
- La aparición de las nuevas tecnologías permitió la construcción de túneles bajo tierra, así como la creación de vehículos de transporte masivo.

Actualmente, se pueden aplicar condiciones similares al transporte de mercancías. Según la Organización Mundial del Comercio (OMC, 2020), la demanda global de transporte de mercancías creció un 2,5 % de media anual para el periodo 2008-2019. Una vez superado el colapso por el efecto de la covid-19 en las economías, si se diera un crecimiento equivalente a partir de 2021, significaría que la demanda de transporte podría incrementarse más del 40 % entre 2015 y 2035. Medido en kilómetros por vehículo, casi la mitad del transporte de mercancías se realizará en áreas urbanas y afectará directamente a la entrega en la última milla.

La mayor parte del transporte terrestre de mercancías se realiza en camiones y furgonetas, incrementando la congestión del tráfico en la mayoría de las áreas urbanizadas de todo el mundo. Esto se traduce en que las cadenas de suministro sean menos eficientes y provoquen externalidades (contaminación del aire, ruido, reducen la seguridad del tráfico, cambio climático). La electrificación de camiones y vehículos comerciales puede ayudar a reducir las emisiones y la conducción automática puede reducir los costes, pero no reducir la congestión y el uso del espacio urbano.

Dentro de los sistemas logísticos urbanos para el transporte de mercancía, se pueden distinguir los sistemas logísticos subterráneos y los sistemas logísticos subterráneos a través del metro.

### Sistemas logísticos subterráneos (ULS o UFT)

Actualmente, en todo el mundo y a través de tuberías, se transportan grandes volúmenes de productos químicos y derivados del petróleo entre puertos y complejos industriales. Esto ocurre principalmente bajo tierra, lo que es seguro, fiable, rentable y con un impacto ambiental mínimo. Casi todos los hogares y comercios en las ciudades están conectados por tuberías para el suministro de agua potable y alcantarillado. A fecha de hoy, sería impensable que estos bienes fuesen transportados por cualquier otro medio (Visser, 2018).

Además, la tecnología de túneles ha avanzado sustancialmente con la invención de las tuneladoras. Por estas razones, una de las soluciones propuestas e investigadas es el transporte subterráneo de mercancías. El transporte subterráneo de carga (UFT), o los medios también llamados sistemas logísticos subterráneos (ULS), pueden convertirse en una alternativa, pero también en una forma complementaria a los modos de transporte existentes, como el transporte por carretera, ferrocarril y agua. El transporte de carga subterráneo puede realizarse en forma de transporte por tubería de cápsula cuando se trata de objetos más pequeños (menos de 1 m de diámetro), o bien para objetos más grandes en forma de vehículos individuales o trenes a través de túneles (Visser, 2018).

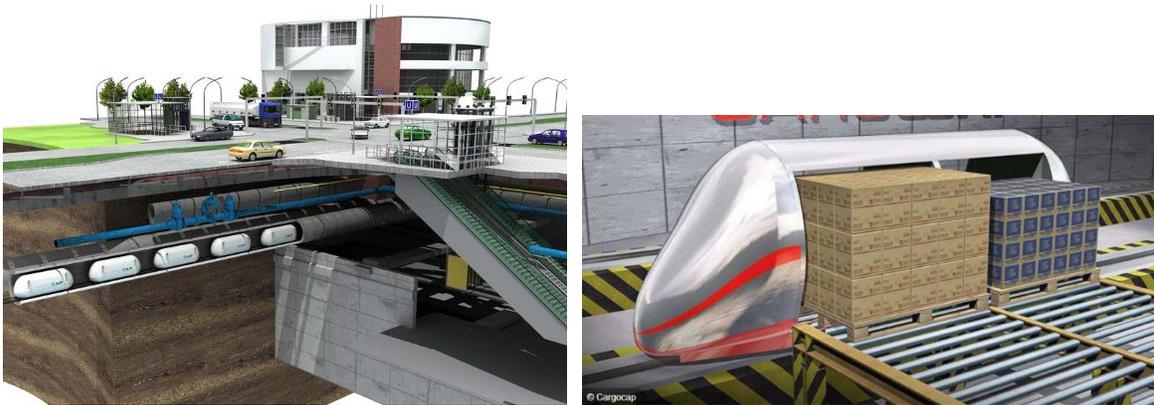


Figura 42. Cápsulas e infraestructura para el transporte de mercancías bajo tierra

Fuente: Cargo Cap (<http://www.cargocap.com>)

Con respecto al transporte de mercancías, la idea de utilizar el subsuelo para mover mercancías se remonta a la década de 1970, cuando el Departamento de Transportes de Estados Unidos financió la investigación sobre un túnel de carga. Esta investigación se dirigió principalmente a la aplicación de tuberías de carga en minería, refinerías y fábricas (U. S. Department of Transportation, 1976). Casi al mismo tiempo, la idea de utilizar túneles para el transporte de

mercancías se desarrolló en Europa y Japón. En 1977, la Asociación Británica de Investigación de Hidromecánica (BHRA) lanzó su primera prueba de tubería de cápsula neumática a gran escala. En 1982, Japón inició su primer túnel comercial de cápsulas neumáticas en Sumitomo (Liu, 2000). En Estados Unidos se desarrolló un sistema de transporte de cápsulas, llamado Subtrans (Feitelson y Verhoef, 2001), para el uso del transporte de correo y paquetes entre los centros de distribución de UPS, TNT y EMS y el aeropuerto de Newark, cerca de Nueva York. En Países Bajos, entre 1994 y 2001 se desarrollaron diferentes programas de investigación que profundizaron en la viabilidad técnica y financiera de los ULS en áreas urbanas, pero también se analizó el uso de ULS en aeropuertos, puertos marítimos y áreas industriales (Visser, 2018).

En el año 2013, Mole Solutions desarrolló un sistema de tuberías para el transporte de carga y un sistema para mover palés en el sector minorista. Esta compañía realizó un estudio de viabilidad para la ciudad de Northampton, Reino Unido. En la actualidad, avanza en la siguiente fase para implementar una prueba piloto y probar un sistema de tubería de carga completamente operativo (<https://www.molesolutions.co.uk>). CUIRE (Center for Underground Infrastructure Research Education), de la Universidad de Texas en Arlington, investigó la viabilidad de los sistemas de cápsulas de transporte entre ciudades, aeropuertos y para el tráfico de mercancías de larga distancia. Este programa de investigación, de varios años de duración, mostró que hay opciones para el futuro (Visser, 2018). Cargo Sous Terrain (CST), en Suiza, y el sistema JTC Underground Inter-Estate Goods Move, en Singapur, centran sus investigaciones en la construcción de un sistema de transporte subterráneo para áreas en las que no se pueden encontrar otras soluciones de transporte en la superficie. China ha investigado las tuberías de cápsulas de carga desde 2003, por ejemplo, para mover contenedores hacia y desde los puertos de Shanghái y para recolectar desechos en esta ciudad (Fan *et al.*, 2016).

Desde una perspectiva coste-beneficio, Taniguchi *et al.* (1999) estudiaron el sistema de transporte subterráneo de mercancías para intentar proponer soluciones en la logística urbana para el caso de Tokyo, concluyendo que, si bien el proyecto ayudaría a solventar muchos problemas urbanos, incluyendo congestión de tráfico, calidad del aire y accidentes, requeriría una cantidad muy elevada de inversión. Desde el punto de vista del gasto, los estudios incluyen los costes de construcción, los costes de mantenimiento y los costes de gestión de la red. Por la parte de los beneficios se consideran los ingresos por peajes por utilización de la red, realizando una estimación de los camiones que podrían sustituirse y utilizar en este sistema.

De forma más reciente (Visser, 2018), se señalan como ventajas de la ULS la posibilidad de la entrega (casi) directa, servicio 24 horas, costes de explotación bajos y tiempos de respuesta muy cortos. También se consideran otras ventajas que se refieren a la menor carga ambiental, como la reducción del ruido, la contaminación visual y las emisiones, la reducción de los problemas de congestión, la reducción del uso de energía y una reducción relacionada de las emisiones

de CO<sub>2</sub>. En cuanto a las desventajas observadas, se debe proporcionar una infraestructura subterránea completamente nueva. Esto requiere grandes inversiones, un largo tiempo de realización y un esfuerzo considerable de ajuste y coordinación con los grupos de interés.

Los sistemas de transporte subterráneo pueden tener una función importante como alternativa para el transporte por carretera, por ejemplo, en el desarrollo combinado del transporte de carga intermodal por ferrocarril o navegación interior y en el transporte de carga urbano. Las siguientes aplicaciones del transporte subterráneo de mercancías (tabla 11) se pueden encontrar en los estudios descritos anteriormente.

Tabla 11. Resumen de aplicaciones y ámbito de los sistemas ULS

Aplicación	¿Dónde?
En zonas urbanas, para aprovisionar oficinas de correos, comercio minorista, establecimientos de restauración, oficinas y consumidores. Transporte de unidades de carga de palés.	La viabilidad de esta aplicación ha sido investigada en ciudades holandesas, Japón (Tokio), China y Reino Unido (Londres).
Transporte de unidades de carga tales como palés, contenedores marítimos y palés de aviones. Dentro o entre complejos industriales, centros logísticos y terminales multimodales, como complejos de aeropuertos y puertos.	ULS Schiphol en Países Bajos (2000), UCM (2010) para el puerto de Amberes, UCFT (2016) en Shanghái y el Sistema de Transporte de Bienes Subterráneos y JTC en Singapur.
Recogida o transporte de larga distancia, como productos agrícolas, minerales y desechos sólidos. Tuberías de cápsulas en un sistema de transporte de larga distancia para piezas.	Japón, Estados Unidos y Rusia. Cargo Sous Terrain (CST) de Swiss.
Transporte al interior o al interior de contenedores marítimos.	Se han realizado estudios en Estados Unidos, Bélgica y Alemania.

Fuente: elaboración propia a partir de Visser (2018)

### Sistemas logísticos urbanos a través de metro o tranvía (M-ULS)

El transporte de mercancías por carretera es el modo que generalmente domina en las operaciones de entrega urbana. En un intento por mejorar la eficiencia de la distribución de mercancías en las ciudades y lograr y mejorar la sostenibilidad ambiental, las autoridades locales buscan políticas específicamente dirigidas a la logística urbana. Por lo general, estas políticas consisten en modelos de restricción de acceso que evitan que ciertas categorías de vehículos ingresen a áreas sensibles. Estos son, típicamente, los centros de las ciudades, donde se enfrentan varios desafíos simultáneos: la falta de espacio, la protección de la salud de los ciudadanos y la protección del patrimonio (Alessandrini *et al.*, 2012). Existen diferentes ineficiencias y costes asociados a la distribución urbana de mercancías que favorecen el uso de modelos alternativos (Ślaskowski *et al.*, 2014):

- La edad media de los vehículos utilizados en el transporte urbano de mercancías suele ser alta y ello conlleva mayor nivel de emisiones y menor seguridad en el tráfico.

- En zonas urbanas, los operadores logísticos están obligados a utilizar vehículos pequeños, debido a las dificultades de acceso, lo que se traduce en no poder utilizar economías de escala y, por tanto, requerir más viajes.
- Los conductores tienen que lidiar con restricciones de velocidad y otras obligaciones de conducción con respecto a las paradas y estacionamientos, lo que conduce a un mayor consumo de combustible y un aumento de emisiones contaminantes.
- Los vehículos industriales/comerciales generan problemas de congestión, ya que los vehículos motorizados comparten la misma infraestructura con otros no motorizados.

Con relación al transporte ferroviario, se han producido una serie de estudios y pruebas en los últimos años con el propósito de utilizar este medio de transporte de mercancías en diversas ciudades. Las razones para utilizar el ferrocarril para llevar a cabo la distribución urbana se definen como consecuencia de intentar minimizar el transporte por carretera en la logística de la ciudad. El transporte por carretera es uno de los medios más utilizados, pero también resulta más contaminante y menos sostenible, reforzando así la necesidad de entregar bienes de forma innovadora.

Muchas ciudades europeas disponen de una extensa infraestructura ferroviaria para cumplir con las funciones principales de transporte público, ya sea a través de un sistema de metro, trenes o una red de tranvías, existiendo cada vez más posibilidades de utilizar estos sistemas para el transporte de mercancías en el centro de las ciudades. A diferencia de la industria del transporte de mercancías por ferrocarril pesado, que necesitaría una considerable inversión, el transporte de mercancías a través del metro o tranvía utilizaría la infraestructura existente. No es necesario cambiar las infraestructuras del material rodante ni de las estaciones, aunque deben realizarse modificaciones y adaptaciones (Dampier y Marinov, 2015).

Los estudios sobre ULS llevan desarrollándose durante casi 50 años, pero no es abundante la literatura científica que aborda la distribución urbana a través de sistemas ferroviarios. Sin embargo, se encuentran más estudios destinados para el transporte de viajeros. Robinson y Mortimer (2004) señalaron el potencial de estos sistemas y su posible contribución a reducir la congestión del tráfico urbano al proporcionar una alternativa a la distribución por carretera. Para su posible implantación, es necesario que los costes operativos sean equiparables a los del transporte por carretera, se minimicen los conflictos entre el viajero y los trenes de carga, y se produzcan mejoras en las infraestructuras y la organización. Dampier y Marinov (2015) propusieron una nueva concepción de ULS, integrando el transporte subterráneo de mercancías en el sistema de metro de pasajeros (denominado M-ULS o sistema logístico subterráneo por metro), que ofrece una solución viable con un presupuesto limitado. Su ventaja no solo radica en los beneficios tradicionales de ULS para aliviar la congestión del tráfico, mejorar el entorno urbano y la

eficiencia del transporte de mercancías, sino que también contribuye a un gran ahorro del espacio subterráneo, reduciendo los costes y el periodo de construcción.

En los últimos años, los sistemas de intercambio de pasajeros y carga, que son diferentes de los tradicionales vehículos de carga dedicados, han recibido una atención cada vez mayor. De este modo, se introducen conceptos como *pooling* logístico (reutilización de recursos), flete en tránsito, entrega multimodal, uso del transporte público urbano para entregas, *cargo hitching* (transporte mixto de pasajeros y mercancías), integración de sistemas de transporte de pasajeros y de carga, etc. La combinación de los flujos de pasajeros y mercancías brinda la oportunidad de promover aún más las ganancias de eficiencia. Las estrategias de intercambio actuales para los servicios de carga se basan en modos de transporte público como el metro o autobuses (Cochrane *et al.*, 2017).

Otros estudios recientes han analizado la viabilidad y la eficiencia de utilizar el transporte público, como el metro y los tranvías, para la entrega urgente. Kikuta *et al.* (2012) estudiaron la integración del sistema de metro en Sappora, Japón, con el sistema tradicional de transporte por camión para facilitar la distribución de mercancías entre los barrios del centro de la ciudad. Diziain *et al.* (2014) compararon los sistemas urbanos de transporte intermodal de mercancías entre Francia y Japón. Estos sistemas son prometedores pero difíciles de implantar en la última milla ya que los servicios ferroviarios requieren de gran volumen, suponen altos costes y conllevan dificultades organizativas. Dampier y Marinov (2015) estudiaron la viabilidad del sistema de metro, en Tyne y Wear (Reino Unido), para entregar mercancías directamente en el centro de la ciudad. Arvidsson *et al.* (2016) revisaron el éxito y el fracaso de los sistemas de tranvía para el transporte urbano de mercancías y propusieron una solución de transporte multimodal de bajas emisiones utilizando este medio de transporte. El proyecto Cargo hitching (van Duin *et al.*, 2019) comenzó con el objetivo de utilizar la capacidad excedente del transporte público para el transporte de paquetes, y su viabilidad depende de poder incluir y valorar conceptos sociales como aportación a los clientes y a la sociedad. Por su parte, Jiang *et al.* (2020) concluyen que el metro es adecuado para la distribución en ciudades con una gran rotación de mercancías, mientras que los autobuses y los tranvías resultan más adecuados para la distribución en áreas con baja rotación de mercancías. En la sociedad actual, donde la eficiencia energética es cada vez más importante, el transporte urbano de mercancías basado en el metro es más competitivo que los autobuses y tranvías. La distribución de mercancías a través del metro puede aprovechar su alta capacidad de transporte, la alta velocidad de operación, su puntualidad y fiabilidad en los horarios y la baja contaminación ambiental producida.

Otros estudios se han centrado en la posibilidad de la distribución urbana a través del metro, la ubicación de los puntos de transferencia/consolidación y el problema de optimización de rutas. Así, Ghilas *et al.* (2013) estudiaron el problema de la entrega con rutas programadas fijas considerando ventanas de tiempo. A través de este análisis, se propone una programación

para un conjunto de vehículos para atender las solicitudes de transporte de mercancías, de manera que una parte del viaje se pueda realizar en un servicio de transporte programado de pasajeros. Behiri *et al.* (2018) identifican varios problemas de toma de decisiones relacionados con el transporte de mercancías urbano mediante el uso de la infraestructura ferroviaria en la ciudad. El problema abordado se refiere a una línea de cercanías en la que cada estación se puede utilizar como plataforma de carga/descarga de mercancías, teniendo en cuenta que la demanda de bienes se conoce de antemano. Galkin *et al.* (2019) abordan la integración de los sistemas de transporte público de carga y pasajeros y, a través de un modelo matemático, se examinan las cuestiones relativas a la posibilidad y el potencial de combinar el transporte por carretera con el transporte público para la entrega de mercancías. Mazzarino y Rubini (2019) estimaron el espacio excedente del sistema de transporte público, la demanda adecuada de carga, el flujo de carga y pasajeros, y estudiaron el ajuste de las rutas y los horarios. Zheng *et al.* (2021) analizan la integración de los sistemas de logística subterránea a través del metro con los vehículos de entrega terrestre y construyen un modelo de optimización de la ruta de entrega logística urbana basado en una línea de metro. Los resultados mostraron que el sistema propuesto tenía ventajas sobre la entrega tradicional por camión en términos de costes y garantía del servicio.

Existen estudios que han realizado simulaciones para demostrar la viabilidad de la integración de infraestructuras de transporte compartido entre pasajeros y mercancías en áreas urbanas (Motraghi y Marinov, 2012; Fatnassi *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2018). Ambrosino y Grazia (2005) propusieron una estructura de distribución de red compleja de cuatro niveles que incluye la ubicación de las instalaciones, el almacenamiento, el transbordo y las decisiones estratégicas. Con respecto al dimensionamiento y la planificación de la red del sistema M-ULS, Hörl *et al.* (2016) y Masson *et al.* (2017) llevaron a cabo análisis cualitativos del problema de ubicación de nodos del transporte de mercancías en una sola línea de metro. Dong *et al.* (2018) plantean un modelo de evaluación del volumen de carga subterránea considerando la capacidad del servicio, el flujo de carga y la accesibilidad, seleccionándose dos líneas del metro de Nanjing como caso para validar el método de planificación propuesto.

Basado en casos reales de implantación, a continuación, se analizan los principales casos sobre transporte urbano de mercancías por ferrocarril en Europa:

### **CityCargo (Ámsterdam)**

El proyecto de un tranvía de carga en Ámsterdam fue lanzado en 2007 por la empresa CityCargo, con el objetivo de reducir en un 50 % el número de camiones que circulaban por el centro de la ciudad (de 5000 a 2500 al día) y sustituirlos por tranvías, reduciendo así la contaminación en un 20 % (Marinov *et al.*, 2013). CityCargo Ámsterdam desarrolló una flota de vehículos menos contaminantes para entregar mercancías a través de las vías de tranvía no utilizadas de la ciudad (Halbur, 2008). Una vez en la ciudad, el reparto se completaba con una flota de furgonetas de reparto eléctricas para llevar las entregas individuales a su destino exacto (Leech, 2008).

Los tranvías de carga no interferían con los convoyes de viajeros y no utilizaban las mismas paradas. Tras la prueba piloto, CityCargo estimó que en 2008 operarían 50 tranvías y 400 coches eléctricos para abastecer tiendas, supermercados y el canal HORECA (HOteles, REstaurantes y CAFeterías) en el centro de Ámsterdam.

El piloto se desarrolló satisfactoriamente, ya que en cada operación de descarga se empleaban 10 minutos y cada tranvía de carga podía transportar la misma cantidad de mercancía que cuatro camiones. Finalmente se produjeron problemas financieros y la iniciativa del tranvía de carga de Ámsterdam se suspendió en 2009, ya que la ciudad se negó a contribuir con las vías adicionales de financiación necesarias.

### **Monoprix (París)**

La cadena de supermercados francesa Monoprix ha estado utilizando un sistema que combina vehículos ferroviarios y ecológicos (propulsados por gas natural) para suministrar productos no perecederos a sus supermercados desde noviembre de 2007. SAMADA (filial logística de Monoprix) trabajó en asociación con instituciones públicas francesas, donde el alcance del proyecto inicial era el suministro de tiendas con sede en París a través de los trenes regionales de pasajeros y complementar la entrega a través de camiones durante trayectos nocturnos (Marinov *et al.*, 2013).

El primer tren de Monoprix funcionó en noviembre de 2007. Se programó un tren por día, compuesto por 6 vagones, con destino a Bercy (allí se descargó el tren y se trasladaron los palés con mercancía a 14 camiones propulsados por gas natural para abastecer a las tiendas) desde el depósito de Monoprix en Combs-la-Ville y Lieusaint. Actualmente, el andén recibe un tren por día, desde la tarde del domingo hasta el jueves por la noche, con 17 vagones que transportan alrededor de 750 palés en promedio, los cuales se descargan, se escanean y se almacenan de forma temporal durante la noche. Posteriormente, los palés son cargados desde las 6 a. m. (de lunes a viernes), en los camiones que llegan a Bercy, después de haber entregado alimentos frescos desde otras plataformas refrigeradas. Finalmente, los 26 camiones se reutilizan tantas veces como sea necesario para entregar a las 94 tiendas en París (Delaître y de Barbeyrac, 2012).

### **Cargo-Tram (Zúrich)**

La red de tranvías de Zúrich es bastante extensa ya que da cobertura a la mayoría de los barrios de la ciudad. Esta gran red existente estimuló a ERZ (la empresa responsable de basuras y reciclaje en Zúrich) para utilizarla en el transporte de la basura voluminosa. ERZ ofreció esta idea innovadora a la empresa de tranvías VBZ y la puso inicialmente en práctica en 2003 con cuatro paradas (Marinov *et al.*, 2013). El proyecto cumplió con las expectativas de los destinatarios de ese servicio y por ello, ampliaron el número de estaciones a ocho en 2004. Finalmente, en marzo de 2005 se puso en funcionamiento la novena parada. Desde enero de 2005, Cargo-Tram también ha comenzado a recoger dispositivos eléctricos y electrónicos (Geroliminis y Daganzo, 2005).

En 2004, la entrega por Cargo-Tram redujo el transporte por carretera en 5020 km y provocó una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> (4911,3 kg), SO<sub>2</sub> (1,4 kg), NO<sub>x</sub> (80,6 kg), PM<sub>10</sub> (2,3 kg), VOC (4,2 kg) y CO (14,6 kg). El consumo de combustible diésel disminuyó en 37 500 litros por año, al evitar 960 horas de funcionamiento del camión (Marinov *et al.*, 2013). Actualmente, el servicio sigue en funcionamiento, a pesar de que se produjo una interrupción temporal durante 2020 por la llegada de la covid-19 ().

### **CarGo Tram (Dresde)**

Fue establecido por Volkswagen en colaboración con DVB, la empresa de transportes de Dresde. Desde marzo de 2001, el tranvía CarGo en Dresde conectaba la «Fábrica Transparente» de Volkswagen con su centro logístico, ubicado en Dresde-Friedrichstadt (Marinov *et al.*, 2013). La propuesta se simplificaba en un punto de salida, un operador de transporte y un punto de destino. El tranvía CarGo utilizaba la red ferroviaria pública y solo se tuvo que adecuar un espacio de la terminal. Se coordinaron los horarios de los trenes de mercancías y pasajeros, otorgando prioridad a los viajeros (<https://www.dvb.de/en-gb>). Un trayecto entre el centro logístico y la «Fábrica Transparente» duraba 15 minutos. La carga de la mercancía se realizaba mediante remolques laterales con cortina, de modo que permitía al tranvía cargarse en toda su longitud (cada viaje del tranvía CarGo equivale a tres camiones) (Marinov *et al.*, 2013). CarGo Tram ha surtido de repuestos a la fábrica de Volkswagen hasta enero de 2021. Con posterioridad a esta fecha, el fin de la producción del VW e-Golf y el diseño de un nuevo concepto logístico han dado como resultado que los tranvías ya no fueran necesarios.

### **Proyecto GüterBim (Viena)**

El objetivo era utilizar la red de transporte público existente en Viena para trasvasar parte del tráfico de mercancías de las carreteras al ferrocarril. El proyecto investigó diversas aplicaciones potenciales, por ejemplo, hospitales, tiendas y residuos y, en agosto de 2004, comenzó y se implementó en el contexto de una prueba piloto. En 2005 se probó una posible combinación de transporte de mercancías por ferrocarril y tranvía (transbordo de contenedores), con el fin de introducir una solución de logística urbana en ferrocarril para zonas densamente pobladas (Arvidsson y Browne, 2013). El 1 de enero de 2006 se añadió el proyecto GüterBim-Telematik, que se centró, principalmente, en la interconexión operativa de los sistemas de logística, pedidos y control de operaciones.

El 30 de junio de 2007 el proyecto se terminó de acuerdo con el plan inicial por no contar con los fondos públicos necesarios.

De los proyectos analizados, solo los planteados en el caso de Monoprix y de Zúrich están actualmente en funcionamiento. En el resto de los casos, las barreras identificadas, tanto en Ámsterdam como en Viena, estaban relacionadas con la inversión inicial requerida, la falta de

apoyo de las Administraciones públicas, la participación y colaboración de diferentes partes interesadas y las dificultades operativas. En el caso de Dresde, las razones se centran más en la definición de un nuevo modelo logístico en la planta de Volkswagen.

De forma general, la logística urbana ferroviaria se considera difícil de implantar ya que las distancias recorridas por los servicios ferroviarios de transporte urbano siguen siendo cortas y parecen ser difícilmente viables sin un apoyo financiero y organizativo en la fase de construcción del proyecto (González-Feliu, 2014). Los volúmenes transportados por los operadores logísticos de forma individual no son lo suficientemente grandes y se necesita la demanda de varios operadores para alcanzar los volúmenes requeridos para alcanzar la viabilidad económica (Dampier y Marinov, 2015). Existe una limitación operativa importante, la denominada entrega puerta a puerta, ya que requiere de otros modos complementarios de transporte para realizar la entrega final del pedido en el domicilio del cliente.

Hasta donde se ha podido investigar, en el marco de esta tesis, no se ha encontrado ninguna implantación real de la distribución urbana de mercancías a través de las infraestructuras de metro. Con el propósito de aportar más comprensión en este ámbito de conocimiento, la investigación aquí presentada se centra en la definición de un modelo concreto de servicio de reparto (a través de metro) de mercancías concretas (*e-commerce*) para una demanda concreta (*e-shoppers*).

## **PARTE II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**



## Capítulo 5. *Research gap*. Planteamiento del problema

---

Una vez que se ha realizado la revisión de los aspectos teóricos que enmarcan y contextualizan esta tesis, se procede a describir las bases metodológicas del trabajo empírico en el presente capítulo. Con tal propósito, se describen el *research gap*, los objetivos e hipótesis planteados en esta investigación, la metodología empleada, el modelo, sus variables y el diseño de las herramientas cuantitativas aplicadas.

Dentro del marco de esta investigación, el *research gap* o necesidad de investigación nace como consecuencia de abordar problemas que no han sido investigados hasta la fecha dentro del ámbito de la logística urbana ferroviaria. En nuestro caso, debido a la falta de estudios concretos e implantaciones de soluciones de logística urbana a través de metro, se plantea la investigación con el propósito de estudiar tres aspectos fundamentales que, al relacionarlos, condicionan la formulación del problema. Estos aspectos son: (i) ciudades, transformación digital y comercio electrónico, (ii) nuevos modelos de logística urbana para afrontar las demandas en el comercio electrónico, y (iii) externalidades generadas por estos modelos de logística urbana.

Con respecto a (i), las ciudades y el crecimiento del comercio electrónico, según Naciones Unidas (2018) el 55 % de las personas del mundo ya vive en ciudades y el porcentaje de urbanización crecerá hasta el 68 % para el año 2050. De forma paralela, en la última década se ha producido un notable crecimiento del uso de Internet por la población mundial, siendo uno de los instrumentos principales de cambio para la sociedad y, en consecuencia, también para las ciudades. En el caso de la UE-28, en 2018 la urbanización alcanzó el 74 % de la población, mientras que la proporción de hogares con acceso a Internet ha aumentado hasta el 89 %, unos 29 puntos porcentuales más que en 2008 (Eurostat, 2019b). A mayor penetración de Internet, mayor uso del comercio electrónico. Los consumidores, sin necesidad de desplazarse, tienen la oportunidad de elegir entre una gran cantidad de productos, comparar precios, elegir minoristas, comunicarse con vendedores y personalizar los productos necesarios. En este imparable creci-

miento del *e-commerce*, acrecentado por la situación de pandemia provocada por la covid-19, mientras las transacciones electrónicas viajan por la red, los bienes físicos comprados deben seguir transportándose hasta llegar al consumidor final.

En el caso del transporte de mercancías y la logística urbana (ii), la gran mayoría de servicios se realizan por carretera. En los 28 países de la UE, el 76,7 % de la Ton-km interior se realiza por este medio (Eurostat, 2019a), siendo del 95,1 % para España en el año 2017. En el caso de las ciudades, según la Organización Empresarial de Logística y Transporte de España, UNO (Peinado, 2019): «En un día normal las empresas entregan de media entre 350 000 y 400 000 paquetes en Madrid y los municipios de su región, siendo la región con más repartos por compras *online* de España, seguida de la provincia de Barcelona». La Dirección General de Tráfico (Gutiérrez, 2020) estima que el 20 % de la congestión viaria en las ciudades es consecuencia de la distribución urbana de mercancías y que la accidentabilidad es notablemente más elevada que en la del tráfico rodado convencional.

El sector de la logística califica de «colapso de la última milla» al sucederse, de forma simultánea, varios hechos: el aumento del comercio electrónico (acelerado de forma sobresaliente por la covid-19), el aumento de tráfico de la ciudad, la dispersión de los clientes y las restricciones para operar (transportar) que, cada vez más, se dan en las zonas urbanas. Se buscan soluciones y el sector plantea la necesidad de grandes cambios en sus procesos, donde la tecnología y nuevos modelos de reparto jueguen un papel fundamental.

En este sentido, la logística urbana presenta externalidades que deben ser cuantificadas (iii). La distribución física urbana constituye uno de los principales causantes de la congestión del tráfico en las ciudades, pudiendo también generar hasta un cuarto de las emisiones de CO<sub>2</sub>, un tercio de las emisiones de óxido de nitrógeno y la mitad de las partículas emitidas en el transporte dentro de las áreas metropolitanas (Dablanc, 2011). Con respecto al coste del tiempo perdido debido a la congestión del tráfico, así como a las ineficientes operaciones asociadas a la distribución urbana de mercancías, se cuantifica aproximadamente que el coste supone un 2 % del PIB en los países de la UE (European Commission, 2016b; AECOC, 2020).

Con relación a estas respuestas, se están poniendo encima de la mesa numerosas propuestas e iniciativas sostenibles relacionadas con la logística urbana. El propósito es favorecer la búsqueda de soluciones para la distribución urbana y poner el foco en su relación con el comercio electrónico, favoreciendo la creación de un modelo sostenible que integre los objetivos de las Administraciones locales con las necesidades de las empresas. La UE, a través del European Green Deal, apuesta por el desarrollo de nuevos conceptos de logística y cadena de suministro e innovación para una industria más competitiva y sostenible. La plataforma tecnológica europea ALICE (<https://www.etp-logistics.eu>) tiene como objetivo acelerar el despliegue de cadenas de suministro más eficientes, competitivas y sostenibles.

Teniendo en cuenta estos tres aspectos, la formulación del problema es el primer paso de la investigación. Una vez planteado el problema, hay que subdividirlo en las cuestiones implicadas tanto como sea posible (subproblemas u objetivos) y que nos permitan, en la búsqueda de su resolución, tratar de solventar el problema a investigar (Ander-Egg, 1985).



Figura 43. Etapas esenciales de una investigación  
Fuente: elaboración propia a partir de Ander-Egg (1985)

## 5.1. Objetivos de la investigación

Los objetivos de la presente investigación giran en torno al análisis de una solución sostenible de logística de la ciudad, a través de un nuevo modelo de distribución urbana de mercancías dentro de una gran urbe. En estas grandes ciudades, la posible utilización de las infraestructuras de los sistemas de transporte público, ya existentes, así como el empleo de sinergias para el reparto de última milla de mercancías del comercio electrónico, dependerá, en gran medida, de dos aspectos fundamentales:

- Su efectividad para reducir los costes operativos, cumplir con los plazos de entrega y mejorar el servicio al cliente de la demanda urbana (Leung *et al.*, 2000).
- Su capacidad para reducir las externalidades que actualmente se producen en esta actividad.

Partiendo de una falta de estudios que cuantifiquen el efecto socioeconómico-medioambiental de estos sistemas dentro del sector logístico, el planteamiento del problema es el siguiente: dentro del ámbito de las grandes ciudades, ¿puede considerarse un sistema de transporte público como el metro una alternativa eficiente y sostenible para la logística urbana en la era del comercio electrónico?

A continuación, se muestran una serie de objetivos que pretenden ayudar a dar respuesta a la pregunta de la investigación:

1. Determinar los retos a los que se enfrenta la logística urbana y la necesidad de incorporar nuevos modelos de reparto de mercancías.
2. Definir un nuevo modelo de reparto de última milla a través de un sistema de transporte público de viajeros como el metro.
3. Definir los requisitos técnicos u operativos que son necesarios para utilizar un transporte público como el metro para la distribución urbana de comercio electrónico B2C.

4. Analizar el nivel de demanda de paquetes (masa crítica) que justifique la utilización del metro como operador logístico urbano.
5. Cuantificar los beneficios económicos, medioambientales y sociales que se derivan de utilizar el transporte metropolitano para distribuir paquetes al centro de la ciudad.

## **5.2. Hipótesis de trabajo**

A partir de las hipótesis el investigador anticipa una explicación probable de los fenómenos o del hecho que se estudia y plantea respuestas al mismo. En las hipótesis se indican las expectativas del investigador con respecto a las relaciones entre las variables del estudio.

En nuestro estudio, la premisa de trabajo que barajamos es la siguiente:

«La red de Metro de Madrid puede ser considerada como un modelo alternativo eficiente para la distribución urbana de los pedidos de *e-commerce* desde el punto de vista económico, social y medioambiental».

# Capítulo 6. Diseño y métodos de la investigación

---

Esta investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo en el cual, dentro de su marco metodológico, se siguen los siguientes pasos: (i) se selecciona una idea, (ii) se transforma en una o varias preguntas de investigación relevantes que derivan en hipótesis y variables, (iii) se desarrolla un plan o modelo para probarlas, (iv) se miden las variables en un determinado contexto, (v) se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), y (vi) se establecen una serie de conclusiones respecto de la(s) hipótesis (Hernández *et al.*, 2014).

Con relación al alcance de la investigación, se considera como una investigación de tipo exploratoria-descriptiva. Exploratoria porque el tema o problema de investigación ha sido poco estudiado y nos permite ampliar el conocimiento sobre un fenómeno concreto para precisar mejor el problema a investigar. Descriptiva ya que, seleccionada una serie de conceptos y variables, podemos medirlas de forma independiente y describir el hecho que se investiga. Además, al estudiar con detalle las soluciones planteadas en logística urbana y las propuestas incipientes que se han realizado en este campo, tenemos una base para hipotetizar que el modelo propuesto es más eficiente que el modelo actual de distribución urbana en términos económicos, sociales y medioambientales.

La investigación también pretende describir diferentes aspectos de un nuevo modelo logístico de distribución urbana a través de la red metropolitana y, a la vez, medir el comportamiento de otras variables que describirán su funcionamiento teórico. Por lo tanto, el presente estudio busca definir y evaluar un nuevo modelo de reparto de mercancías urbano (esto último, a través de los costes operativos y costes externos), teniendo en cuenta los datos cuantitativos sobre variables previamente determinadas en el modelo y que permiten obtener un resultado que permita ratificar, o no, la hipótesis planteada.

## 6.1. Propuesta metodológica

En el presente epígrafe se expone con más detalle el método utilizado y los recursos empleados en la investigación para resolver el problema y comprobar la hipótesis planteada. La descripción de cada paso se muestra en la figura 44.



Figura 44. Pasos de la investigación

Fuente: elaboración propia

En primer lugar, se determina el modelo teórico de reparto de mercancías a través de la red de transportes de metro. Para ello, se definen las características de la red y de los trenes para concretar el funcionamiento del sistema de reparto y las variables que es necesario considerar. De igual forma, se definen las posibles alternativas de entrega que presenta el modelo.

A continuación, se establece la fórmula para cuantificar la demanda de paquetes de comercio electrónico por estación, tanto de viajeros de metro como de residentes cercanos a esas estaciones. Se consideran las posibles alternativas de entrega que presenta el modelo para cuantificar esta demanda.

En tercer lugar, para evaluar y valorar la idoneidad de las soluciones de logística urbana desde la perspectiva de los grupos de interés implicados, se considera adecuado utilizar un marco de análisis coste-eficacia. Sin embargo, ya que tanto los beneficios como los costes no son exclusivamente económicos, es conveniente ampliar la perspectiva y extenderlo a los costes sociales y a los costes medioambientales. El valor de esta herramienta es ayudar en la selección de las mejores alternativas del modelo en beneficio de la economía, la sociedad y el planeta.

En cuarto lugar, se detallan los factores de demanda y las funciones operativas que afectan y que son necesarios para la evaluación del modelo. Por último, se plantea el caso de estudio y se cuantifican los costes externos (sociales y medioambientales) y operativos del modelo, y se comparan con el modelo de referencia actual.

Para el análisis de la problemática de nuestra investigación, la figura 45 muestra el marco metodológico utilizado, donde se describen los pasos, procedimientos y fuentes de datos empleadas para resolver la hipótesis planteada. Es importante señalar que las fuentes de información empleadas se corresponden con datos de organismos oficiales.

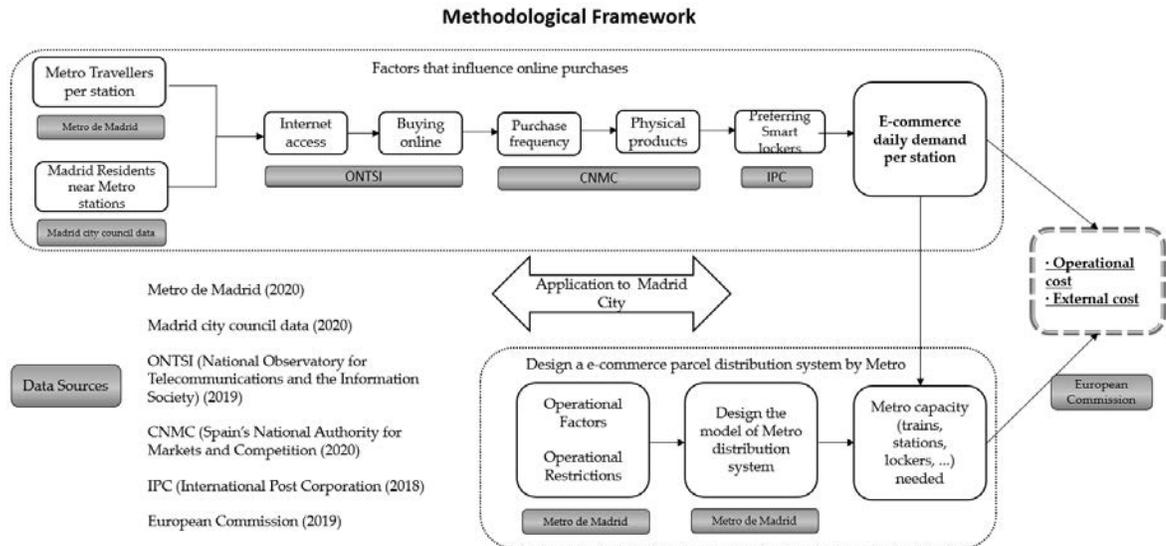


Figura 45. Marco metodológico

Fuente: elaboración propia

## 6.2. Definición del modelo de reparto en la última milla: modelo M4G

Un modelo de negocio muestra lo esencial (la intención estratégica) de la forma de hacer negocios en términos de las partes interesadas que crean e intercambian objetos de valor entre sí, mientras que un modelo de proceso de negocio muestra decisiones sobre los aspectos operativos de una forma de hacer negocios. El objetivo de un modelo de proceso de negocio es aclarar cómo los procesos deben ser realizados y por quién (Gordijn *et al.*, 2000). Este concepto de modelo de negocio no es exclusivo de uno u otro segmento o sector y puede aplicarse a múltiples situaciones, incluida la distribución urbana de mercancías.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es desarrollar un modelo del proceso de reparto de paquetes *e-commerce* a través de la red de Metro de Madrid y presentar una comparativa sobre los diferentes modelos existentes para la entrega de paquetes de comercio *online* en la última milla. El citado modelo propuesto se denomina M4G (*Metro For Goods*).

En general, el propósito de crear un modelo es ayudar a comprender, describir o predecir cómo funcionan las cosas en el mundo real mediante la exploración de una representación simplificada de una entidad o fenómeno en particular. Por tanto, en nuestro caso, la representación del modelo ayudará a comprender, describir y predecir la «actividad logística de reparto de paquetes, generados por la actividad de *e-commerce*, a través del sistema de transporte público de Metro».

### 6.2.1. Diseño de un sistema de distribución física basado en una red de transporte de metro: M4G

Antes de describir el modelo M4G, se representa un diagrama de procesos del *modelo actual de reparto e-commerce B2C* con entrega a domicilio, donde se explican las principales actividades realizadas:

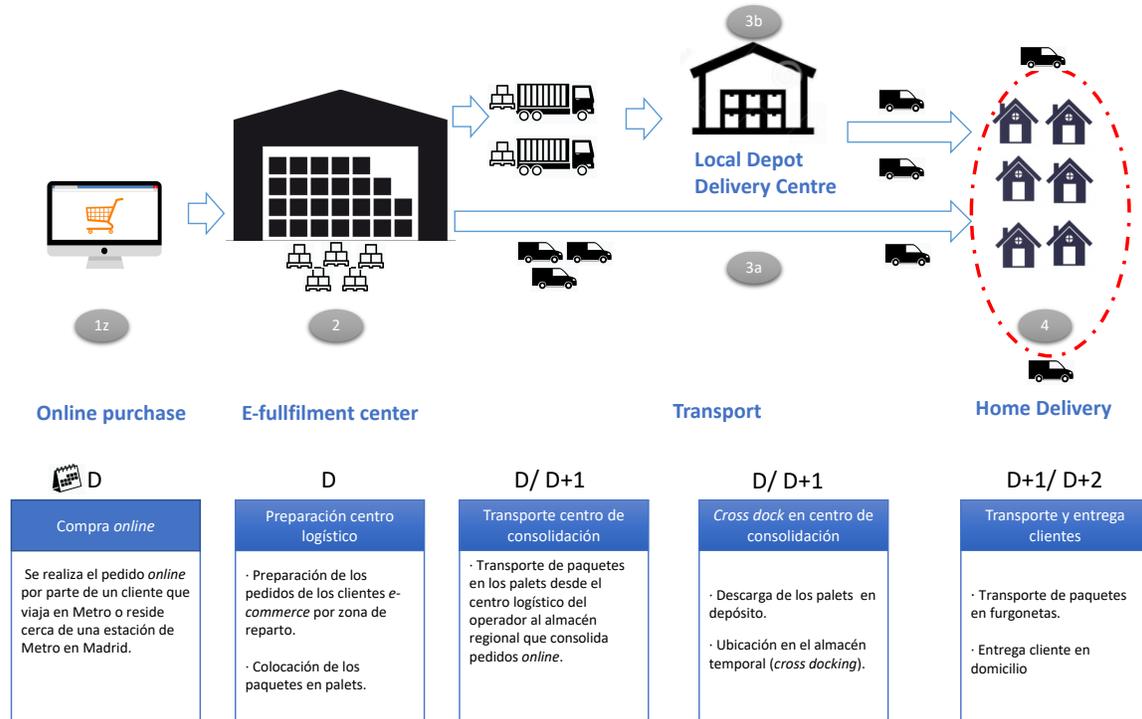


Figura 46. Modelo actual de reparto de *e-commerce*

Fuente: elaboración propia

1. Se realiza el pedido *online* por un residente y selecciona entrega en su domicilio.
2. Se procesa el pedido en el *e-fulfillment center* (centro logístico o centro de consolidación del minorista o del operador logístico, situado en las afueras de la ciudad). En el *e-fulfillment center* se prepara el paquete y está listo para el transporte.
3. Transporte desde el centro logístico hasta el domicilio del cliente. Dos opciones:
  - i. Un camión pesado desde el centro logístico hasta un almacén local o centro de consolidación más cercano al centro de la ciudad (*local depot*). Posteriormente se clasifica el pedido y se envía al domicilio del cliente mediante furgonetas (LCV, *light comercial vehicle*).

- ii. El LCV tiene su origen en el centro logístico (*e-fulfillment*) y envía directamente al domicilio del cliente. Esta es la opción que se considera en la comparativa de este estudio.

4. Se entrega el pedido de *e-commerce* en el domicilio del cliente.

**Modelo M4G:** previamente, es necesario introducir algunos conceptos comunes relacionados con las infraestructuras de este tipo de sistemas de transporte ferroviarios metropolitanos ubicados dentro de las grandes ciudades.

- Líneas: estos sistemas de transporte operan sobre distintas líneas (subterráneas o en superficie) que componen una red y que recorren las áreas metropolitanas de una ciudad. Cada línea está compuesta por una serie de estaciones, donde los trenes paran para recoger/dejar viajeros. Cada línea tiene una estación origen y una estación final y en ellas se suelen ubicar los depósitos o cocheras.
- Depósitos: los depósitos son instalaciones de gran extensión que suelen ubicarse en superficie y son recintos donde se realizan operaciones de mantenimiento a los trenes. También sirven para estacionar los trenes cuando no están en funcionamiento y suelen disponer de almacenes para repuestos.
- Parque móvil: se denomina parque móvil al conjunto de trenes (coches) que circulan por la red de metro. Estos trenes pertenecen a diferentes series (modelos).

Conocido esto, el diagrama de los procesos del modelo M4G de reparto de *e-commerce* se muestra a continuación en la figura 47.

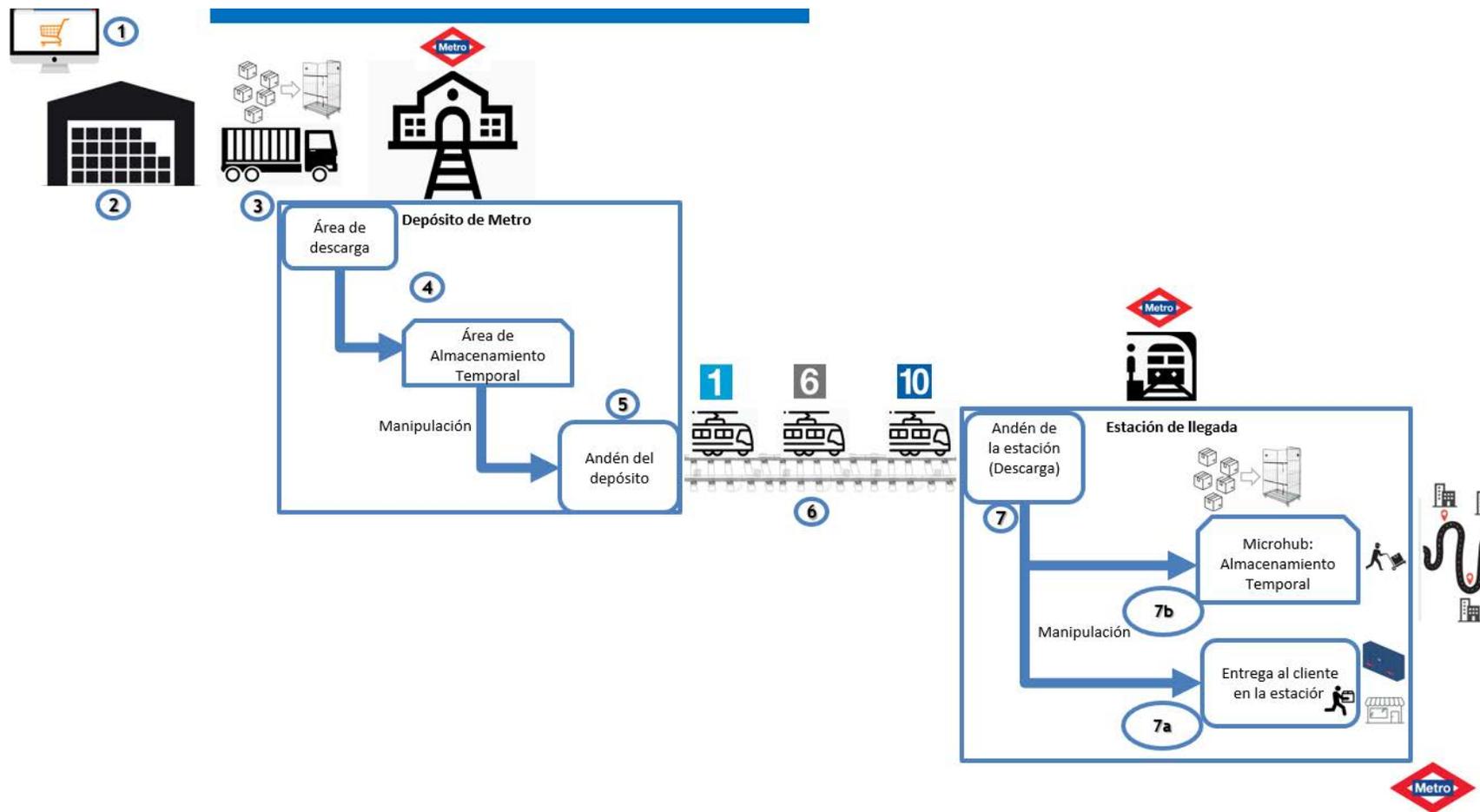


Figura 47. Modelo M4G  
Fuente: elaboración propia

Para llevar a cabo la distribución urbana propuesta, a través de la red metropolitana, se detallan las 7 grandes actividades a realizar, y que serían las siguientes:

1. Se realiza el pedido *online* por un viajero de metro o por un residente de algún barrio cercano a una estación de metro. El cliente selecciona un método de entrega concreto (taquilla, centro de recogida, entrega a domicilio, etc.).
2. Se procesa y se prepara el pedido en el centro logístico/centro de consolidación del minorista o del operador logístico. Los paquetes correspondientes a pedidos *online* se preparan y colocan en los contenedores rodantes (*rollers containers*) por estación. Los contenedores rodantes son sistemas para el transporte de forma ágil de paquetes y otros productos. Son ligeros y permiten cargas de 500-800 kg. Pueden tener diferentes tamaños para adaptarse a las características interiores de cada tren. La utilización de contenedores rodantes, en la preparación de pedidos, minimiza la ruptura de la carga en todo el proceso (descomposición total o parcial del contenedor al proceder al almacenaje o transporte al receptor de la carga).



Figura 48. Ejemplo de *roll container*

Fuente: Todo Contenedor (<https://cutt.ly/6bVKy0n>)

Llegados a este punto el pedido estaría listo para el transporte.

3. Transporte hasta el depósito de metro: con un camión pesado (HGV) se transportan, mediante contenedores rodantes, los paquetes agrupados por destinos, desde el centro logístico hasta el depósito o cochera de metro seleccionado.
4. Descarga y almacenamiento temporal en las instalaciones de metro: los contenedores que contienen paquetes con pedidos de *e-commerce* se ubican, de forma temporal (*cross dock*), en el depósito a la espera de ser cargados en los trenes para su distribución posterior.
5. Carga de los paquetes en los trenes: antes del inicio del trayecto del tren, que va a circular por toda la línea, se cargan los coches necesarios con los contenedores que

llevan la mercancía. Para un mejor desempeño es necesario que esta actividad se realice en un entorno controlado del depósito.

6. Transporte desde el depósito de metro hasta cada estación: el tren se carga con los contenedores rodantes en el depósito de metro y se utiliza el tren para transportar los pedidos hasta las estaciones.

Dentro de este punto, hay un aspecto fundamental a tener en cuenta en el reparto de mercancías a través de trenes en redes metropolitanas. Se trata del empleo de trenes compartidos o trenes exclusivos para transportar los contenedores rodantes. A saber:

- Trenes compartidos: en este caso, el mismo tren es compartido por viajeros y paquetes, pero no están mezclados ya que cada coche que compone el tren transporta o viajeros o paquetes. Se puede utilizar un coche de la composición de ese tren para el transporte de paquetes, y el resto transporta viajeros. Con esta alternativa se utilizan los mismos horarios de paso de los trenes en esa línea. Para que no afecte a las ratios viajeros/m<sup>2</sup>, es recomendable utilizar esta opción durante los periodos valle.

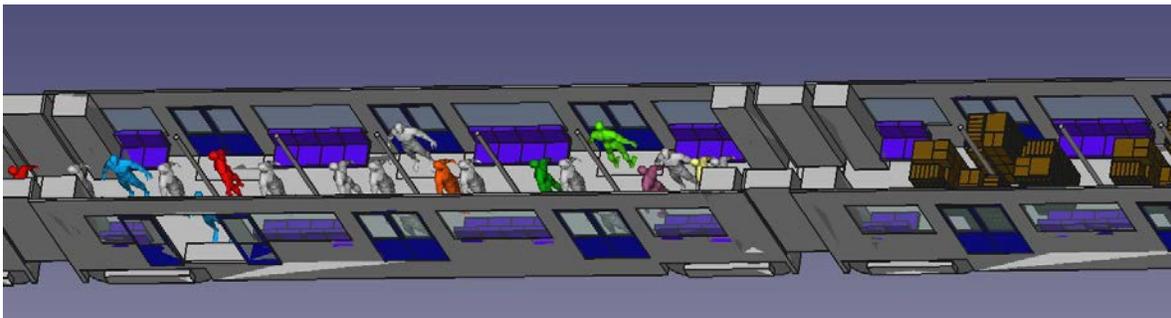


Figura 49. Ejemplo de trenes compartiendo viajeros y paquetes

Fuente: elaboración propia

- Trenes exclusivos: para esta opción, el tren que recorre las diferentes estaciones de la red de metro solo transporta paquetes. En este caso, no se modifica la estructura ni el diseño interior del tren, cada coche se carga con los contenedores rodantes que, a su vez, están llenos de paquetes. La composición del tren (número de coches que lo componen) puede variar y los horarios no coinciden con la tabla de trenes definida para los viajeros, con el fin de no interferir con ellos.

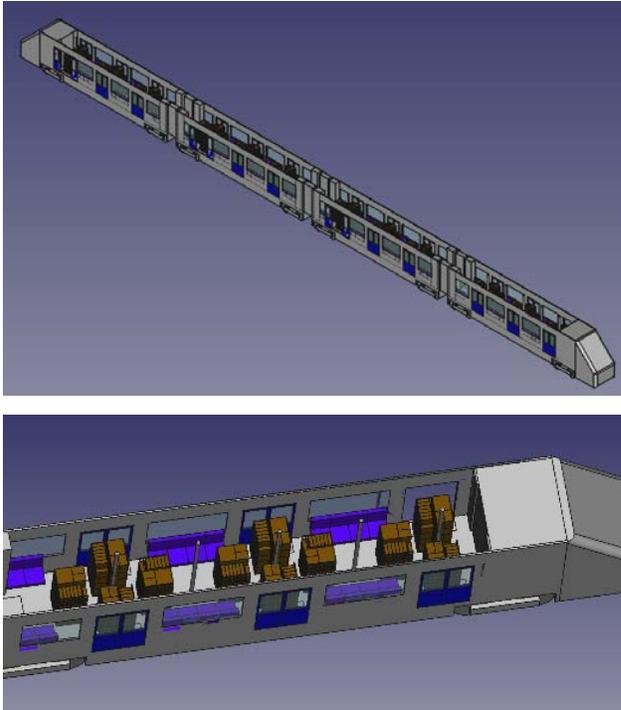


Figura 50. Ejemplo de trenes dedicados para el transporte de paquetes

Fuente: elaboración propia

En cada estación se descargan los paquetes correspondientes.

Con relación al lugar y modo de entrega de los pedidos de *e-commerce* para el consumidor final (B2C), se comparan a continuación las características de las diferentes alternativas existentes. Sobre la clasificación realizada en el proyecto BESTUFS (Allen *et al.*, 2007), se añaden dos nuevas formas de entrega, recogidas en la tabla 12: entregas bajo demanda (*on-demand delivery*) y BOPIS (*buy online, pickup in store*).

Tabla 12. Clasificación de modos de entrega de pedidos de *e-commerce*

	Attended delivery	On-demand delivery	Reception box/delivery box	Controlled access system	Locker-bank	Collection point	BOPIS
Who covers the last mile?	Delivery company	Delivery company	Delivery company	Delivery company	Customer	Customer	Customer
Customer present?	Yes	Yes	No	No	No	No	No
Types of products	Any	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages	Any
Failed deliveries	High	Low	Virtually none	Virtually none	Virtually none	Virtually none	Virtually none
Delivery window	Fixed delivery hours	Fixed delivery hours	Delivery company operating hours	Delivery company operating hours	Delivery company operating hours	CP opening times	Store opening times
Times at which goods can be collected	Not appropriate	Not appropriate	24 hours	24 hours	24 hours	CP opening times	Store opening times
Retrieval time for customer	None	None	Very short	Very short	Short-long	Short-long	Short-long
Drop-off time	Long	Long	Short	Short	Very short	Very short	Short
Initial investment	Low	Low	High/medium	Medium	Medium	Low-medium	Low
Delivery Costs	High	High	Low	Low	Lowest	Lowest	Lowest
Possible operational problems	High failed deliveries. Poor use of vehicle capacity	High delivery cost, poor use of capacity	Large number of boxes needed/need to collect boxes	Customer concerns about safety. Need for suitable delivery location	Customer has to travel to collect	Customer has to travel to collect	Customer has to travel to collect, waiting time
Potential reduction in goods vehicle activity compared to attended delivery	-	-	Some reduction	Some reduction	Greatest reduction	Greatest reduction	Greatest reduction

Fuente: elaboración propia a partir de Allen *et al.* (2007)

Dentro del modelo M4G y teniendo en cuenta las características descritas en el cuadro anterior, se pueden considerar dos grandes categorías en la entrega final de la mercancía al cliente que realiza el pedido de *e-commerce*:

7a) Entregas dentro de la estación: en esta opción, tanto el viajero como el residente reciben el pedido de *e-commerce* dentro de la estación de metro. Las opciones pueden ser a través de taquillas inteligentes o de centros de recogida situados en determinadas estaciones. Para esta opción, es necesario realizar la descarga de los paquetes B2C de los trenes en cada estación y

llevarlos al lugar de entrega (taquilla o centro de recogida) para su posterior recogida por el cliente. Solo se produce una rotura de carga desde la preparación, en el momento en que los contenedores con paquetes se descomponen para llenar las taquillas o para la entrega de forma agrupada en los centros de recogida.

(7b) Entregas fuera de la estación: en esta alternativa, el pedido es entregado fuera de las instalaciones de la red de metro. Se incluyen aquí las diferentes modalidades del reparto a domicilio (atendido o desatendido), puntos de recogida o entregas en tienda. Para esta opción, los paquetes se descargan de los trenes en cada estación y deben trasladarse a un *microhub* dentro de esa estación que actúa de almacén temporal (*cross-dock*). La entrega desde el *microhub* situado en la estación al domicilio/punto de recogida/tienda se realiza por medios de transporte «limpios» (bicicletas, andarines, etc.). En esta opción, se producen dos roturas de carga, en el momento en que los paquetes llegan al *microhub* y en el momento en que los paquetes llegan al cliente final.

### 6.3. Cuantificación de la demanda de paquetes de *e-commerce*

Los compradores *online* disponen de numerosas alternativas para elegir qué productos comprar, dónde pueden comprarlos y cuándo pueden comprarlos. De igual forma, cuando hablamos de la entrega de paquetes en el comercio electrónico, los clientes esperan poder elegir diferentes alternativas. Una empresa que ofrezca (o el cliente perciba) un alto valor del servicio para una entrega de comercio electrónico, generalmente producirá la satisfacción del cliente dentro del proceso de compra y, además, tendrá un efecto directo en su lealtad y permanencia, lo que finalmente generará mayor consumo y, por extensión, aumentará los beneficios de las empresas (Copenhagen Economics, 2013). Por lo tanto, la forma en que se materializa la entrega física también condiciona la demanda del comercio electrónico.

La demanda diaria de pedidos de comercio electrónico del modelo M4G tiene dos componentes, la demanda de viajeros y la demanda de residentes:

#### **Demanda diaria de viajeros (DDV)**

Una de las principales sinergias entre el transporte urbano ferroviario de personas y el transporte urbano de mercancías en las grandes ciudades se produce cuando un viajero de metro puede, a su vez, ser un cliente de comercio electrónico y recoger los pedidos cuando entra o sale de una estación.

El cálculo de esta demanda diaria potencial de pedidos de *e-commerce* de los viajeros de metro se construye aplicando el método de proporciones en cadena propuesto por Kotler y Keller (2012), que consiste en multiplicar un número base por una serie de porcentajes hasta llegar a la demanda objetivo.

La formulación sería la siguiente:

$$DDV = A \times P1 \times P2 \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (2)$$

donde:

$A$  = viajes diarios en metro por estación

$P1$  = % promedio de viajeros distintos en metro por estación

$P2$  = % promedio de personas que viajan en metro > x años por estación

$P3$  = % promedio de personas > x años que usan Internet

$P4$  = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran *online*

$P5$  = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran *online* de forma diaria

$P6$  = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran *online* de forma diaria bienes y productos físicos que pueden entrar en un paquete de tamaño estándar

$P7$  = % promedio de personas > x años que usan Internet y compran *online* de forma diaria bienes y productos físicos que pueden entrar en un paquete de tamaño estándar y muestran preferencia por un método de entrega concreto (taquillas o recogida en centro o domicilio)

### **Demanda de residentes (DDR)**

La privilegiada ubicación de todas las estaciones de metro en las grandes urbes (en distancia y en accesibilidad) les otorga una ventaja competitiva a la hora de determinar los posibles puntos de entrega de pedidos de comercio electrónico para los residentes de estas ciudades.

De forma análoga al método anterior, se calcula la demanda potencial diaria de pedidos de *e-commerce* para las personas que residen dentro del área de influencia de una estación de metro (se considera área de influencia de una estación el área que ocupa el barrio donde vive el residente).

Para este caso, la formulación sería:

$$DDR = Y \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (3)$$

donde:

$Y$  = personas residentes que viven en un área de influencia de una estación de metro > x años y no viajan en metro de forma regular.

La demanda diaria total de pedidos de *e-commerce* por estación  $DDT_{(i)}$  será la suma de ambos conceptos:

$$\begin{aligned} \text{Demanda diaria de pedidos e - commerce de la estación } DDT(i) \\ = DDV(i) + DDR(i) \end{aligned} \quad (4)$$

(i) = estaciones de Metro de Madrid

## 6.4. Análisis de costes

El análisis de costes es un método de evaluación de decisiones, modelos o proyectos y hace referencia al uso de diversas técnicas para la valoración y la toma de decisiones. Entre estas herramientas destacan los siguientes análisis: coste-eficiencia, coste-beneficio, coste-utilidad y coste-eficacia. Aunque cada técnica presenta sus características, de forma conjunta, nos referimos al grupo de técnicas de costes tomadas para ayudar en la elección entre los diferentes proyectos o alternativas.

Uno de los aspectos más confusos, a la hora de incorporar el análisis de costes en la evaluación y la toma de decisiones, resulta en que a menudo se usan indistintamente varios términos diferentes, pero estos están relacionados. Los términos de referencia incluyen los mencionados, coste-eficiencia, coste-beneficio, coste-utilidad y coste-eficacia. Aunque están relacionados y pueden considerarse miembros de la familia del análisis de costes, cada uno se caracteriza por diferencias importantes que los hacen apropiados para aplicaciones específicas (Levin y McEwan, 2001). La tabla 13 recoge algunas de las características ampliadas para los términos relacionados con el análisis de costes:

Tabla 13. Métodos de análisis de costes

Análisis de costes	Definición	Expresión de resultado	Ámbito de aplicación
Análisis coste-eficiencia	Evaluación de alternativas teniendo en cuenta tanto su coste como sus efectos con el fin de producir algún resultado	<u>Coste/medida ganancia</u> Se expresa como un índice, donde el denominador es una ganancia en una cierta medida (años de vida, muertes evitadas, etc.) y el numerador es el coste asociado que conlleva alcanzar esa medida	Sanitario Educación Sector público Empresarial
Análisis coste-beneficio	Evaluación de alternativas según sus costes y sus beneficios, medidas en términos monetarios. El modelo se construye identificando los beneficios de una acción, así como los costes asociados, y restando los costes de los beneficios	<u>Coste/beneficio</u> El resultado se puede expresar tanto en forma de la diferencia entre costes y beneficios (valor actual neto, VAN), como mediante un cociente tanto bruto como neto	Empresarial Sector público
Análisis coste-utilidad	Evaluación económica que se basa en la valoración de las preferencias o utilidades de los individuos	<u>Coste/utilidad</u> Se determinan las utilidades, se calculan y se comparan los ratios (coste/utilidad) de cada una de las alternativas. La alternativa elegida es la que presenta la menor ratio	Sanitario Educación Sector público
Análisis coste-eficacia	Se define el objetivo a alcanzar y se evalúan las diferentes alternativas que alcanzan ese objetivo, cuantificando los costes que conlleva alcanzar ese objetivo	<u>Suma de costes por alternativa</u> Suma de los costes para alcanzar el objetivo fijado. El criterio de elección: la mejor alternativa es la que presenta menos coste (unidad de medida: dinero)	Sanitario Educación Sector público

Fuente: elaboración propia a partir de Levin y McEwan (2001)

Teniendo en cuenta las limitaciones para calcular los beneficios de forma homogénea, se considera apropiado utilizar el método de análisis de coste-eficacia para la evaluación del modelo M4G de distribución urbana de comercio electrónico a través de la red de transporte urbano de metro. Al utilizar este método, se pueden tener en cuenta los costes asociados al triple balance de la alternativa estudiada (coste económico, coste social y coste medioambiental), para así comparar y seleccionar la alternativa de menor importe conjunto. Al añadir un término que contemple los aspectos sociales y medioambientales, el criterio básico es el aumento del bienestar socio-económico-medioambiental, para lo cual hay que medir el perjuicio que puedan producir los diversos costes en estos campos.

#### 6.4.1. Costes del modelo

Para la cuantificación monetaria de los costes del modelo de distribución de paquetes B2C a través de sistemas de transporte público subterráneo, se consideran de forma agregada, los siguientes costes:

$$CT = CE + CS + CM \quad (5)$$

donde:

$$CE = C(k) + C(o)$$

$$CS = C(c) + C(a)$$

$$CM = C(r) + C(pa) + C(cc) \quad (6)$$

donde:

$CT$  = los costes totales del modelo

$CE$  = los costes económicos

$C(k)$  = los costes de infraestructuras/capital

$C(o)$  = los costes de operación

$CS$  = los costes sociales

$C(c)$  = los costes de congestión

$C(a)$  = los costes de accidentes

$CM$  = los costes medioambientales

$C(r)$  = los costes por ruido

$C(pa)$  = los costes por polución del aire

$C(cc)$  = los costes por cambio climático

## 6.5. Factores que afectan a la evaluación del modelo

### 6.5.1. Factores económicos

#### Costes económicos

Se cuantifican los costes económicos que es necesario afrontar para materializar el modelo propuesto. Estos costes económicos se descomponen en:

- Costes operativos de explotación (Opex): son los costes que una empresa soporta de forma regular y continua para realizar sus operaciones diarias, e incluyen costes de operaciones técnicas y comerciales, administración, etc.
- Costes de capital (Capex): gasto que utiliza una empresa para adquirir, mantener y actualizar activos fijos. Estos pueden incluir plantas, propiedades y equipos (como edificios, maquinaria e infraestructura de oficinas). Suelen ser activos a largo plazo que tienen una vida útil o un propósito productivo que dura más de un periodo contable.

En el modelo, los Opex y Capex se corresponden con los costes descritos en la tabla 14:

Tabla 14. Costes operativos de explotación o costes de capital asociados al modelo M4G

OPEX	CAPEX
Actividades logísticas y de transporte de paquetes hasta depósito de metro	Costes de adaptación de estaciones
Actividades logísticas y de transporte de paquetes en depósito y estaciones de metro	Costes en nuevas infraestructuras: carpas de almacenamiento en depósito, centros de recogida en estaciones
Licencia por utilizar las infraestructuras de metro	Costes de adecuación de depósitos
Costes operativos de metro para transportar paquetes	Equipamiento necesario: contenedores móviles, taquillas inteligentes, escáneres de seguridad, etc.
Mantenimiento de equipos e infraestructuras	

Fuente: elaboración propia

#### Costes externos

Según la Comisión Europea (2019), «Los costes externos, también conocidos como externalidades, surgen cuando las actividades sociales o económicas de una persona (o un grupo) tienen un impacto en otra persona (o grupo) y cuando ese impacto no se contabiliza por completo o no se compensa por la primera persona (o grupo)». Estos costes, generalmente, no son asumidos por el usuario de transporte y no se tienen en cuenta a la hora de decidir qué medio de transporte utilizar.

Dentro de las externalidades, se diferencian dos tipos de costes externos: costes externos sociales y costes externos medioambientales.

Para desarrollar nuestro modelo, se ha utilizado la metodología empleada en el *Handbook of external cost of transport* (European Commission, 2020). Por lo tanto, la tabla 15 puede utilizarse para la definición y cuantificación de los siguientes costes externos:

Tabla 15. Costes operativos de explotación o costes de capital asociados al modelo M4G

Costes externos	Tipo de coste externo	VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL TIPO DE COSTE	Definición
I: Social	Costes de congestión $C_c$	$C_c = f(D, T, M, P)$	Pérdida de tiempo que sufre un individuo y que aparece cuando un vehículo adicional reduce la velocidad de otros vehículos dentro de un flujo de tráfico, aumentando el tiempo de viaje.
	Costes de accidentes $C_a$	$C_a = f(D, M, P)$	Tiene en cuenta, no solo los costes materiales (costes administrativos, daños materiales en otros vehículos e infraestructuras, etc.), sino también los costes inmateriales (el dolor y sufrimiento impuesto a otros, etc.).
	Costes de ruido $C_r$	$C_r = f(D, M, T, P, H)$	El ruido se puede definir como sonidos no deseados de diferente duración, intensidad u otra calidad que causan daño físico o psicológico a los seres humanos. Los sistemas de transporte son fuentes de ruido.
II: Medioambiental	Costes por polución de aire $C_{pa}$	$C_{pa} = f(D, M, P, F, S, E)$	Los motores de transporte emiten ciertos contaminantes (por ejemplo, $SO_2$ , $NO_x$ , $PM_{10}$ , $CO$ ) a la atmósfera. Tienen en cuenta tanto los efectos que producen los contaminantes del aire sobre la salud como otro tipo de daños, como son los daños materiales y de construcción, las pérdidas de cultivos y la pérdida de la biodiversidad.
	Coste de cambio climático $C_{cc}$	$C_{cc} = f(D, M, P, F, S, E)$	Los costes del cambio climático se definen como los costes asociados a todos los efectos del calentamiento global, como el aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad, los problemas de gestión del agua, los extremos climáticos y las malas cosechas.

Fuente: elaboración propia a partir de European Commission (2020)

donde:

$D$  (km): distancia recorrida para entregar los paquetes de comercio electrónico por un determinado modo de transporte

$M$ : modo de transporte (LCV, HGV, Metro)

$T$ : situación del tráfico (sobrecapacidad, congestionado, cerca de la capacidad, por debajo de la capacidad, denso, fluido, etc.)

$P$ : área de actuación en el transporte de paquetes (área urbana, área interurbana, etc.)

$H$ : momento del día

$F$ : tipo de combustible

$S$ : tamaño del vehículo

$E$ : tipo de emisión

### 6.5.2. Factores para la mejora de la eficiencia

En función de los posibles valores que adopten tanto los distintos factores de demanda como las actividades operativas (tanto en trenes y estaciones como logísticos), harán que el modelo de reparto de paquetes a través de metro pueda desarrollarse de una forma u otra.

#### Relativo a la demanda de paquetes

- Selección de las líneas de metro: de entre todas las líneas que componen la red de metro, hay que seleccionar cuáles serán las líneas en las que se realizará el reparto de paquetes por trenes. Por cuestiones de eficiencia operacional y de rentabilidad, es razonable elegir aquellas de mayor demanda de paquetes B2C en sus estaciones. Para las líneas seleccionadas, el tren inicia el recorrido en la primera estación y recorre toda la línea con paquetes B2C.
- Selección de las estaciones: por cuestiones de eficiencia operacional y teniendo en cuenta la selección previa de las líneas de metro con mayor demanda acumulada, hay que discriminar las estaciones donde se van a entregar los paquetes, que vendrán condicionadas por el tipo de reparto seleccionado:
  - En el caso de las taquillas inteligentes, se entregan paquetes en todas o en las principales estaciones que componen la línea:
    - Estaciones con demanda alta: taquillas de gran capacidad.
    - Estaciones con demanda medio-baja: taquillas de tamaño mediano.

Hay que considerar que, para el caso de las taquillas inteligentes, están diseñadas de tal manera que el 96 % de todos los paquetes destinados a ser enviados a un casillero se ajustan adecuadamente (van Duin *et al.*, 2020).

- Centros de recogida: dentro de cada una de las líneas elegidas en el punto anterior, se seleccionan las estaciones con mayor demanda de paquetes dentro de esa

línea (en este caso, las 5 con mayor demanda). En estas estaciones se ubica el centro de recogida.

- Entrega a domicilio: dentro de cada una de las líneas elegidas en el punto anterior, se seleccionan las estaciones que presentan mayor demanda de paquetes dentro de esa línea (residentes). En estas estaciones se ubica el almacén o *microhub* donde se almacenan temporalmente los paquetes y posteriormente se realiza el reparto fuera de la estación.
- Límite de paquetes por estación: es necesario considerar el límite máximo de capacidad de paquetes tanto de las taquillas inteligentes como del centro de recogida situado en la estación.
  - Si la demanda de paquetes es  $>$  que el tamaño de la taquilla o centro de recogida: el número de paquetes a entregar es igual al tamaño máximo de paquetes de la taquilla o a la capacidad máxima de paquetes del centro de recogida.
  - Si la demanda de paquetes es  $<$  que el tamaño de la taquilla o centro de recogida: el número de paquetes a entregar es igual a la demanda de paquetes.

La tabla 16 muestra los factores técnico-operativos relacionados con trenes y estaciones:

Tabla 16. Factores operativos del modelo M4G

Factor operativo	Definición	Característica
<p>Tipo de tren</p> 	<p>En función de las líneas con mayor demanda de paquetes, el tipo de tren (serie) que circula por ellas es diferente. Cada uno de estos trenes puede presentar un diseño interior en cada coche que lo compone y por lo tanto tiene una capacidad de transporte de paquetes distinta.</p>	<p>Capacidad interior +++ (por coche)</p> <hr/> <p>Capacidad interior + (por coche)</p>
<p>Tamaño del contenedor</p> 	<p>Debido a su facilidad de manejo y su capacidad, se utiliza el <i>roll container</i> como medio para transportar paquetes en los trenes. En función de la capacidad interior del tren, se selecciona el tamaño de <i>roll</i> más adecuado.</p>	<p><i>Roll container</i> grande</p> <hr/> <p><i>Roll container</i> mediano</p>
<p>Operativa de trenes</p>	<p>Trenes compartidos: los trenes no modifican su frecuencia actual para el transporte de viajeros y se utiliza parte de un tren para dar servicios logísticos.</p> <p>Trenes específicos: se utiliza un tren para transportar paquetes. Este tren no está disponible para los viajeros y tiene un horario diferente.</p>	<p>Tren compartido</p> <hr/> <p>Tren específico</p>
<p>Tiempo de descarga de contenedores en estación</p> 	<p>Tiempo para la descarga de <i>rollers containers</i> en cada estación.</p>	<p>Trenes compartidos = al de tiempo de parada de transporte de viajeros</p> <hr/> <p>Trenes específicos = en función del número de <i>rollers containers</i></p>
<p>Tamaño paquetes</p> 	<p>Se consideran diferentes tamaños de paquetes. Esto permite 1 pedido = 1 paquete, así es posible incluir varios productos en un mismo paquete o considerar varias combinaciones en función de los m<sup>3</sup> necesarios.</p>	<p>Paquete pequeño</p> <hr/> <p>Paquete mediano</p> <hr/> <p>Paquete grande</p> <hr/> <p>Paquete especial</p>
<p>Tamaño de las taquillas, de los centros de recogida y del <i>microhub</i></p> 	<p>En función de la demanda de paquetes diaria de cada estación, el tamaño de las taquillas inteligentes puede ser diferente.</p> <p>Para el caso de los centros de recogida y del almacén urbano situado en la estación (<i>microhub</i>), se determinará la superficie necesaria en función de la demanda diaria de paquetes en esa estación.</p>	<p>Estaciones con alta demanda de taquillas ++++</p> <hr/> <p>Estaciones con menor demanda Taquillas ++</p> <hr/> <p>La superficie de los centros de recogida y los <i>microhubs</i> de estaciones están condicionados por la demanda de paquetes de esa estación</p> <hr/> <p>A mayor demanda mayor superficie de almacenaje</p>

Fuente: elaboración propia

### Relativo a los factores de operaciones logísticas

- Medio de transporte empleado en la entrega:* el modo de transporte utilizado es el principal responsable de la externalidad en logística urbana. Para llevar a cabo el cálculo de los diferentes escenarios, se considera que los paquetes están almacenados en el almacén del operador logístico o en el del *marketplace/e-retailer*. Estos centros se suelen situar

a las afueras de las grandes ciudades y son el primer eslabón de la cadena en la distribución urbana para el *e-commerce*.

Los medios de transporte considerados en el modelo son:

- Camiones pesados (HGV): se considera el transporte desde el centro logístico de consolidación, situado a las afueras de la ciudad (segunda corona), hasta el depósito de metro donde se realizará el almacenamiento temporal (*cross-dock*). La valoración de la externalidad se realiza en € por Ton-km o € por vehículo-km.
- Furgonetas (LCV): es el medio más utilizado en la entrega física en las ciudades (Lebeau y Macharis, 2014; Arnold *et al.*, 2018). Para la cuantificación del modelo actual de reparto, se considera el transporte desde el centro logístico de consolidación situado a las afueras de la ciudad (segunda corona) hasta el domicilio del cliente donde se hace la entrega. La valoración de la externalidad se realiza en € por vehículo-km.
- Trenes (metro): es el transporte que se realiza desde el depósito de metro hasta cada una de las estaciones. La valoración de la externalidad se realiza en € por coche-km en caso de trenes específicos. Para los trenes compartidos, no se considera ninguna externalidad adicional.
- Entrega fuera de la estación (domicilio): es necesario determinar el medio en el que se entregarán los paquetes desde las estaciones al domicilio del cliente. El modelo se plantea desde un punto de vista sostenible, con lo que los medios de transporte utilizados deben ser totalmente «limpios» desde el prisma medioambiental.
- *Número de paquetes entregados y tasa de entregas fallidas*: dependiendo del área donde se materialice la entrega, la productividad del reparto varía considerablemente. Las áreas urbanas se caracterizan por ganancias importantes de eficiencia donde un repartidor (*courier*) es capaz de entregar más paquetes en menos kilómetros.

Aun considerando una mayor productividad de las zonas urbanas, la forma y la estructura de cada ciudad (emplazamiento, situación, tipo de calles, plano urbano, tipos de edificios, etc.) condicionan el tráfico por carretera y, por extensión, el número de entregas de comercio electrónico para cada gran urbe.

Diferentes estudios han estimado el número medio de paquetes que es capaz de repartir un repartidor en una jornada de 7,5-8 horas. Edwards *et al.* (2010) estiman que un repartidor era capaz de entregar 120 paquetes en 80 km de recorrido (Reino Unido). Lemke *et al.* (2016) valoran que un repartidor es capaz de entregar 60 paquetes en un trayecto de 150 km (Polonia). De

Maere (2018) estima que un repartidor en Bruselas es capaz de entregar 85 paquetes en 70 km de recorrido.

De forma adicional, es necesario considerar el denominado *the first time hit rate* (Gevaers *et al.*, 2014), que se sitúa entre un 20-30 % (van Duin *et al.*, 2016; Packlink PRO, 2019). Esta «tasa de aciertos a la primera» es el porcentaje de cuántos primeros intentos de entrega a un destinatario son exitosos. En las rutas de entrega B2C, este porcentaje es significativamente más bajo que en las rutas de entrega B2B, debido a que la mayoría de las entregas (B2C y B2B) se ejecutan durante el horario laboral tradicional.

- *Peso transportado*: con respecto al peso transportado, como se muestra en la figura 51, los pesos de los paquetes oscilan entre 0,2 y 5 kg para más del 70 % de los casos (Mazareanu, 2020). Sobre el peso medio del paquete, la encuesta de International Post Corporation (2020) lo sitúa en 2 kg por paquete enviado en *e-commerce*.

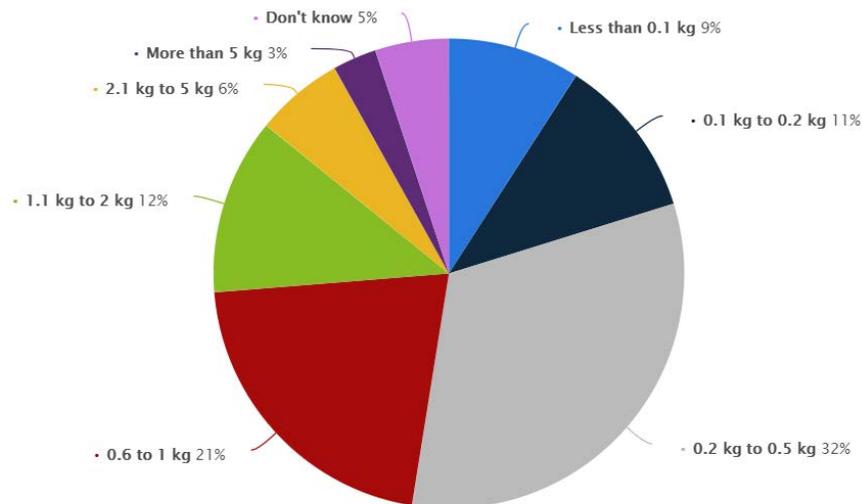


Figura 51. Peso de los paquetes de *e-commerce* (comercio mundial)

Fuente: Mazareanu (2020)

- *Distancia recorrida*: la distancia recorrida tiene en cuenta los kilómetros realizados para la entrega del paquete de *e-commerce*.
  - Para el modelo de reparto actual (de Maere, 2018):
    - $D_a$  = distancia desde el centro de consolidación hasta el primer consumidor (LCV).
    - $D_b$  = distancia recorrida entre todos los destinatarios (LCV).
    - $D_c$  = distancia de vuelta, recorrida desde el último consumidor hasta el centro de consolidación (LCV).

La distancia total de cada ruta de LCV será:  $D_t = D_a + D_b + D_c$ .

- Para el modelo M4G en entregas dentro de estación:
  - $D_d$  = distancia desde el centro de consolidación hasta el depósito de metro que funciona como *cross-dock* (HGV).
  - $D_e$  = distancia desde el depósito de metro a cada una de las estaciones de destino (trenes).
- Para el modelo M4G en reparto fuera de la estación (a domicilio, etc.):
  - $D_d$  = distancia desde el centro de consolidación hasta el depósito de metro que funciona como *cross-dock* (HGV).
  - $D_e$  = distancia desde el depósito de metro a cada una de las estaciones de destino (trenes).
  - $D_b$  = distancia recorrida entre todos los destinatarios (medio limpio: bicicleta, a pie, etc.).
  - $D_c$  = distancia de vuelta, recorrida desde el último consumidor hasta la estación que actúa como centro de consolidación (medio limpio: bicicleta, a pie, etc.).

La distancia total en el nuevo modelo, para el caso de entrega en estación, puede estimarse de la siguiente manera:

$$D_{me} = D_d + D_e \quad (7)$$

O para el caso de entrega a domicilio, la estimación contemplaría términos adicionales:

$$D_{md} = D_d + D_e + D_c \quad (8)$$

## **PARTE III. CASO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DE ESTUDIO**

---



## Capítulo 7. Caso de estudio

---

A continuación, se define el modelo M4G para la distribución de los paquetes originados por el *e-commerce*, considerando el caso de la ciudad de Madrid. Esta nueva distribución urbana se realiza a través del sistema de transporte público ferroviario Metro de Madrid (Metro). El objetivo es poder comparar los costes económicos y las externalidades de este nuevo modelo con el modelo actual de reparto urbano de paquetes en la ciudad de Madrid.

### 7.1. Antecedentes

La distribución urbana es esencial para la actividad y desarrollo de cualquier ciudad y Madrid no es una excepción. Por su orografía y por la evolución histórica de su estructura urbana, la distribución dentro de la ciudad de Madrid se presenta como una de las más complicadas dentro de las grandes ciudades europeas.

Madrid es la capital de España, con una población estimada de 3 266 126 personas. Es la ciudad más grande del país y la segunda más grande de la UE. Incluyendo la provincia (Comunidad de Madrid), la cifra oficial del padrón asciende a 6 663 394 habitantes (INE, 2020).

En el siguiente gráfico (figura 52), se muestra la evolución de la población de la ciudad de Madrid en el periodo 2000-2019.

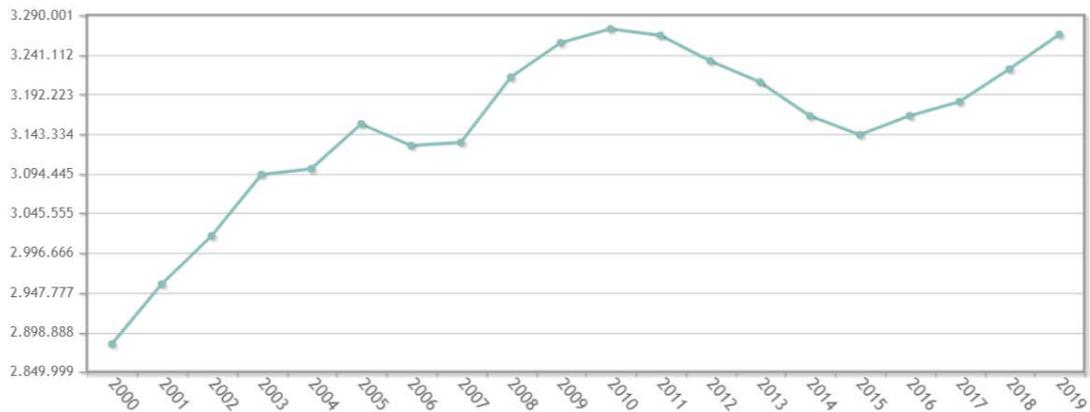


Figura 52. Evolución de la población de la ciudad de Madrid

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (<https://www.ine.es/consul/serie.do?s=DPOP13156>)

La ciudad de Madrid se divide administrativamente en 21 distritos donde, a su vez, se encuentran 131 barrios.

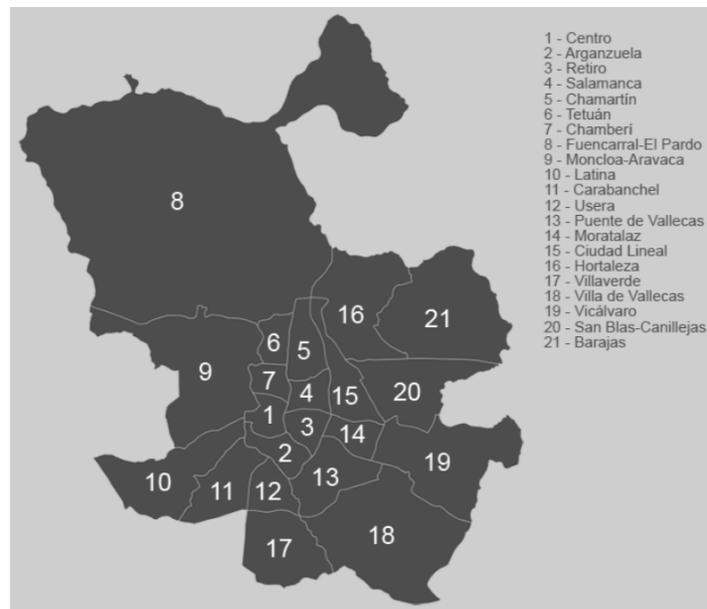


Figura 53. Distritos de la ciudad de Madrid

Fuente: Enterat (<https://www.enterat.com/actualidad/habitantes-madrid.php>)

En términos económicos, en 2019, la Comunidad de Madrid superó a Cataluña como motor de la economía española, con el 19,3 % del PIB nacional (239 878 millones de euros). De igual forma, es la región con el PIB per cápita más alto de España y se sitúa la décima de Europa, superando los 35 000 euros por persona en 2019 (INE, 2020). Es la sede de las principales instituciones públicas del país y de la región y en ella se desarrollan, entre otras, funciones político-administrativas, financieras y comerciales. En total hay más de 520 000 empresas en la región

(16 % del total nacional), pero si se amplía el alcance a las que tienen más de 500 empleados, el porcentaje crece hasta el 40 %. La ciudad de Madrid comparte con el resto de economías metropolitanas avanzadas la tendencia hacia la consolidación de una economía servindustrial (<https://madridinvestmentattraction.com/home>).

En cuanto a la morfología urbana, la ciudad de Madrid presenta un plano irregular y radiocéntrico, con calles estrechas y edificaciones cerradas que se combinan con grandes plazas y avenidas de trazado regular fruto de las sucesivas remodelaciones sufridas por la ciudad desde el siglo XVI. En la configuración de la ciudad de Madrid, se distinguen tres áreas principales correspondientes a las diferentes etapas de desarrollo urbano: casco antiguo, ensanche y periferia (Lioba, 2013).

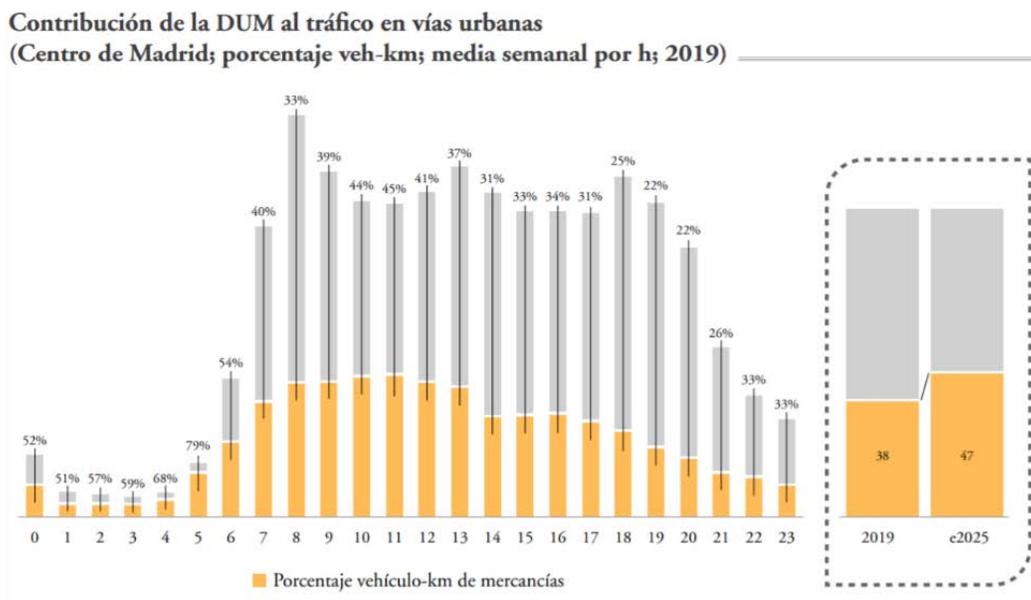


Figura 54. Imagen cenital de la ciudad de Madrid  
Fuente: Efe (2018)

Con relación al tráfico y la distribución urbana en la ciudad de Madrid, el parque de vehículos destaca por el elevado porcentaje de vehículos diésel y la media de antigüedad se sitúa en un promedio de 9,3 años (Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2019). El transporte por carretera supuso un 34,1 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), según el Inventario de Emisiones de Gases Contaminantes a la Atmósfera de 2016 (CAM-Dirección General del Medio Ambiente, 2018). El porcentaje de vehículos comerciales e industriales con más de 10 años se situaba a finales de 2018 en un 73,2 % (Anfac, 2019). Según los

datos proporcionados por el Ayuntamiento, entre los meses de enero y junio de 2019 se produjeron entre 13 000-16 000 accesos de vehículos LCV (en día laborable) a la zona de bajas emisiones definida en 2018 como Madrid Central (área de 472 hectáreas de extensión).

Según la Dirección General de Tráfico (*Gutiérrez, 2020*), para todas las ciudades españolas, se ha registrado un crecimiento de la accidentalidad cercano al 70 % relacionado con la distribución urbana de mercancías. Las estimaciones de este organismo señalan que el 20 % de la congestión pertenece a la DUM, pero en el caso de la ciudad de Madrid, esta congestión supone, en promedio, el 38 % y se estima que se eleve al 47 % en 2025 (*Colegio de Economistas de Madrid, 2020*). Es importante señalar que en horas nocturnas (de 0 a 6 de la mañana), el porcentaje de congestión como consecuencia de la distribución ya es superior al 50 %.



**Figura 55.** Contribución de la DUM al tráfico en la ciudad de Madrid  
Fuente: Colegio de Economistas de Madrid (2020)

Respecto al comercio electrónico, considerando los datos de la patronal de logística (*Peinado, 2019*), en Madrid se entregan al día entre 350 000 y 400 000 paquetes, cifra que se puede multiplicar por cuatro en fechas como el Black Friday.

Pero la logística urbana en Madrid no solo abarca la entrega derivada del comercio electrónico, sino que incluye también la distribución urbana al sector HORECA (hoteles, restaurantes y cafeterías), el abastecimiento y recogida de mercancía a establecimientos públicos, la retirada de residuos, obras y mudanzas y otros servicios diversos que conllevan transporte de mercancías dentro de la ciudad.

En relación a las infraestructuras que facilitan el reparto urbano de mercancías en la ciudad de Madrid, CITET (Centro de Innovación para la Logística y el Transporte), junto con el Ayuntamiento de Madrid y otras organizaciones empresariales y educativas, elaboraron en 2016-2017

un estudio de viabilidad para el desarrollo de soluciones logísticas en el marco de la distribución urbana de mercancías de la ciudad de Madrid. En el citado estudio se analizan las principales infraestructuras que se encuentran disponibles (de forma total o parcial) en la ciudad de Madrid. Se cuantifican las zonas y plazas de carga/descarga públicas y las plazas de aparcamiento SER (Servicio de Estacionamiento Regulado). De igual forma, el estudio relaciona estas infraestructuras con el total de establecimientos públicos a los que da servicio la DUM.

Ciudad de Madrid		
Infraestructura	Cantidad	Ratio
Zonas Carga y Descarga	2.449 Zonas 8.037 Plazas 3,3 Plazas / Zona	44,5 establecimientos / cada zona de C-D 13,5 establecimientos / cada plaza de C-D
Total establecimientos		108.852
Establecimientos con "Vado Propio"	7.663	7,9%
Establecimientos con zona de C/D pública a menos de 50 metros	22.740	23,5%
Plazas SER	154.527 (28.773 azules)	19,2 plazas SER azules / plaza de C y D

Figura 56. Principales infraestructuras relacionadas con la distribución urbana en Madrid

Fuente: Foro de Empresas por Madrid y CITET (2017)

## 7.2. Problemas y retos de la distribución urbana en la ciudad de Madrid

Actualmente, se distinguen dos principales tipos de problemas relacionados con la distribución urbana en la ciudad de Madrid (Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2019):

- Infraestructura urbana:
  - No existe una ordenación a nivel urbanístico de los puntos de distribución, lo cual genera problemas de impacto en barrios residenciales.
  - Problemas en el uso de aparcamientos y en las plazas de carga y descarga.
  - Importante crecimiento de los domicilios particulares como puntos de reparto de *e-commerce*.
- Gestión:
  - No existe un modelo de gestión de la logística de distribución que identifique y organice adecuadamente los numerosos agentes y operaciones para cada canal de distribución urbana.
  - Crecimiento del *e-commerce* y nuevos modelos de entrega.

- Mal uso de la actividad de carga y descarga.
- Efectos negativos derivados del mal uso de la actividad de carga y descarga.

En Madrid el problema se agrava ya que, siguiendo las directrices europeas, se están tomando medidas para expulsar (o desplazar) al coche que más contamina del centro de la ciudad (por ejemplo, Madrid Central o Madrid 360) y lograr una mejor calidad del aire. Esta prohibición de acceso de los vehículos a determinadas zonas plantea los siguientes inconvenientes:

- Si no se sustituyen los vehículos actuales de reparto por otros menos contaminantes, un porcentaje considerable de la flota de estos vehículos (84 321 LCV distintos accedieron a Madrid Central de enero a junio de 2019) no podrán hacer la distribución en el centro de la ciudad en el futuro a corto plazo.
- Si se produce una sustitución de los vehículos actuales de reparto por otros menos contaminantes (por ejemplo, eléctricos), no se habrá logrado el objetivo de «expulsar» al vehículo de la ciudad y seguirán existiendo problemas de congestión.

Dentro de la estrategia de sostenibilidad ambiental para la ciudad de Madrid, el Ayuntamiento ha definido cinco grandes ejes de actuación para los próximos años relacionados con la distribución urbana de mercancías (Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2019):

- Optimizar la distribución de mercancías a través de la creación de puntos de reparto específicos y la regulación de los centros de tamaño medio y pequeño.
- Promocionar los centros de distribución urbana en el anillo entre la M-30 y la M-40.
- Incentivar la migración a flota limpia a través de ayudas económicas.
- Optimizar la cadena logística de reparto con la colaboración de los grandes distribuidores.
- Utilizar la tecnología como medio de gestión inteligente de carga y descarga y para la optimización de rutas dinámicas.

### **7.3. Metro de Madrid**

Metro de Madrid es el mayor operador de metro de España y uno de los principales referentes internacionales por su red, calidad de servicio, innovación y capacidad tecnológica. Con más de 100 años de vida, es el medio de transporte público más utilizado en la Comunidad de Madrid. Doce líneas y el Ramal conectan 12 municipios a través de 294 kilómetros de red. Cada día laborable, sin tener en cuenta el periodo afectado por la covid-19, más de 2,3 millones de usuarios eligen el suburbano. Los desplazamientos al trabajo o centros de estudios representan el 70 % del total.

Línea	Estaciones Nominales	Estaciones Ferroviarias (dato línea completa)	Km. Línea (dato línea completa)
1	33	33	23.319,90
2	18	20	14.105,50
3	17	18	14.798,35
4	18	23	14.626,50
5	26	32	23.207,53
6	19	28	23.472,40
7	26	31	29.016,70
8	6	8	16.458,25
9	23	31	39.799,40
10	22	32	39.784,16
11	6	7	8.237,00
12	27	28	40.595,82
13	0	2	1.092,00
51 - ML1	7	9	5.401,20
52 - ML2	12	13	
53 - ML3	15	16	
<b>Metro+ML1</b>	<b>248</b>	<b>302</b>	<b>293.914,71</b>



Figura 57. Líneas y estaciones en Metro de Madrid  
Fuente: Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

Como muestra la figura 57, Metro de Madrid, con 302 estaciones (sin contar Metro Ligerero 2 y 3), es la quinta red del mundo en número de estaciones, por detrás del metro de Londres, Nueva York, Shanghái y París, y la octava red en extensión por detrás de los metros de Nueva York, Londres, Pekín, Guangzhou, Seúl, Shanghái y Moscú. Cuenta, además, con 1703 escaleras mecánicas y 541 ascensores, convirtiéndose en la red con más escaleras mecánicas del mundo, solo por detrás de Shanghái. En total, dispone de más escaleras mecánicas que los metros de Londres, París y Nueva York juntos.

En la siguiente infografía (figura 58) se muestran algunas cifras clave con relación al sub-urbano de la capital.

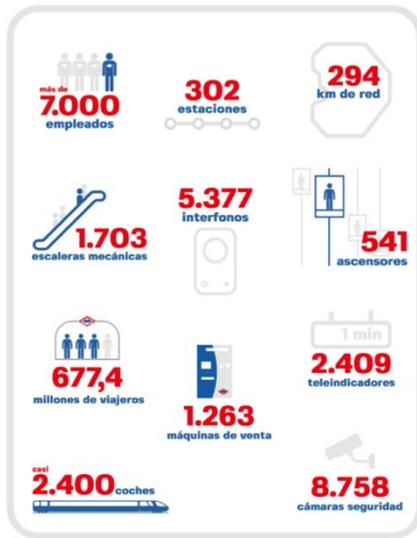


Figura 58. Principales cifras relacionadas con Metro de Madrid  
Fuente: Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

Metro de Madrid utiliza dos tipos de gálibo (en función de la anchura de los túneles y de los trenes), siendo esta diferencia fundamental para conocer el tipo de línea y los trenes que circulan.

- (i) Red de gálibo estrecho: incluye las líneas más antiguas: 1-5 y el Ramal (R) y, de forma provisional, la línea 11. Estas líneas se construyeron con andenes de 60 m de largo. En la línea 5 se construyeron de 90 m desde sus inicios. Los trenes tienen una anchura de 2,3 m. La mayoría de las estaciones están a una profundidad no superior a los 20 m y tienen una bóveda. La distancia media entre estaciones es de 630 m.
- (ii) Red de gálibo ancho: incluye las líneas más nuevas: 6-10 y 12 (MetroSur). Los trenes tienen una anchura de 2,8 m y los andenes tienen una longitud aproximada de 115 m. Muchas estaciones, sobre todo las de las líneas 6 y 9, son más profundas (por ejemplo, Cuatro Caminos (L6): 48 m, Avenida de América (L9): 44 m). Las estaciones construidas a partir de los años noventa, sin embargo, se encuentran lo más próximo a la superficie. En las líneas de gálibo ancho, la distancia media entre estaciones es de 850 m.



**Figura 59.** Tren de la serie 7000 de Metro de Madrid  
Fuente: Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

El parque de vehículos de Metro cuenta con siete modelos diferentes y una veintena de series. El parque móvil de la compañía, en 2020, alcanzó los 2400 coches. Las actividades de mantenimiento se realizan en los depósitos que se sitúan, por lo general, en superficie. Cuentan con una gran playa de vías y enlaces, donde los trenes son clasificados en función del mantenimiento necesario. Existen zonas donde los trenes se estacionan para su limpieza, almacenes para la custodia de repuestos y una gran zona destinada para la supervisión y operaciones de mantenimiento de trenes.

El mapa de Metro, con la localización de las diferentes estaciones y la ubicación de los depósitos que dan cobertura al mantenimiento de trenes (rojo), se muestra en la figura 60:

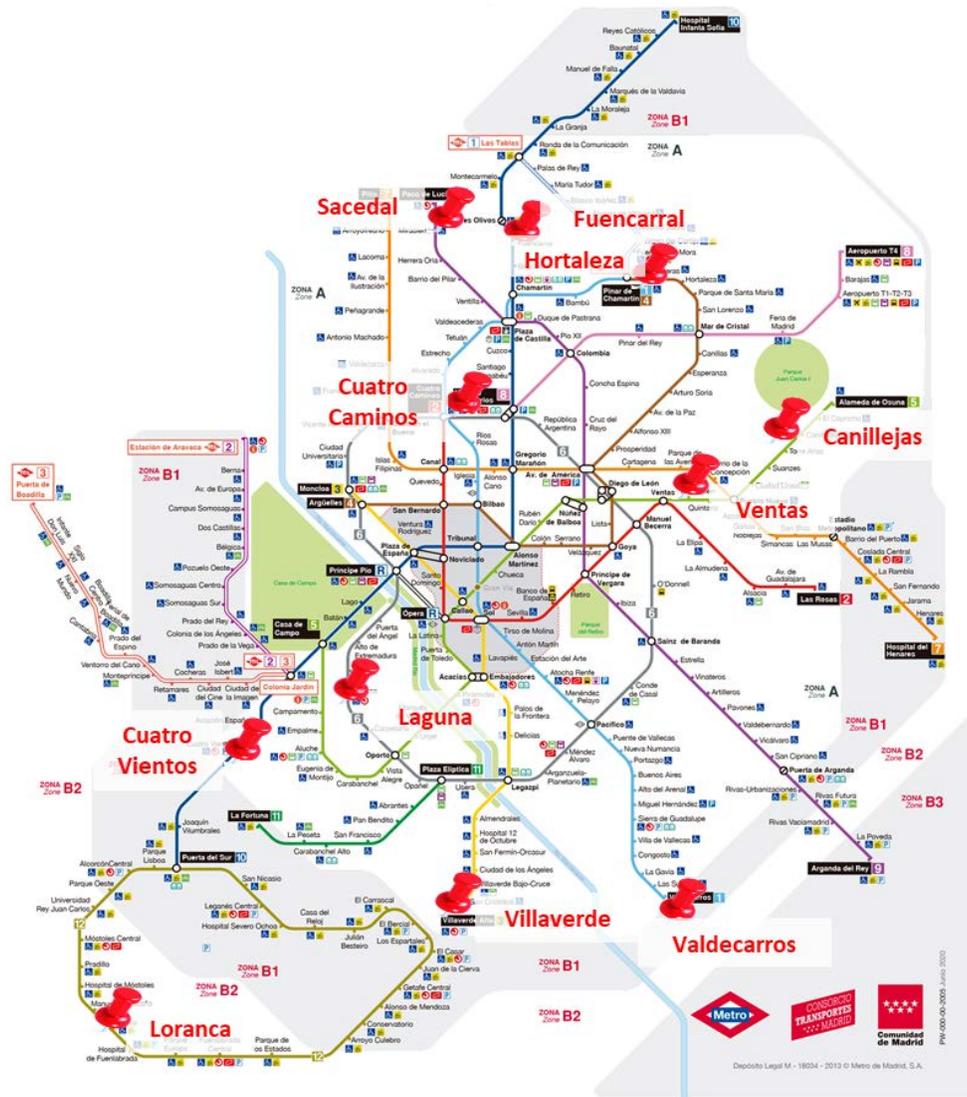


Figura 60. Mapa de Metro de Madrid incluyendo los depósitos de mantenimiento  
 Fuente: elaboración propia a partir de Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

## 7.4. Descripción del modelo M4G en la ciudad de Madrid

A continuación, se describe el modelo para el *reparto de paquetes de e-commerce B2C* para los residentes y viajeros de Metro de Madrid, a través del suburbano. Este modelo, M4G (*Metro for Goods*), presenta una parte inicial común, considerando las operaciones involucradas desde que se realiza el pedido *online* por un cliente hasta que llega a las estaciones de Metro. Posteriormente, se analizan tres alternativas distintas, en función del lugar de entrega de los pedidos de *e-commerce*:

- Entregas en las taquillas situadas en la estación.
- Entregas en centros de recogida situados en la estación.
- Entregas en el domicilio u oficina del cliente.

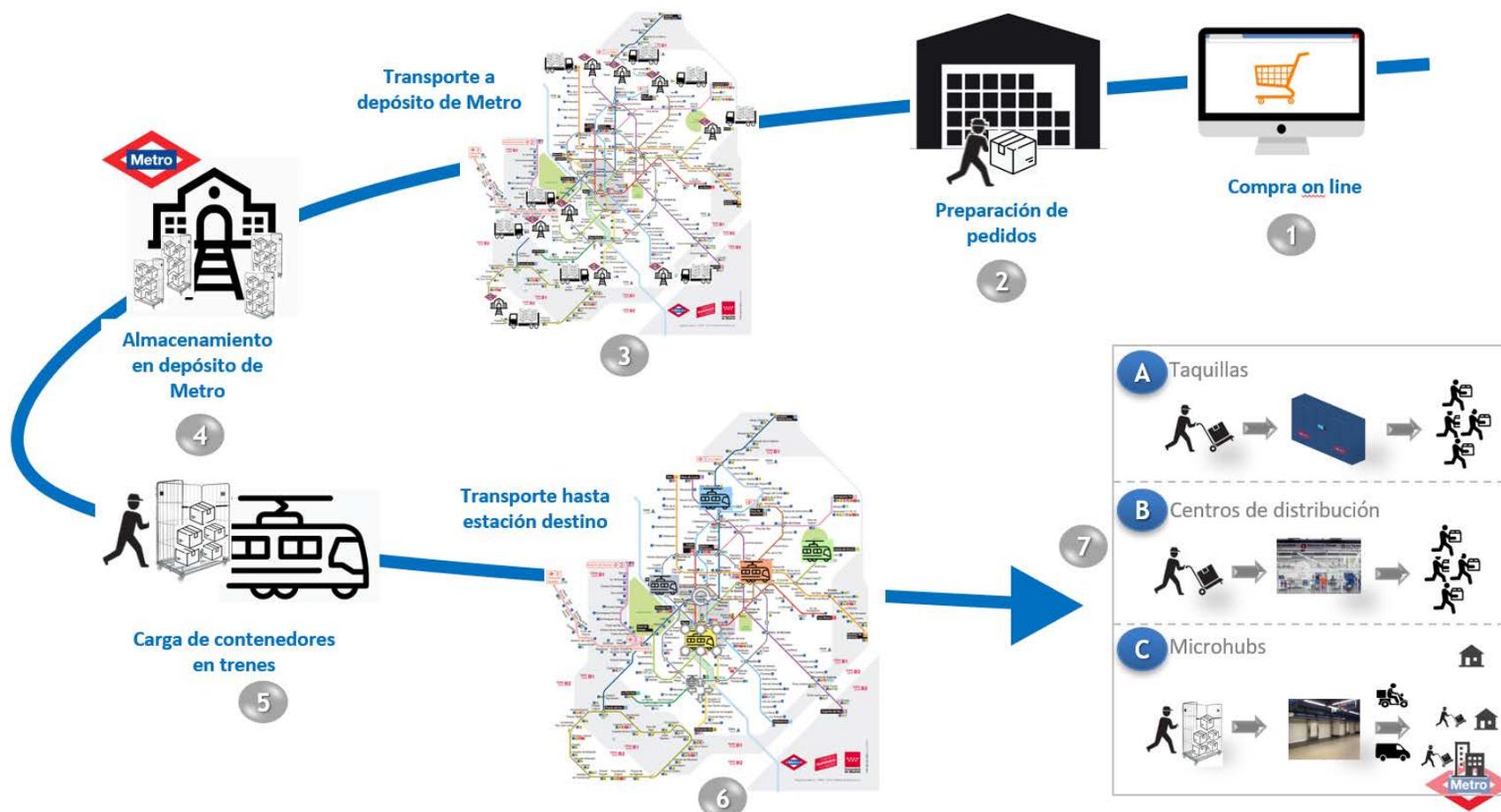


Figura 61. Pasos del modelo M4G aplicado a Metro de Madrid  
Fuente: elaboración propia

Las actividades operativas comunes a realizar, hasta la entrega final del paquete (ver figura 61), siguen el modelo explicado en el apartado 6.2.1. A continuación, se resumen dichas actividades:

1. Se realiza el pedido *online* por un viajero de Metro de Madrid o por un residente de la ciudad de Madrid. En ese momento el cliente selecciona un método de entrega.
2. Se procesa y se preparan los pedidos *online* en el centro logístico (del minorista o del operador, según el caso). En una ciudad como Madrid, estos centros de almacenaje y preparación de pedidos se ubican en las afueras de la ciudad (corredor del Henares, Alcobendas, Getafe, Pinto, etc.). En ellos, se preparan los paquetes y se señalan los contenedores rodantes que los transportan (ver figura 62), quedando listos para el transporte y diferenciándose por estación.



Figura 62. Contenedor rodante cargado con paquetes  
Fuente: elaboración propia

3. Transporte de paquetes B2C hasta un depósito de Metro: los paquetes se trasladan desde el centro logístico situado a las afueras de Madrid hasta el depósito de Metro seleccionado. El transporte se realiza con un camión pesado cargado de contenedores rodantes llenos de paquetes B2C y la mercancía se descarga en un espacio habilitado en el depósito.
4. Almacenamiento temporal en el depósito de Metro de Madrid: los contenedores rodantes se almacenan en una carpa o almacén de Metro durante un breve periodo de tiempo (horas o días, según el caso).
5. Traslado y carga de contenedores rodantes en trenes: antes de iniciar el reparto de los pedidos de *e-commerce*, se trasladan los contenedores desde el almacén temporal hasta las vías donde se sitúan los trenes que inician su recorrido desde el depósito.

Se colocan los contenedores rodantes en los coches que componen un tren. Dependiendo de la alternativa seleccionada, los trenes tienen una composición de coches con viajeros más coche con paquetes o el tren se compone solo de coches con paquetes.

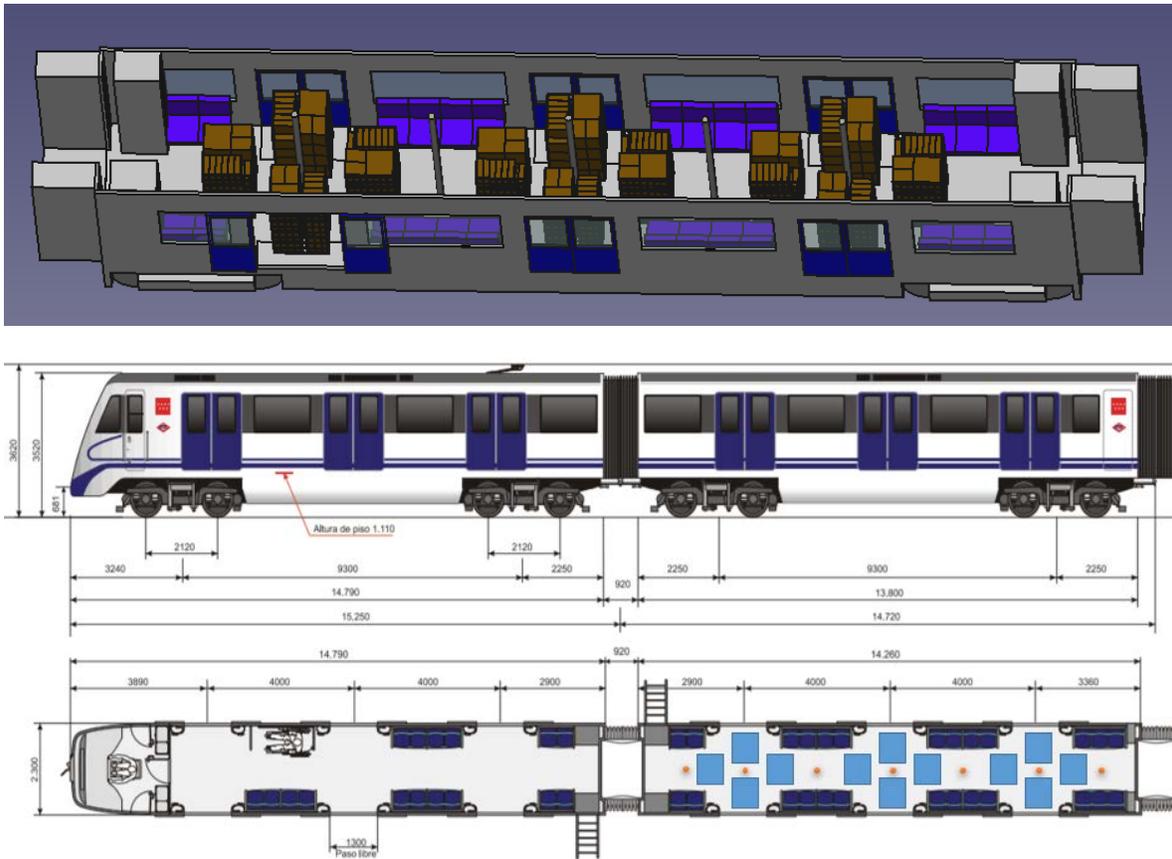


Figura 63. Coche serie 3000 de Metro de Madrid cargado con contenedores rodantes  
Fuente: elaboración propia a partir de Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

6. Transporte desde el depósito de Metro hasta la estación de destino: se transportan los pedidos de *e-commerce* en trenes desde el depósito de Metro (inicio de la ruta) hasta cada una de las estaciones destino donde se descargan los contenedores rodantes con paquetes.
7. Entrega al cliente final: dentro de todas las opciones vistas en el apartado 6.2.1., se consideran, por sus ventajas y adecuación al modelo propuesto, las tres opciones siguientes como modo de entrega al cliente: (i) recogida en las taquillas inteligentes situadas en la estación, (ii) entrega al cliente en los centros de recogida, o (iii) entrega en el domicilio.

Según la modalidad de entrega, la última parte del proceso logístico difiere desde el momento en que los paquetes llegan a la estación a través de los trenes de Metro. Se muestran en la figura 64 y se detallan a continuación:

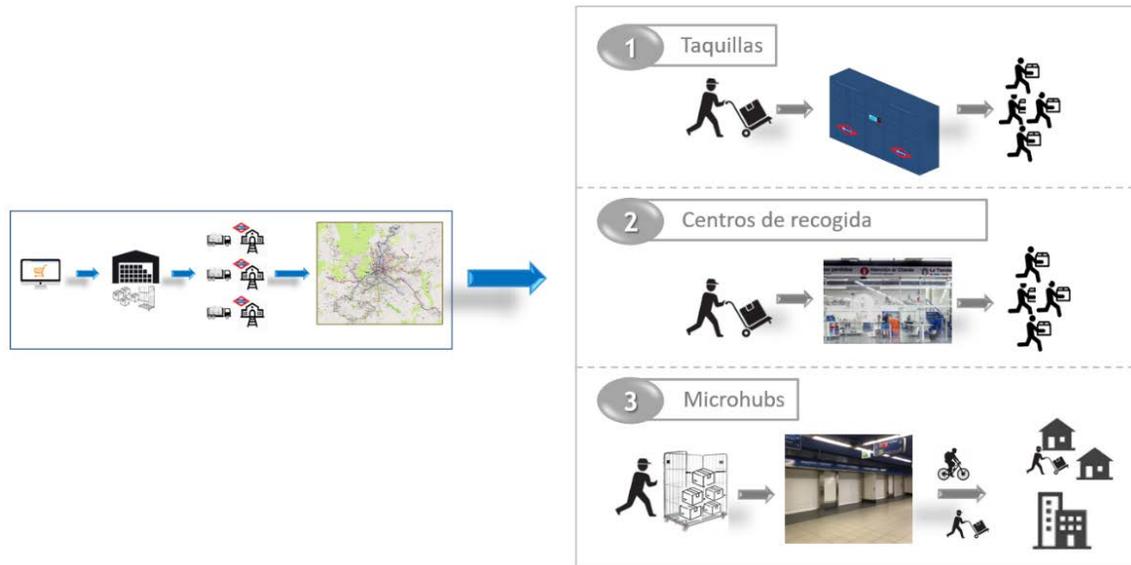


Figura 64. Alternativas de entrega para el modelo M4G

Fuente: elaboración propia

- a) Recogidas de paquetes dentro de la estación mediante taquillas inteligentes: el operador logístico lleva directamente los paquetes desde el tren hasta la taquilla. El cliente no está presente cuando el operador logístico deja el paquete en la taquilla de la estación de Metro de Madrid y recibe un mensaje para que pueda recoger el paquete en uno de los cajones de la taquilla.
- b) Entrega al cliente en el centro de recogida: funciona similar a una tienda de conveniencia o punto de recogida. El operador logístico lleva directamente los paquetes desde el tren hasta el centro de recogida que está dentro de la estación de Metro. Hay una persona que entrega el paquete al cliente.
- c) Entrega en el domicilio: el cliente recibe el paquete en su casa. En esta alternativa de entrega, el operador logístico traslada los paquetes desde el tren hasta un almacén urbano (*microhub*) situado dentro de la estación de Metro. En el almacén urbano, se clasifica para que pueda ser distribuido al domicilio u oficina del cliente final. Este último reparto, para mantener el enfoque sostenible del proceso, se hace con medios «limpios», es decir, con una bicicleta o a pie, ya que los puntos de entrega se concentran en una superficie concreta y no extensa.

## 7.5. Cuantificación de la demanda del modelo M4G

La demanda de pedidos de *e-commerce* considerada en el modelo varía en función del tipo de cliente final (viajeros de Metro o residentes de los barrios de Madrid) y de la preferencia del cliente a la hora de la entrega (taquillas, centros de recogida o domicilio). Por tanto, es la suma de dos componentes: (1) viajeros de Metro de Madrid y (2) residentes de los barrios de Madrid.

1. Viajeros de Metro de Madrid: la demanda diaria de pedidos de *e-commerce* por estación parte del número de viajes al día que se producen en Metro para que, una vez que se aplica el método de proporciones en cadena, pueda obtenerse el número de pedidos por estación que realizarían esos viajeros.

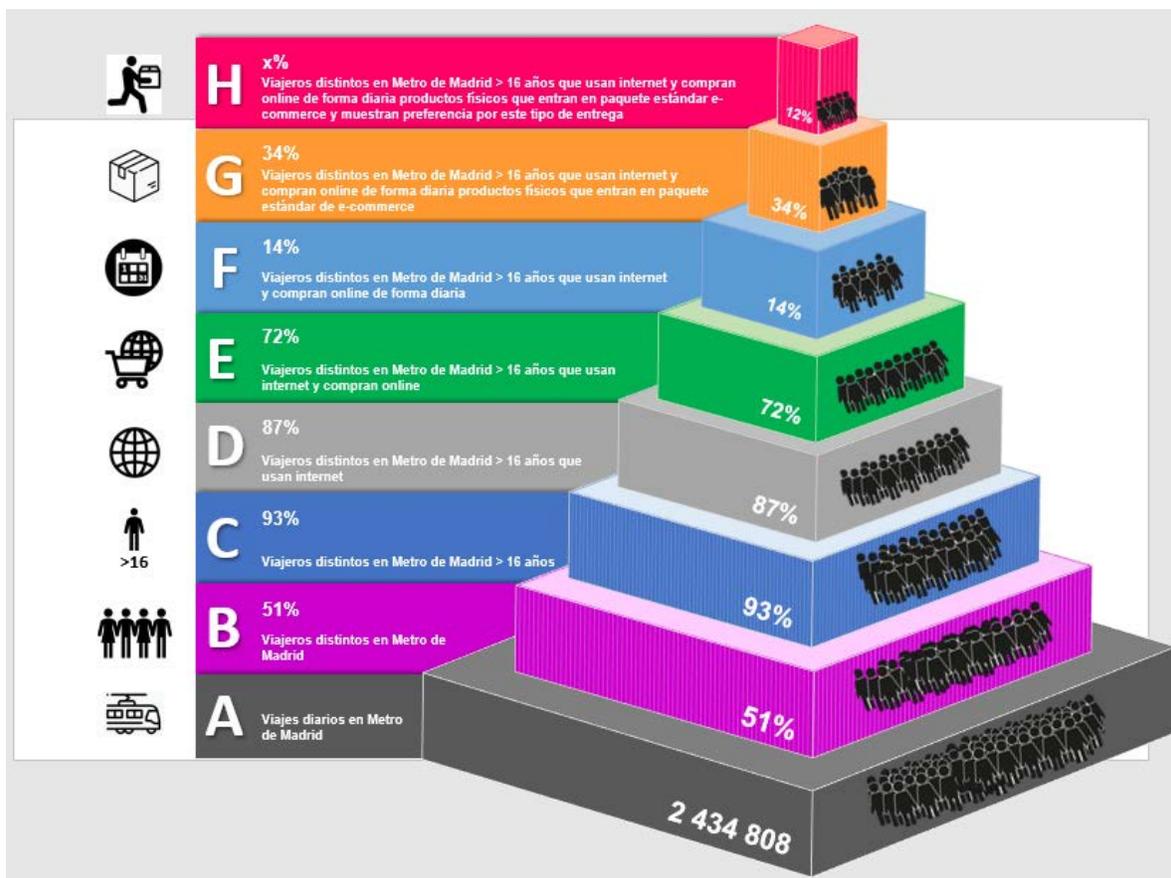


Figura 65. Cálculo de la demanda de paquetes de *e-commerce* de viajeros de Metro  
Fuente: elaboración propia

2. Residentes en barrios cercanos a una estación de Metro: se parte del número de personas residentes en un barrio de Madrid mayores de 16 años y, aplicando de forma análoga el método de proporciones en cadena, se obtiene el número diario de personas que realizan pedidos *online* y que muestran preferencia por un deter-

minado modo de entrega. Si dentro de un barrio de Madrid existen varias estaciones como posibles puntos de entrega, se divide la demanda potencial de residentes por el número de estaciones.



Figura 66. Estaciones de Metro dentro del barrio de Goya

Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps (<https://www.google.com/maps>)

En el caso de la figura 66, a modo de ejemplo, se puede observar que el barrio de Goya tiene 4 estaciones dentro de su perímetro. Para este caso, la demanda de paquetes de *e-commerce* de residentes se reparte entre las estaciones donde se realice la entrega.

Para los casos de recogida de paquetes de *e-commerce* en estación (taquillas o centros de recogida), una vez que se obtiene la suma de los dos componentes es necesario excluir los valores comunes en ambos sumandos, es decir, aquel grupo de personas que son viajeros habituales de Metro de Madrid y residentes cercanos a una estación.

## 7.6. Factores técnico-operativos de trenes y estaciones y factores logísticos para el modelo M4G en la ciudad de Madrid

### Factores técnico-operativos

*Tipo de tren y tamaño del contenedor*

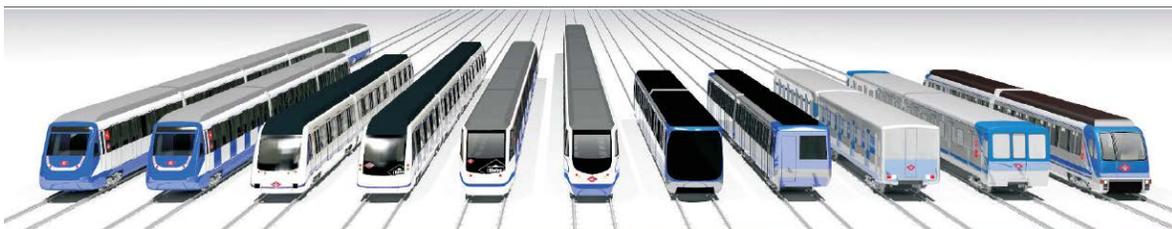


Figura 67. Series de trenes en Metro de Madrid en 2021  
Fuente: Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

Circulan siete modelos básicos (series) de trenes en Metro de Madrid. Dos modelos circulan por líneas de gálibo estrecho (L1 a L5 y Ramal), mientras que los otros cinco operan por las líneas de gálibo ancho (L6 a L11). Este hecho determina la capacidad interior de cada coche y el tamaño del contenedor utilizado para el transporte de paquetes.

Para las líneas de gálibo estrecho, cada coche tiene una capacidad que va, desde los 11 contenedores rodantes grandes ( $1,2 \times 0,8 \times 1,7$  con  $1,4688 \text{ m}^3$ ) en las líneas 1 y 5, hasta los 12 contenedores medianos ( $0,8 \times 0,7 \times 1,7$  con  $0,8568 \text{ m}^3$ ) para las líneas 2, 3 y 4.

En la figura 68 se muestra un diagrama de dos coches de la serie 2000 con contenedores y su correspondiente interior.

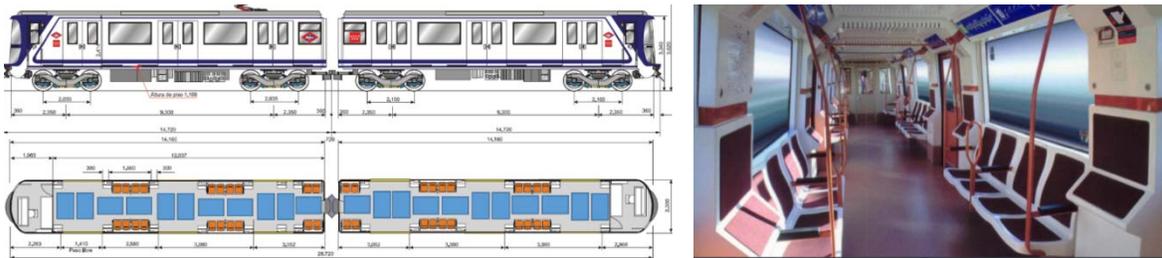


Figura 68. Diagrama de dos coches: serie (izquierda) e imagen interior (derecha)  
Fuente: elaboración propia a partir de Metro de Madrid (<https://www.metromadrid.es/es>)

Para las líneas de gálibo ancho, cada coche tiene una capacidad que alcanza los 16 contenedores rodantes grandes ( $1,2 \times 0,8 \times 1,7$  con  $1,4688 \text{ m}^3$ ).

Los contenedores rodantes grandes tienen una capacidad que varía entre 35 y 45 paquetes de *e-commerce*. Para el caso de los contenedores medianos, estos pueden contener entre 20 y 28 paquetes.

#### *Operativa de trenes y tiempo de descarga de contenedores en estación*

Existen dos modos de transportar los paquetes de *e-commerce* a través de los trenes: coches compartidos con viajeros y coches específicos de carga.

En el caso de trenes compartidos, se considera como opción más eficiente que los trenes que prestan servicio para los viajeros, al inicio de cada jornada, reserven el último coche para el transporte de paquetes. Un tren compartido por viajeros y mercancías no significa que en un mismo coche se mezclen viajeros y paquetes; por ejemplo, si la composición del tren es de 6 coches, los 5 primeros se destinan a viajeros y el último a mercancía. Las labores de carga de contenedores se realizan en el depósito, antes de que el tren comience a dar servicio. Para la descarga de contenedores, en cada una de las estaciones, el tiempo debe ser similar al actual tiempo de parada en una estación de Metro de Madrid (de media, 30-40 segundos).

Para el caso de los trenes específicos, el propósito es que el reparto de paquetes presente la menor afección posible a los viajeros de Metro. Por este motivo, la carga de la mercancía se realiza en los depósitos donde se inicia el trayecto y en la franja horaria donde exista menos

frecuencia (mayor intervalo de tiempo entre trenes). En el caso de Madrid, los horarios valle con menor frecuencia de trenes se concentran a partir de las 0:00 (15 minutos entre cada tren de viajeros). Para la descarga de contenedores en cada una de las estaciones, el tiempo de parada en cada estación varía en función del número de contenedores que deben descargarse.

#### *Tamaño de las taquillas, de los centros de recogida y del microhub en Metro*

Para la recogida de los paquetes en taquillas inteligentes, se consideran dos tipologías en función del número de pedidos de *e-commerce* que genere la estación:

- Taquillas grandes: con 5 diferentes tipologías de paquetes (desde  $0,03 \text{ m}^3$  hasta  $0,3 \text{ m}^3$ ) y con una capacidad máxima de 69 cajas ( $5,25 \text{ m}^3$ ). La dimensión de la taquilla es de  $4,5 \times 2,5 \times 0,6 \text{ m}$ .
- Taquillas medianas: con 5 diferentes tipologías de paquetes (desde  $0,03 \text{ m}^3$  hasta  $0,3 \text{ m}^3$ ) y con una capacidad máxima de 34 cajas ( $2,85 \text{ m}^3$ ). La dimensión de la taquilla es de  $2,5 \times 2,5 \times 0,6 \text{ m}$ .

Con relación a los centros de recogida en estaciones y *microhubs* de almacenes intermedios, la superficie de estos locales viene determinada por el número de paquetes máximos que recibe la estación donde se sitúa el centro de recogida o el *microhub*. Para una demanda de 1000 paquetes diarios por estación, los metros cuadrados mínimos necesarios en el almacén o centro de recogida son, aproximadamente,  $70\text{-}80 \text{ m}^2$ .

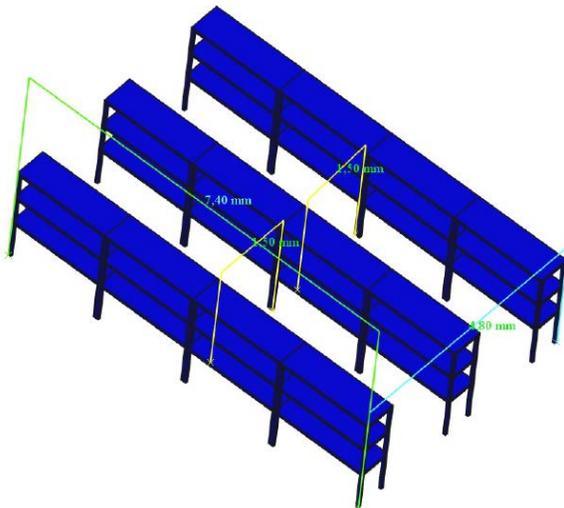


Figura 69. Disposición de estanterías para almacenamiento de paquetes en un *microhub*

Fuente: elaboración propia

## Factores de operaciones logísticas

### *Medios de transporte utilizados en el modelo M4G*

En origen, los paquetes están almacenados en el almacén del operador logístico o en el del *marketplace*. Los medios de transporte considerados son:

- Camiones pesados (HGV): se realiza con camiones pesados con una capacidad de, al menos, 22 contenedores rodantes. El transporte se realiza desde el centro logístico de consolidación situado a las afueras de la ciudad de Madrid (corredor del Henares, Alcobendas, Getafe, Pinto, etc.) al depósito de Metro donde se realizará el almacenamiento temporal. La distancia entre estas ubicaciones y los depósitos se sitúa en 20-30 km.
- Trenes (Metro): compartidos a primera hora o específicos en el último tramo de la jornada, desde el depósito seleccionado de Metro de Madrid hasta las estaciones destino. Una vez se realiza la descarga de los contenedores en las estaciones, se trasladan a través de ascensores o escaleras (mediante carretillas subeescaleras) hasta su ubicación definitiva (taquilla, centro de recogida o *microhub*).
- Entrega fuera de la estación (domicilio): los paquetes se almacenan de forma temporal en el *microhub* de la estación de Metro. Para la entrega posterior a domicilio, se considera el reparto a pie o con vehículos no motorizados como la alternativa más eficaz y sostenible en términos medioambientales. Se utilizan bicicletas o triciclos de reparto eléctricos, con una capacidad de hasta 250 kg.



Figura 70. Bicicleta de reparto (*cargo bike*)

Fuente: Mensos (<https://mentos.es>)

### *Medios de transporte utilizados en el modelo actual*

En el presente modelo para la ciudad de Madrid, el reparto se realiza desde el almacén del operador logístico, a través de furgonetas, hasta el domicilio del cliente donde se hace la entrega. La furgoneta inicia la ruta con diferentes destinos repartidos por localizaciones geográficas.



# Capítulo 8. Aplicación de la metodología al caso de estudio

## 8.1. Diferentes alternativas de aplicación del modelo M4G

Se distinguen tres alternativas del modelo M4G teniendo en cuenta un aspecto clave para el cliente de *e-commerce*: el lugar y el modo de entrega del paquete. Son las siguientes:

Tabla 17. Alternativas y características del modelo M4G

Alternativa	Características de la entrega	Modo de transporte desde el centro logístico al cliente	Demanda de paquetes
Alternativa 1 (A1)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> en <b>taquillas</b> inteligentes en la estación	HDV + trenes	DT1
Alternativa 2 (A2)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> en <b>centros de recogida</b> en la estación	HDV + trenes	DT2
Alternativa 3 (A3)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> en <b>domicilio</b>	HDV + trenes + bicicletas adaptadas	DT3

Fuente: elaboración propia

En función de cada alternativa de entrega, la demanda de paquetes varía por cada estación y, de igual forma, también el número total de paquetes por línea.

Cada una de las alternativas del modelo M4G se compara con el modelo actual de reparto de paquetes de *e-commerce* a través de LCV, que es el denominado escenario de referencia. Como ejemplo, para la alternativa 1, el escenario de referencia es:

Tabla 18. Escenario de referencia para la alternativa 1

Alternativa	Características de la entrega	Modo de transporte desde el centro logístico al cliente	Demanda de paquetes
Escenario de referencia para la alternativa 1 (A1-0)	Entrega de paquetes de <i>e-commerce</i> con LCV en el domicilio del cliente	HDV + LCV	DT1

Fuente: elaboración propia

Para cada una de las 3 alternativas del modelo M4G, se consideran dos variantes en función del modo de utilización de los trenes para el transporte de mercancías a través de la red de Metro: trenes compartidos con viajeros o trenes específicos para el movimiento de mercancías.

Tabla 19. Alternativas, variantes y escenario de referencia

Alternativa	Entrega a cliente	Demanda de paquetes	Modo de transporte desde centro logístico	Alternativa + variante	Escenario de referencia
A1	Taquilla en estación	DT1	HDV + trenes compartidos	A1.1.	A1-0
			HDV + trenes específicos	A1.2.	
A2	Centro de recogida en estación	DT1	HDV + trenes compartidos	A2.1.	A2-0
			HDV + trenes específicos	A2.2.	
A3	Domicilio	DT1	HDV + trenes compartidos	A3.1.	A3-0
			HDV + trenes específicos	A3.1.	

Fuente: elaboración propia

## 8.2. Cálculo de la demanda de paquetes para las alternativas del modelo

Siguiendo lo explicado en el apartado 6.3., se cuantifica la demanda de paquetes diaria para las alternativas del modelo M4G. Además, se detallan en número de contenedores rodantes necesarios para el transporte de esos paquetes.

Para el cálculo de la demanda, se tienen en cuenta aquellas estaciones que están dentro de la ciudad de Madrid, excluyendo las estaciones de Metro de Madrid que están en ciudades colindantes. De igual forma, se excluyen las líneas 8 y 11 por tener muy poco alcance.

La demanda diaria de paquetes que corresponde con las distintas alternativas del modelo M4G se muestran en las tablas 20, 21 y 22.

**Alternativa 1: entrega en taquillas**Tabla 20. Alternativa 1: demanda diaria de paquetes de *e-commerce*, contenedores rodantes y estaciones utilizadas

A1			
Línea	Paquetes	Contenedores utilizados	Estaciones
Línea 1	1944	62	33
Línea 2	986	47	20
Línea 3	1191	50	19
Línea 4	836	56	23
Línea 5	1756	54	32
Línea 6	1875	53	28
Línea 7	1138	41	24
Línea 9	1175	39	24
Línea 10	1242	42	22
<i>Total best 3</i>	5575	169	93
<i>Net total best 3</i>	5249	155	88

Fuente: elaboración propia

La demanda está compuesta tanto por los pedidos diarios de los viajeros de Metro como por los pedidos diarios de los residentes cercanos a las estaciones de Metro.

Como se especificó anteriormente, por cuestiones de eficiencia operacional se seleccionan las tres líneas de mayor demanda (*Total best 3*). Debido a que algunas estaciones forman parte de varias líneas (por ejemplo, la estación de Gran Vía forma parte de la L1 y también de la L5), se eliminan las duplicidades para tener registros únicos (*Net total best 3*).

La estimación de paquetes diarios entregados es de 5249 en 88 estaciones diferentes. Los trenes inician el recorrido en los depósitos de las líneas 1, 5 y 6 y entregan paquetes en todas las taquillas inteligentes de cada una de las estaciones (cada estación puede recibir como máximo la capacidad máxima de la taquilla). Una vez depositado el paquete en la taquilla, el viajero de Metro o residente lo retira en la estación más conveniente.

Como ejemplo, en la figura 71 se muestra el número de paquetes por estación para la L6 de Metro (1875 paquetes) para DT1. La distribución a todas las estaciones se realiza desde el depósito ubicado en la estación de Laguna.

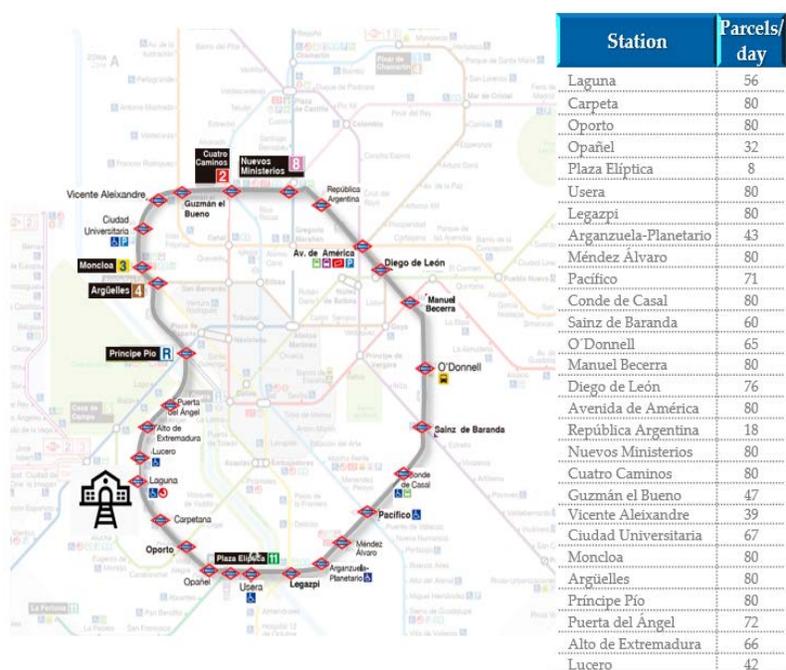


Figura 71. L6 depósito, estaciones y paquetes de e-commerce por estación

Fuente: elaboración propia

### Alternativa 2: entrega en centros de recogida

Tabla 21. Alternativa 2: demanda diaria de paquetes de e-commerce, contenedores rodantes y estaciones con centro de recogida

Alternativa A2			
Línea	Paquetes	Contenedores utilizados	Estaciones con centro de recogida
Línea 1	2147	57	Plaza de Castilla, Cuatro
Línea 2	1645	72	-
Línea 3	2086	89	Villaverde Bajo-Cruce,
Línea 4	1319	58	-
Línea 5	1271	34	-
Línea 6	2421	64	Carpetana, Plaza Elíptica,
Línea 7	1416	38	-
Línea 9	1438	39	-
Línea 10	1485	40	-
Total best 3	6654	210	-

Fuente: elaboración propia

La columna Paquetes de la tabla 21 se corresponde con la suma de las 5 estaciones (donde se situarían los centros de recogida) con mayor demanda de pedidos por cada línea. De estas,

como en el caso anterior, se seleccionan las tres líneas de mayor demanda (*Total best 3*). La estimación de paquetes diarios entregados es de 6654 en 15 estaciones diferentes. Los trenes inician el recorrido en los depósitos de las líneas 1, 3 y 6 y entregan paquetes en los centros de recogida, donde se almacenan hasta que el cliente final retira su paquete. Estos centros de recogida pueden ser también centros que presten servicios alternativos al viajero, como atención al cliente u oficina de objetos perdidos.

En este caso, no hay límite de envío de paquetes por estación (el máximo de entrega diario lo presenta la estación de Sol con 673 paquetes) y, al igual que el caso anterior, la demanda está formada por la suma de pedidos de *e-commerce* que realizan viajeros de Metro y de los residentes de barrios en los que está la estación donde se encuentra el centro de recogida.

### Alternativa 3: entrega en domicilio

En primer lugar, la tabla 22 muestra los barrios de la ciudad de Madrid con mayor número de residentes (de 16 a 74 años) y que disponen de una estación de Metro dentro de ese barrio. Se calcula la demanda diaria de *e-commerce* de sus residentes y se detallan las líneas de Metro que tienen estaciones que dan cobertura a estos barrios.

Tabla 22. Alternativa 3: demanda diaria de paquetes de *e-commerce*, contenedores rodantes y estaciones con centro de recogida

Barrios	Hectáreas	Habitantes	Demanda de paquetes de <i>e-commerce</i>	Líneas con estaciones que dan cobertura al barrio
Aluche	284,981	48 087	1328	L5, L6
Pueblo Nuevo	231,922	46 421	1282	L2, L5, L7
Valverde	898,123	43 322	1197	L10
Pinar del Rey	266,477	38 867	1073	L4
Valdefuentes	1675,800	38 616	1067	-
Embajadores	103,372	37 354	1032	L3
Las Águilas	360,960	37 227	1028	L5, L10
Numancia	184,907	35 824	989	L1
Ventas	319,804	35 287	975	L2
El Pilar	136,321	34 171	944	L7
Peñagrande	288,727	33 991	939	L7
Vista Alegre	158,923	33 872	936	L5, L6
Buena Vista	561,318	33 574	927	L11
San Andrés	925,355	33 029	912	L3
Ensanche de Vallecas	634,112	32 156	888	L1
Palomeras Sureste	310,860	32 111	887	L1

Fuente: elaboración propia

De forma análoga a las alternativas anteriores, se seleccionan las 3 líneas que presentan mayor demanda total de paquetes de *e-commerce*. Dentro de cada línea, se escogen las tres estaciones que están dentro de los barrios con mayor número de residentes. Adicionalmente, se descartan las estaciones que no tienen ascensor ya que dificultaría el mover grandes cantidades de paquetes desde el tren hasta el *microhub*.

Tabla 23. Alternativa 3: demanda diaria de paquetes de *e-commerce*, contenedores rodantes, barrios implicados y estaciones que actúan como *microhub*

Alternativa A3				
Línea	Paquetes	Contenedores	Barrios	Estaciones con <i>microhub</i>
Línea 1	2764	71	(1) Numancia, (2) Ensanche de Vallecas y (3) Palomeras Sur	(1) Portazgo, (2) La Gavia/Las Suerres/Valdecarros y (3) M. Hernández/Sierra Guadalupe
Línea 2	975	41	-	-
Línea 3	1944	81	-	-
Línea 4	1073	45	-	-
Línea 5	3292	84	(1) Aluche, (2) Las Águilas y (3) Vista Alegre	(1) Aluche/Empalme/Casa de Campo, (2) Aluche/Empalme y (3) Eugenia de Montijo
Línea 6	0	0	-	-
Línea 7	3165	81	(1) El Pilar, (2) Pueblo Nuevo y (3) Peñagrande	(1) Lacoma/Avda. Ilustración, (2) Pueblo Nuevo y (3) Peñagrande
Línea 9	0	0	-	-
Línea 10	1197	0	-	-
Línea 11	927	39	-	-
<i>Total best 3</i>	9221	236	-	-

Fuente: elaboración propia

También hay que considerar que pueden existir varias estaciones que den cobertura a un mismo barrio (por ejemplo, en la figura 72 se muestra como las estaciones de Peñagrande, Avenida de la Ilustración y Lacoma están dentro del barrio de Peñagrande). En este caso, se selecciona una de ellas que actúa como *microhub* y da cobertura completa a los residentes de todo el barrio.



Figura 72. Vista aérea del barrio de Peñagrande  
Fuente: Google Maps (<https://www.google.com/maps>)

Las líneas con mayor demanda de pedidos de *e-commerce* por parte de los residentes son L1, L5 y L7. El tren inicia el recorrido en el depósito correspondiente y reparte los paquetes a las tres estaciones de cada línea seleccionada, donde se almacenan temporalmente en un *microhub* situado en la estación correspondiente. Posteriormente, se realizarán las entregas a domicilio.

A modo de resumen, se muestra el número de paquetes, el total de contenedores rodantes necesarios y las estaciones a las que se realiza el reparto con el modelo M4G. Son datos diarios.

Tabla 24. Demanda diaria de paquetes, contenedores y estaciones utilizadas en las alternativas del modelo M4G

Alternativa	Demanda de paquetes	Total de contenedores	Estaciones
Alternativa 1	5249	155	88
Alternativa 2	6654	210	15
Alternativa 3	9221	236	9

Fuente: elaboración propia

### 8.3. Datos de la modelización

Para realizar el cálculo de los principales indicadores del modelo y sus alternativas, se utilizan datos de partida basados en la literatura estudiada y teniendo en cuenta la opinión de los expertos de las principales empresas del sector de paquetería *e-commerce* en Madrid.

Diversos estudios realizados para ciudades distintas (Edwards *et al.*, 2010; Lemke *et al.*, 2016; de Maere, 2018) nos muestran que la productividad de la entrega varía considerablemente según el área donde se realiza. Existen algunas características comunes en toda gran ciudad: a mayor densidad de población, mayor productividad de entrega en la distribución urbana, y existen zonas de alta congestión o críticas, que concentran importantes niveles de actividad econó-

mica. Este tipo de zonas, que incluyen sectores como los centros históricos, los distritos comerciales, los de entretenimiento, entre otros, albergan un elevado número de establecimientos comerciales y, por tanto, atraen continuamente una alta intensidad de flujos logísticos (Merchán *et al.*, 2015).

En nuestro caso de estudio, tenemos que considerar el funcionamiento actual de la logística de última milla en Madrid que responde al esquema tradicional, con grandes centros de clasificación y reparto situados en el extrarradio. Se trata de centros logísticos con grandes capacidades y volúmenes. Desde estos centros, y siempre mediante furgonetas ligeras, se accede a los diferentes núcleos urbanos en largos periodos de reparto.

Validación de datos del escenario actual: con objeto de corroborar la fiabilidad de estos datos y particularizarlos a la ciudad de Madrid, durante los meses de enero y febrero de 2020 se llevó a cabo una consulta individual con cuatro expertos de los principales operadores logísticos de comercio electrónico que operan en Madrid. A partir de esta información, se determinaron los costes operativos implicados en la actividad de reparto de *e-commerce* (Opex y Capex) en el escenario actual. Se estableció en 60-100 paquetes transportados por un mensajero estándar. En cuanto al peso transportado, el grupo de expertos consultados consideró un peso medio de entre 1,5 y 3 kg por bulto. El modelo considera un valor de 2 kg, siguiendo los datos de una encuesta de International Post Corporation (2020).

Con base en la literatura y las opiniones de los expertos, se consideran los siguientes valores con relación al reparto de paquetes de *e-commerce* en la ciudad de Madrid:

- T (jornada laboral) = 8 horas
- Km (kilómetros recorridos) = 90 km
- Pr (paquetes en ruta) = 80
- FTHR (tasa de acierto a la primera) = 25 %
- Pd (paquetes entregados) = 60
- Peso del paquete = 2 kg
- Distancia del centro de cumplimiento electrónico al depósito = 25 km
- Peso del contenedor rodante = 15 kg
- Logística inversa depósito Metro-Centro de consolidación = 5 % paquetes

Optimización de la carga de camiones desde el centro de cumplimiento electrónico hasta la estación de Metro: >80 % ( $\geq 22$  contenedores grandes o  $\geq 35$  contenedores rodantes medianos).

## 8.4. Cálculo de los principales indicadores para las alternativas del modelo

### 8.4.1. Principales indicadores de las diferentes alternativas del modelo M4G

Para cada opción de entrega (DT1, DT2 o DT3), la tabla 25 muestra los principales indicadores de las tres alternativas: número de paquetes entregados al día, estaciones utilizadas, emisiones emitidas de CO<sub>2</sub>, kilómetros recorridos y consumo de combustible. Cada alternativa de entrega presenta los datos teniendo en cuenta (i) el escenario de referencia actual (*A<sub>n</sub>-0*), (ii) la utilización de trenes compartidos con viajeros (*shared trains*) o (iii) la utilización de trenes específicos (*dedicated trains*).

Tabla 25. Principales indicadores de las alternativas del modelo M4G

	DT1 (Taquillas inteligentes)			DT2 (Centros de recogida)			DT3 (Entrega a domicilio)		
	<i>Courier</i> (A1-0)	<i>Shared trains</i> (A1)	<i>Dedicated trains</i> (A1)	<i>Courier</i> (A2-0)	<i>Shared trains</i> (A2)	<i>Dedicated trains</i> (A2)	<i>Courier</i> (A3-0)	<i>Shared trains</i> (A3)	<i>Dedicated trains</i> (A3)
Paquetes de <i>e-commerce</i> entregados por día		5249			6654			9221	
Estaciones de Metro utilizadas	-		88			15	-		9
Emisiones de CO <sub>2</sub> LDV/HDV (toneladas/año)	329,97		70,02	418,25		87,52	579,61		96,28
Kilómetros LDV/HDV (km/día)	7874		400	9981		500	13 831		550
Consumo diésel (litros/año)	113 715		22 908	144 140		28 635	199 746		31 499

Fuente: elaboración propia

### 8.4.2. Cálculo de los costes externos, costes económicos y coste total por paquetes

Tomando como base el *Manual de costes externos* de la Comisión Europea (European Commission, 2020), la tabla 26 muestra la valoración de los costes diarios medioambientales y sociales (€) que supone cada una de las diferentes alternativas de entrega de paquetes de *e-commerce*. En su segunda columna, se indica el modo de transporte de paquetes que genera la externalidad (furgoneta LDV, camión HDV o Metro).

Tabla 26. Costes externos de las alternativas del modelo M4G

Coste externo	Modo	DT1			DT2			DT3			
		<i>Courier (A1-0)</i>	<i>Shared trains (A1)</i>	<i>Dedicated trains (A1)</i>	<i>Courier (A2-0)</i>	<i>Shared trains (A2)</i>	<i>Dedicated trains (A2)</i>	<i>Courier (A3-0)</i>	<i>Shared trains (A3)</i>	<i>Dedicated trains (A3)</i>	
Medioambiental	Ruido Cr	LDV	133,86			169,67			235,13		
		HDV Rigid 20-26 t EIV		41,14	41,14		65,89	65,89		92,93	92,93
		Metro									
	Costes por polución aire Cpa	LDV Euro 4 Diesel	329,92			418,19			579,51		
		HDV Rigid 20-26 t EIV		55,38	55,38		88,69	88,69		125,10	125,10
		Metro			22,34			23,87			37,89
	Coste de cam- bio climático Ccc	LDV Euro 4 Diesel	203,15			257,50			356,84		
		HDV Rigid 20-26 t EIV		34,81	34,81		55,75	55,75		78,63	78,63
		Metro			23,94			21,06			25,84
	<b>Total medioambiental (€/día)</b>		<b>666,93</b>	<b>131,33</b>	<b>177,62</b>	<b>845,36</b>	<b>210,33</b>	<b>255,27</b>	<b>1171,48</b>	<b>296,67</b>	<b>360,40</b>
	Social	Costes de ac- cidentes Ca	LDV Euro 4 Diesel	59,84			75,85			105,11	
			HDV Rigid 20-26 t EIV		3,62	3,62		5,07	5,07		7,15
Metro					5,88			6,28			9,97
Costes de congestión Cc		LDV Near capacity	2055,1			2604,93			3609,86		
		HDV Near capacity		157,05	157,05		174,5	174,50		191,95	191,95
<b>Total social (€/día)</b>		<b>2114,94</b>	<b>160,67</b>	<b>166,55</b>	<b>2680,79</b>	<b>179,57</b>	<b>185,85</b>	<b>3714,98</b>	<b>199,10</b>	<b>209,07</b>	

Fuente: elaboración propia

Los costes económicos diarios (Capex: gastos de capital y Opex: gastos operativos) incurridos en la actividad de reparto de paquetes, tanto en el escenario actual como en las alternativas propuestas, se muestran en las tablas 27 y 28.

Tabla 27. Costes económicos del modelo M4G (escenario de referencia)

Coste (€)/día	Escenario de referencia		
	<i>Courier (A1-0)</i>	<i>Courier (A2-0)</i>	<i>Courier (A3-0)</i>
Coste de personal (personas por horas)	8362,02	10 599,27	14 688,25
Coste de materiales ( <i>renting</i> , gasoil, teléfono, consumibles, etc.)	1988,37	2520,35	3492,65
Costes estructurales (alquiler local, gasto personal administrativo, PRL, etc.)	1035,04	1311,96	1818,09
<b>Total costes económicos (operativos)</b>	<b>11 385,43</b>	<b>14 431,58</b>	<b>19 999,00</b>

Fuente: elaboración propia

Tabla 28. Costes económicos del modelo M4G (alternativas)

Coste (€)/día	Trenes compartidos			Trenes específicos		
	<i>Shared trains (A1)</i>	<i>Shared trains (A2)</i>	<i>Shared trains (A3)</i>	<i>Dedicated trains (A1)</i>	<i>Dedicated trains (A2)</i>	<i>Dedicated trains (A3)</i>
Capex (10 años)	601,07	643,57	559,88	601,07	643,57	559,88
Opex operador logístico	5986,69	7528,66	16 778,74	5825,40	7367,37	16 538,37
Opex + <i>Fee</i> Metro Madrid	2280,04	5516,05	3856,20	2782,07	5957,77	4398,00
<b>Total costes económicos (operativos)</b>	<b>8867,79</b>	<b>13 688,28</b>	<b>21 194,83</b>	<b>9208,54</b>	<b>13 968,72</b>	<b>21 496,25</b>

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los factores operativos y las externalidades producidas en la entrega de paquetes de *e-commerce*, el coste total del paquete se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 29. Total coste por paquete de las alternativas en el modelo M4G

€	DT1 (Taquillas inteligentes)			DT2 (Centros de recogida)			DT3 (Entrega a domicilio)		
	<i>Courier</i> (A1-0)	<i>Shared</i> <i>trains</i> (A1)	<i>Dedicated</i> <i>trains</i> (A1)	<i>Courier</i> (A2-0)	<i>Shared</i> <i>trains</i> (A2)	<i>Dedicated</i> <i>trains</i> (A2)	<i>Courier</i> (A3-0)	<i>Shared</i> <i>trains</i> (A3)	<i>Dedicated</i> <i>trains</i> (A3)
Costes económico-operativos	2,169	1,689	1,754	2,169	2,057	2,099	2,169	2,299	2,331
Costes medioambientales	0,127	0,025	0,034	0,127	0,032	0,038	0,127	0,032	0,039
Costes sociales	0,403	0,031	0,032	0,403	0,027	0,028	0,403	0,022	0,023
<b>Total coste por paquete</b>	<b>2,699</b>	<b>1,745</b>	<b>1,820</b>	<b>2,699</b>	<b>2,116</b>	<b>2,165</b>	<b>2,699</b>	<b>2,352</b>	<b>2,393</b>

Fuente: elaboración propia

## Capítulo 9. Análisis de resultados

---

Los costes totales estimados para las alternativas propuestas indican que el uso del sistema ferroviario metropolitano para entregar paquetes de comercio electrónico puede ser una alternativa prometedora desde un punto de vista económico, social y ambiental.

Esta sección analiza los resultados desde varias perspectivas:

### 1. Coste operativo por paquete

La figura 73 muestra los costes económicos de cada una de las alternativas del modelo, incluyendo el escenario de referencia. Dentro de los costes económico-operativos el mayor peso lo representan los costes de personal. En el escenario de referencia, se sitúan en el 73,4 % de los costes totales. Los costes de materiales (furgoneta, materiales, fungibles, pistolas de escaneado, gasolina, móvil, etc.) suponen el 17,5 % y los costes de estructura (alquiler del local, gasto del personal administrativo, prevención de riesgos laborales, LPDO, etc.) llegan al 9,1 %. Para el caso del modelo M4G, los costes operativos se dividen en los costes en infraestructuras necesarias, los costes de operación del operador logístico y los costes de operación de Metro de Madrid (ver Anexo III con el desglose de costes).

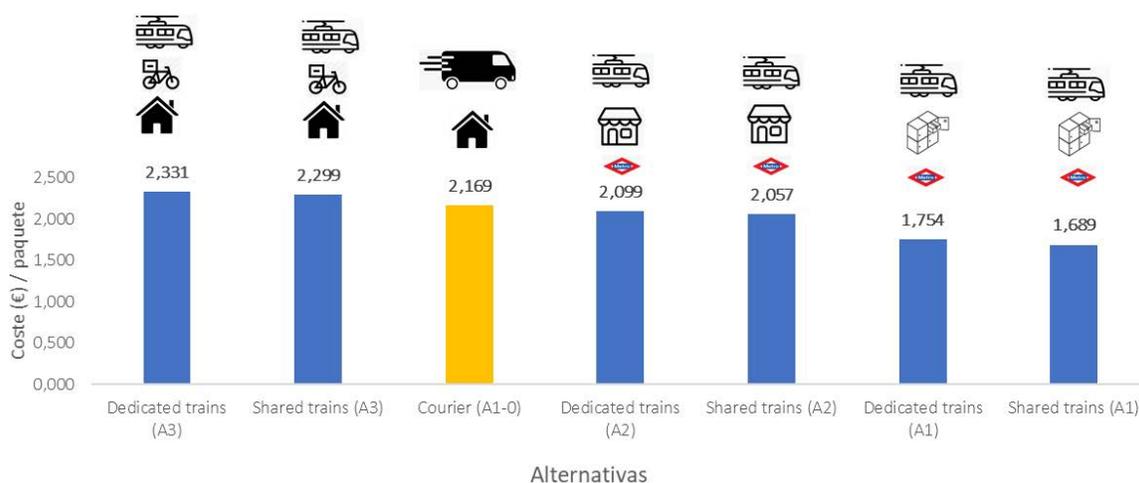


Figura 73. Costes económicos (operativos) de las alternativas del modelo M4G

Fuente: elaboración propia

En términos económicos, el escenario de referencia de reparto con furgonetas incurre en mayores costes que el modelo M4G para los casos de entrega en centros de recogida o en taquillas inteligentes. La reducción va desde un 22,13 % (A1: *shared trains*: taquillas inteligentes y trenes compartidos) a un 3,20 % (A2: *dedicated trains*: centros de recogida y trenes específicos). La principal diferencia en el coste entre la entrega en taquillas y en los centros de recogida radica en que, mientras en el caso de las taquillas es el viajero/residente quien realiza la recogida sin personal, en el centro de recogida se necesita personal y centros de nueva creación para que se entregue ese paquete al cliente.

En el caso de la entrega a domicilio, al incorporar un nuevo modo de transporte desde la estación de Metro al domicilio del cliente se incrementan los costes operativos. Existe una doble ruptura de carga: en primer lugar, cuando llegan los paquetes al depósito de Metro, y, en segundo lugar, cuando los paquetes llegan al *microhub* antes de realizar el reparto a domicilio. En este caso, se emplean repartidores desde la estación a los domicilios de los clientes de *e-commerce*. En consecuencia, los costes son un 7,50 % y 5,99 % superiores.

La diferencia entre compartir trenes con viajeros y utilizar trenes específicos no tiene mucha incidencia en los costes operativos para las alternativas planteadas. Cuando se dedican trenes específicos, aparecen costes adicionales en Metro de Madrid derivados de la puesta en circulación de trenes no previstos, pero de importe muy poco relevante. Estos costes son: coste de circulación de trenes por kilómetro y coste de administración por kilómetro recorrido. Por otro lado, en esta alternativa, los costes del operador logístico se reducen ligeramente en las actividades relacionadas con la carga de trenes, ya que en una misma actividad se puede cargar un tren completo con paquetes.

## 2. Coste externo por paquete

Para poder comparar la eficiencia social y ambiental de cada alternativa, es necesario asociar el coste externo total por cada paquete entregado y para cada una de las alternativas, como se muestra en la figura 74.

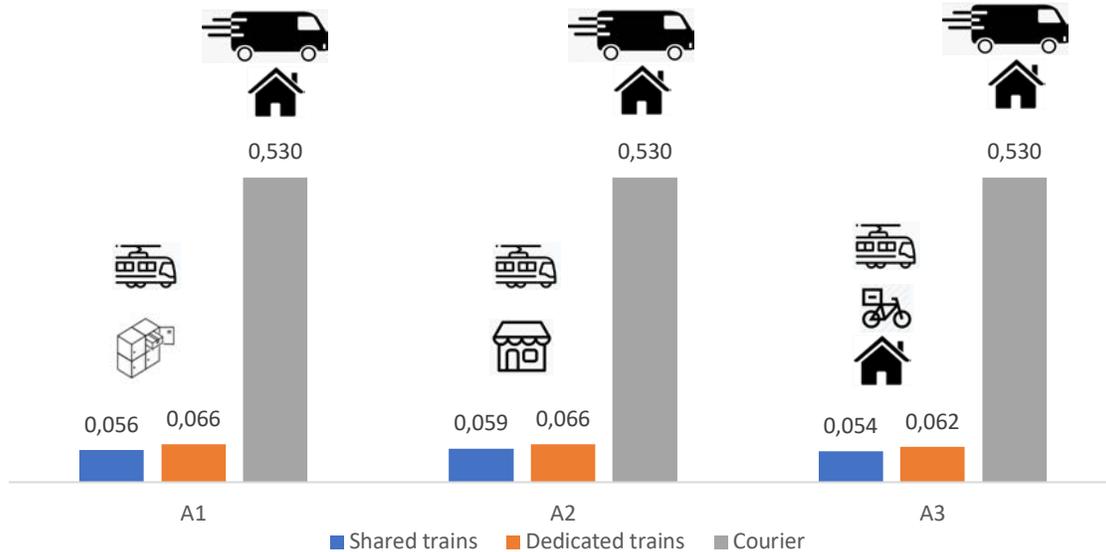


Figura 74. Costes externos (sociales + medioambientales) de las alternativas del modelo M4G

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la figura 74, las tres alternativas del modelo M4G presentan unos costes externos notablemente inferiores a la situación de reparto actual mediante furgonetas. En concreto, los costes medioambientales y sociales suponen entre un 87,49 % y un 89,85 % menos que los mismos costes externos del modelo actual de reparto.

Dentro de las alternativas del M4G, los valores son similares y las externalidades provocadas por los trenes específicos son poco relevantes. Como puede verse en el desglose de cálculos de los costes externos de las alternativas con la misma demanda de paquetes, los costes externos de los camiones pesados que viajan a los depósitos de Metro suponen un impacto significativamente mayor que las externalidades de los trenes dedicados que transportan paquetes. Para las alternativas que involucran trenes, la diferencia en los costes externos radica en optimizar el número de camiones pesados que transportan contenedores empleados en el transporte a depósitos de Metro.

### 3. Coste por tipo de externalidad

Dentro de todos los costes externos, los costes de congestión son los que producen mayor impacto en cualquiera de los escenarios analizados. Dentro del modelo M4G, la congestión media de las tres alternativas (41,3 %) es producida por los camiones que transportan paquetes desde el centro logístico a los depósitos de Metro, y en el caso del escenario actual, la congestión (73,9 %) es producida por el número de furgonetas que reparten desde el centro logístico al domicilio de cada cliente.

Con relación al medioambiente, la polución del aire es el principal causante de los costes debido a la participación dominante que ostenta el transporte como medio por carretera (24,6 % en el caso de M4G y 11,9 % en *courier*). La externalidad con menor relevancia es el coste que se produce por accidentes con, aproximadamente, un 2 % de los costes externos. La figura 75 muestra la media de los costes externos de las alternativas del modelo M4G (A1-A3) y el coste externo del modelo actual de reparto (*courier*).

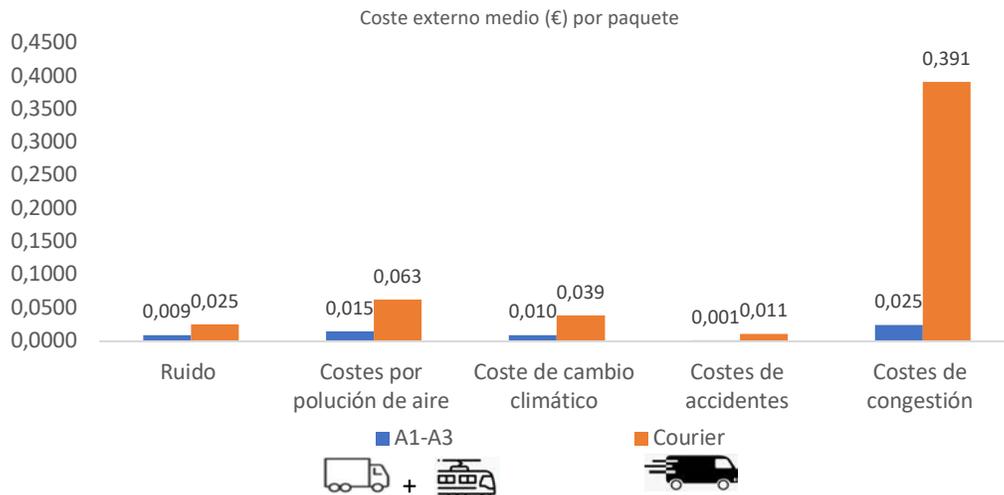


Figura 75. Costes externos (por tipo de externalidad) de las alternativas del modelo M4G

Fuente: elaboración propia

### 4. Análisis de sensibilidad

#### *Productividad de entrega*

En función de la zona de reparto y del estado del tráfico, el número de paquetes entregados al día puede variar dentro de los intervalos considerados previamente. La figura 76 muestra la variación del coste operativo por paquete que puede tener el operador logístico en función del número de paquetes entregados al día y se compara con el coste operativo medio que presentan las alternativas del modelo M4G. El resto de factores se consideran iguales.

A partir de los 76 paquetes entregados (considerando un 25 % de FTTH, es decir, 95 paquetes en ruta en cada ruta), los costes operativos de entrega por el operador logístico son

inferiores a las entregas en taquillas inteligentes. En el caso de la entrega en centros de recogida, con una productividad de entrega de 62 paquetes se igualan los costes operativos. Por el contrario, con una productividad de entrega inferior a 56 paquetes, todas las opciones del modelo M4G son, desde el punto de vista operativo, más eficientes en términos económicos.

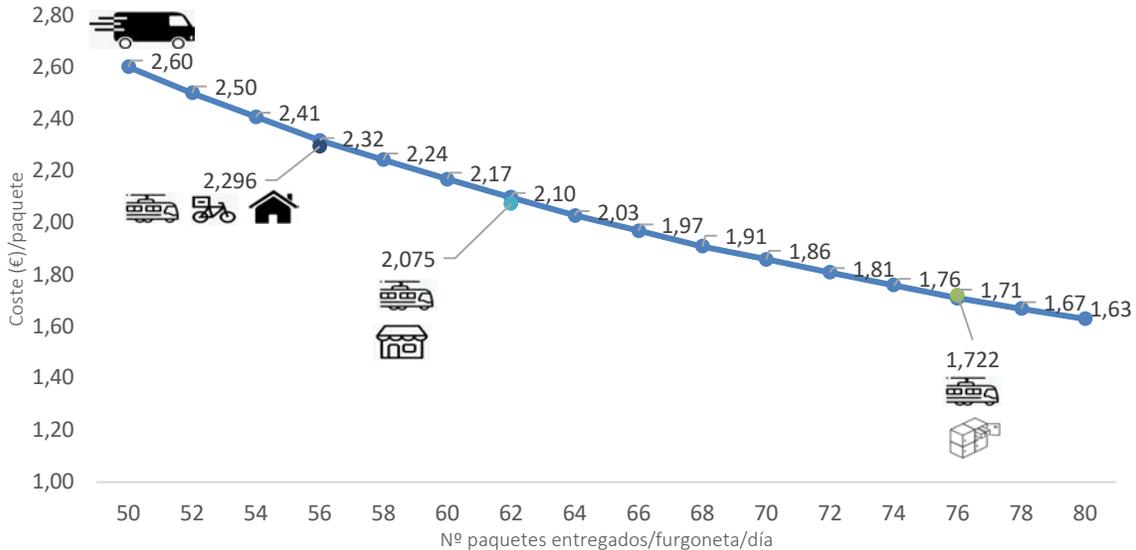


Figura 76. Costes operativos (€/paquete) del escenario de referencia en función de la productividad de entrega  
Fuente: elaboración propia

Si consideramos los costes totales por paquete (figura 77), las entregas en taquillas y en los centros de recogida generan menores costes por paquete, en cualquiera de los casos analizados. Para la entrega a domicilio, si el resto de variables permanecen iguales, a partir de 72 paquetes entregados por furgoneta/día generan menos costes totales las entregas mediante un operador logístico. La entrega de más paquetes al día, recorriendo el mismo número de kilómetros, se puede dar en las zonas de muy alta densidad, donde, por cada parada, la furgoneta del operador logístico es capaz de entregar un mayor número de paquetes. El problema que presentan estas zonas ultradensas es la propia accesibilidad de los vehículos, problema que no presenta el modelo M4G.

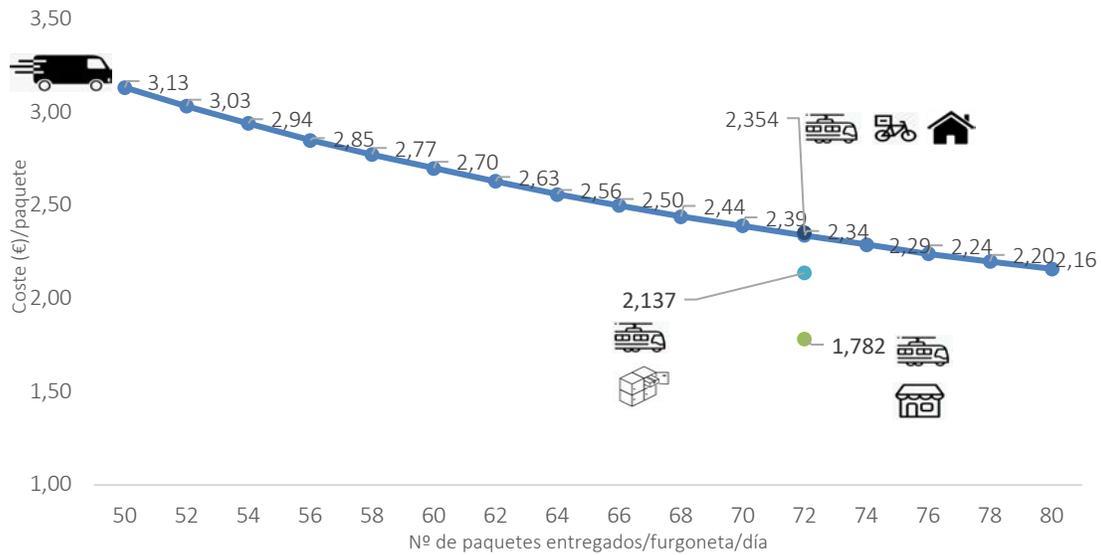


Figura 77. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función de la productividad de entrega  
Fuente: elaboración propia

**Costes de mano de obra y tarifa por paquete**

Otra de las principales variables que puede influir de forma directa en los costes económicos de entrega son las variaciones en los costes de personal o en la tarifa que pueda ingresar Metro por cada paquete entregado. Con relación a las variaciones en el precio/hora (€) de los trabajadores del operador logístico (ver figura 78), a medida que se incrementan del dato de partida (11,94 €/hora), la opción de entrega mediante furgonetas se hace menos eficiente en términos económicos.

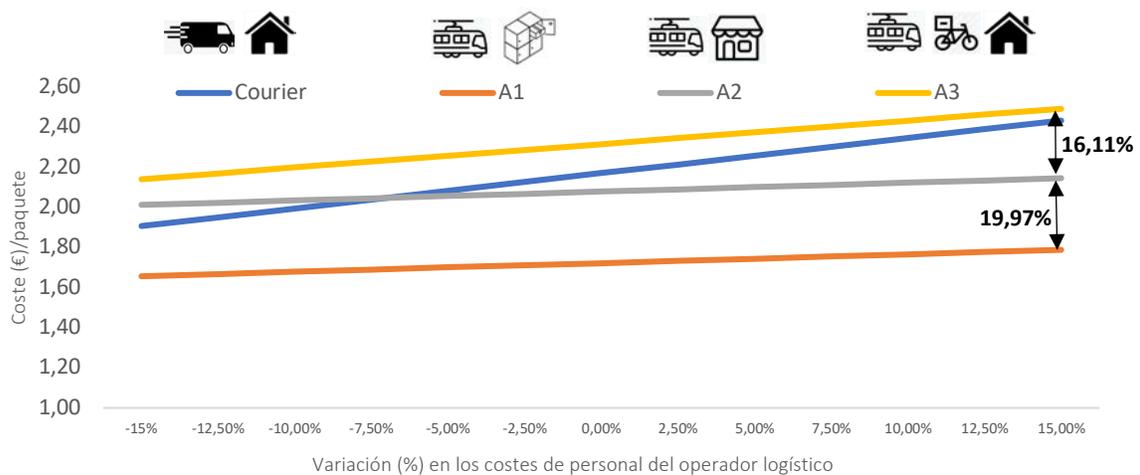


Figura 78. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función del coste/hora de los trabajadores del operador logístico  
Fuente: elaboración propia

La figura 78 muestra cómo el modelo de reparto a través de taquillas inteligentes siempre presenta menores costes operativos, independientemente de variaciones del (+/-) 15 % en el coste de la mano de obra. Con relación a la entrega en centros de recogida, a partir de una disminución del 7,5 % del coste de mano de obra del operador logístico, los costes medios del modelo M4G son mayores que el coste del modelo de referencia de furgonetas. En el caso de la entrega a domicilio, cuando se produce un incremento salarial del 25 %, se obtiene el mismo coste operacional si se realiza con furgonetas o a través del modelo M4G.

Dentro del modelo M4G, la parte de ingresos que recibe Metro de Madrid procede de una tarifa fija (*Capex fee*), para financiar todas las inversiones necesarias para la puesta en marcha del modelo, y una tarifa variable (*Opex fee*), en función de los paquetes transportados a través de trenes. En el caso de la tarifa variable, esta puede variar en función del escenario y las necesidades de los grupos de interés. El escenario de referencia considera una tarifa de 0,40 €/paquete entregado. El análisis de sensibilidad nos permite establecer en qué escenarios puede ser conveniente reducir o aumentar esta tarifa. Concretamente, para una tarifa inferior a 0,25 € por paquete entregado, todas las opciones del modelo M4G son más eficientes desde el punto de vista operacional y, por consiguiente, desde la perspectiva social y medioambiental (ver figura 79). Este aspecto es muy importante porque indica en qué rango se puede mover la tarifa por paquete que ingresa Metro de Madrid para que sea rentable económicamente en cualquier escenario.

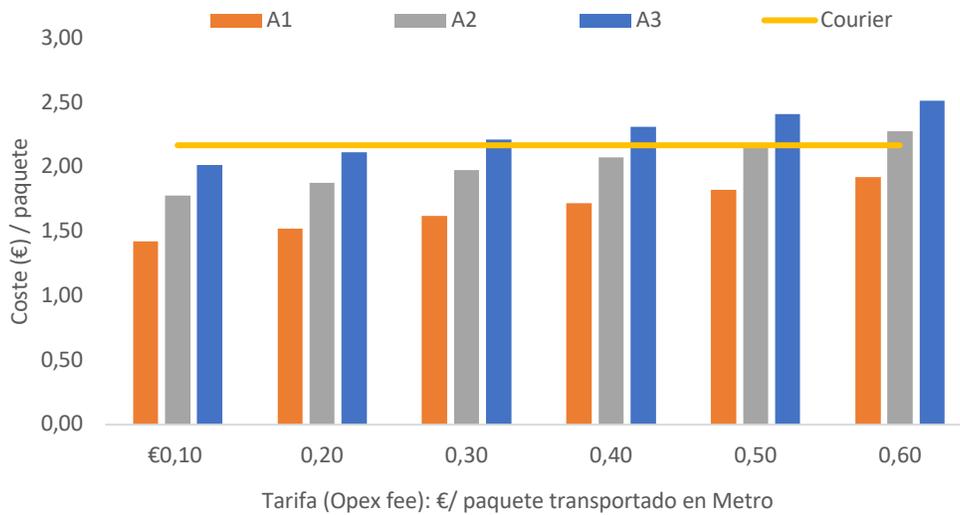


Figura 79. Costes totales (€/paquete) del escenario de referencia en función de la tarifa que ingresa Metro por paquete transportado

Fuente: elaboración propia

### *Kilómetros realizados en la entrega de paquetes*

Para el caso del modelo actual de reparto considerado, las externalidades dependen directamente del número de kilómetros realizados por las furgonetas en cada jornada. Por lo tanto, los costes medioambientales y sociales varían en igual proporción a la variación del número de kilómetros. A igualdad de paquetes entregados, si en lugar de realizar 90 km en la jornada de reparto realiza 108 km (+20%) las externalidades se incrementan, de igual forma, en un 20 %. De forma análoga, si el número de paquetes entregado aumenta o disminuye (manteniendo el número de kilómetros por trayecto), las externalidades aumentan o disminuyen en el mismo porcentaje.

Para el caso de las alternativas planteadas dentro del modelo M4G, la variación de los costes externos depende de los camiones-kilómetros realizados por el operador desde el centro logístico hasta el depósito de Metro y, en el caso de los trenes específicos, de los coches-kilómetros realizados por Metro.

Para el caso de trenes compartidos, a igual número de paquetes entregados, un incremento en la distancia entre el centro logístico y el depósito de Metro de un 20 % supondrá un incremento de las externalidades de un 20 %.

Para el caso de trenes específicos, si se incrementa un 20 % la distancia entre el centro logístico y el depósito de Metro, este porcentaje varía en menor cuantía a ese 20 % (concretamente un 11,6 % para la entrega en centro de recogida y un 15,15 % en taquillas). La razón se debe a que también es necesario considerar las externalidades que se producen por los trenes y que, para este caso, no aumentan.

### *Demanda de paquetes de viajeros y residentes*

La demanda diaria de paquetes de *e-commerce* puede variar en función de dos parámetros:

- A. Potencial número de posibles compradores, es decir, para el caso de estudio: (i) el número de viajeros de Metro, y (o) (ii) el número de residentes en los barrios donde hay una estación de Metro para recoger el pedido *online*.
- B. Hábitos de compra o características de las transacciones de los potenciales compradores, es decir: (i) % de personas que usan Internet y compran *online*, (ii) frecuencia de compra *online*, (iii) % de compra *online* de bienes físicos que se pueden entregar en paquetes de *e-commerce*, y (iv) % de preferencia por un método de entrega determinado.

**A. Potencial número de compradores online:** para los casos de entrega del pedido dentro de la estación, considerando valores medios, el porcentaje total de paquetes solicitados por viajeros es del 39,6 % y por residentes del 60,4 %. *A priori*, estos porcentajes se pueden considerar valores estables con pequeños crecimientos o decrecimientos a lo largo de los años, pero la aparición de la covid-19, si bien no ha tenido incidencia significativa en el número de residentes de los barrios de Madrid, sí que ha supuesto una modificación sustancial en el número de viajeros que utilizan

el transporte público metropolitano. En el siguiente gráfico se muestra la evolución de los residentes en la ciudad de Madrid y la evolución de los viajes en Metro en el periodo 2000-2020.

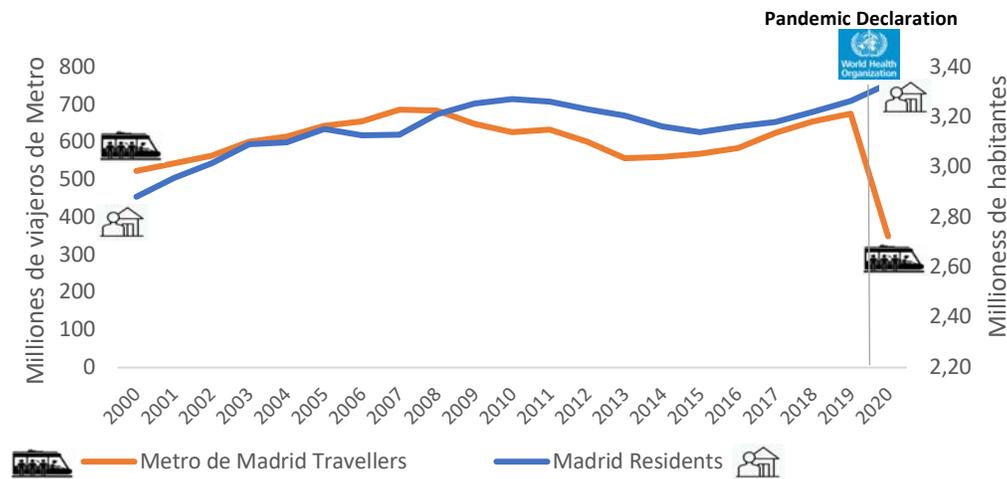


Figura 80. Evolución de la demanda de viajeros de Metro y del número de residentes en la ciudad de Madrid  
Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid ([http://www.madrid.org/iestadis/fijas/otros/estructu\\_cen.htm](http://www.madrid.org/iestadis/fijas/otros/estructu_cen.htm))

Las dos curvas presentan evoluciones similares hasta el año 2020. En ese año, mientras los residentes de la ciudad de Madrid siguen creciendo, la demanda de Metro de Madrid cae drásticamente. En 2019, Metro de Madrid realizaba una media de 2,3 millones de viajes al día, de lunes a viernes. Durante la pandemia, excluyendo los periodos de máxima restricción (marzo-junio de 2020), la demanda de viajeros se mantuvo estable en el 50 % del periodo precovid-19. Desde la Comunidad de Madrid (<https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/12/201221-NP-TRANSPORTES-Balance-y-campa%C3%B1a-transporte-p%C3%ABablico.pdf>), se prevé que se pueda recuperar las cifras previas a la crisis en 2023. Parece factible una recuperación progresiva de la demanda de viajeros, lo que parece más complicado es alcanzar los niveles de demanda de viajeros precovid-19, debido a los cambios sociales y de movilidad que ha experimentado la sociedad.

En el caso de una variación de la demanda de viajeros de Metro (manteniendo la misma estructura de la matriz origen-destino y el resto de variables constantes), la variación de la demanda diaria de paquetes de *e-commerce* influye solo en los pedidos que realizan los viajeros de Metro. Se analizan, a continuación, las dos alternativas de entrega ante cambios en el número de viajeros:

Entrega en taquillas inteligentes

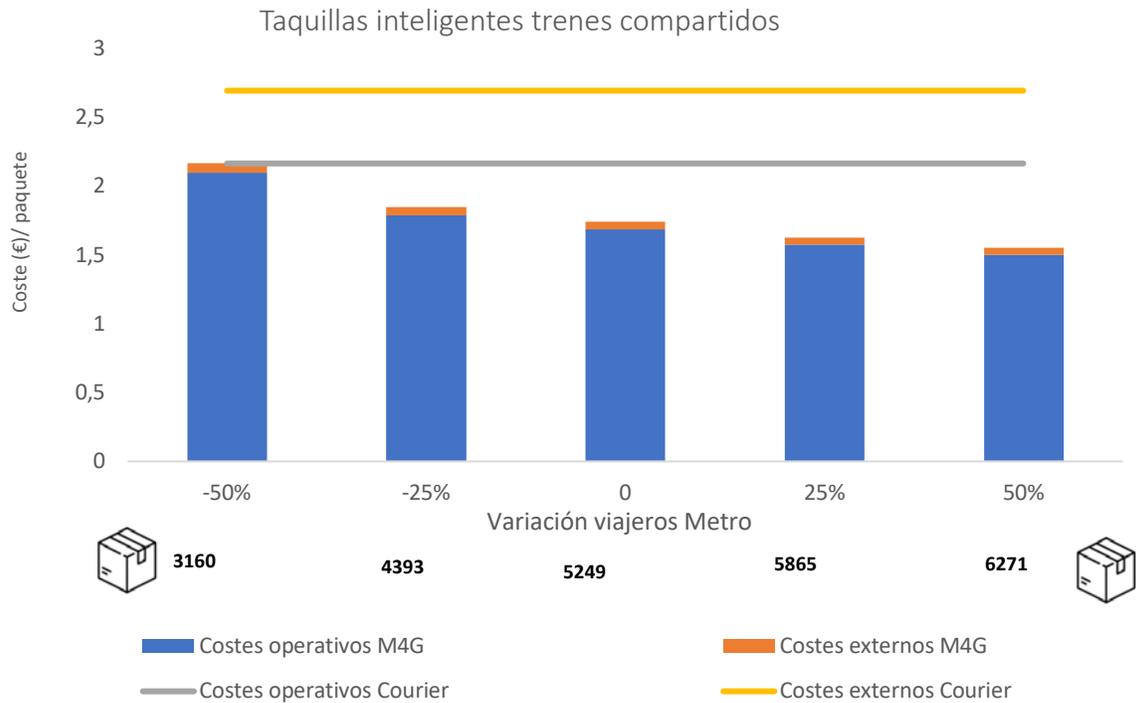


Figura 81. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para taquillas inteligentes y trenes específicos

Fuente: elaboración propia

En el caso de trenes compartidos y comparándolo con el escenario de referencia (figura 81), tanto los costes operativos como los costes totales son inferiores en el modelo M4G ante variaciones de la demanda de viajeros de un +/- 50 %. Los costes operativos de ambas opciones se igualan cuando la demanda es de 3019 paquetes/día. Esto es consecuencia del importe mínimo de inversiones que es necesario acometer para poner en marcha el sistema y de no poder aprovechar las economías de escala que hacen que los costes por paquete caigan de forma progresiva con el incremento de la demanda.

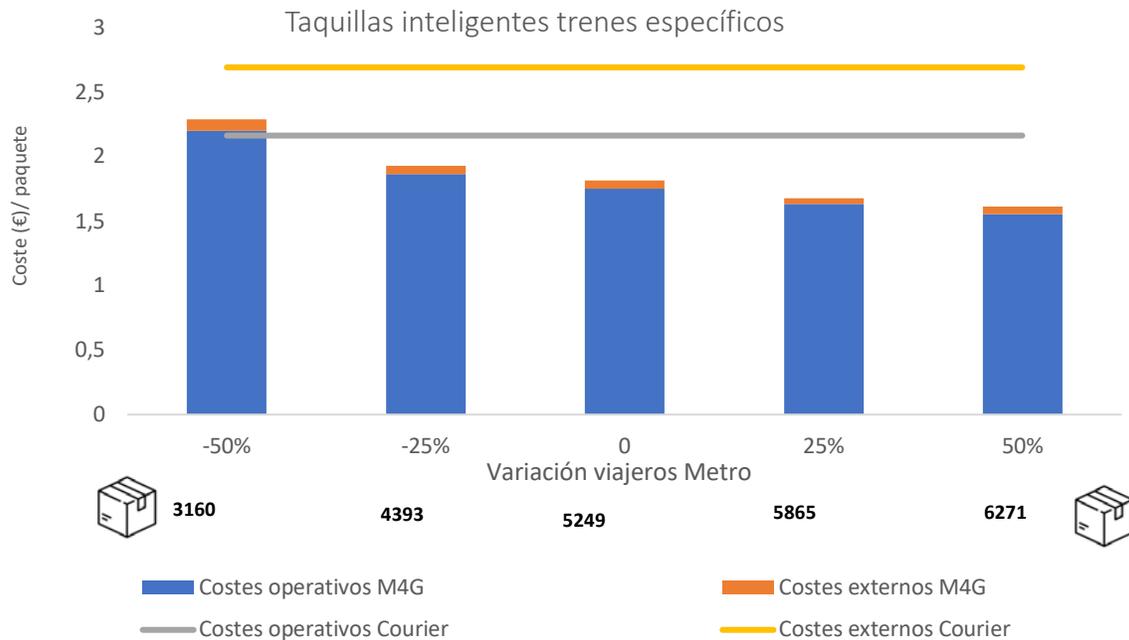


Figura 82. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para taquillas inteligentes y trenes compartidos

Fuente: elaboración propia

Para el caso de trenes específicos (figura 82), solo la reducción en la demanda de viajeros de Metro en un 50 % supone unos costes operativos mayores en el modelo M4G. Cuando la demanda cae a 3227 paquetes/día, los costes operativos de ambas alternativas son iguales. En cualquier caso, si se tienen en cuenta los costes externos, el modelo M4G incurre siempre en menores costes totales. Si, por el contrario, se produce un aumento del número de viajeros en un 25 % (5865 paquetes), los costes operativos y los costes externos son un 24,63 % y un 91,04 % menores respecto al escenario de reparto con furgonetas.

#### Entrega en centros de recogida

En términos económicos (costes operativos), hay un mínimo de paquetes que hacen rentable la solución a través del modelo M4G realizando la entrega en centros de recogida. Para la opción de trenes compartidos (figura 83) el número de paquetes es de 4910, mientras que para la opción de trenes específicos (figura 84) este mínimo es de 4811 paquetes. A partir de estas cantidades, los costes operativos del modelo M4G son menores que los costes operativos del reparto a través de furgonetas y van decreciendo según aumenta el número de paquetes transportados. En términos sociales y medioambientales (costes externos), la opción de reparto a través de M4G es mucho más eficiente que el reparto actual.

Este modelo es el que presenta unos costes iniciales de inversión más elevados, como consecuencia de la construcción y adecuación de los centros de recogida en las estaciones de Metro. Para hacer esta opción más rentable y que pueda dar mayor servicio al usuario, puede ser

una opción viable la alternativa para que sean centros con distintos propósitos: atención al cliente, venta de productos y recogida de paquetes de *e-commerce*.

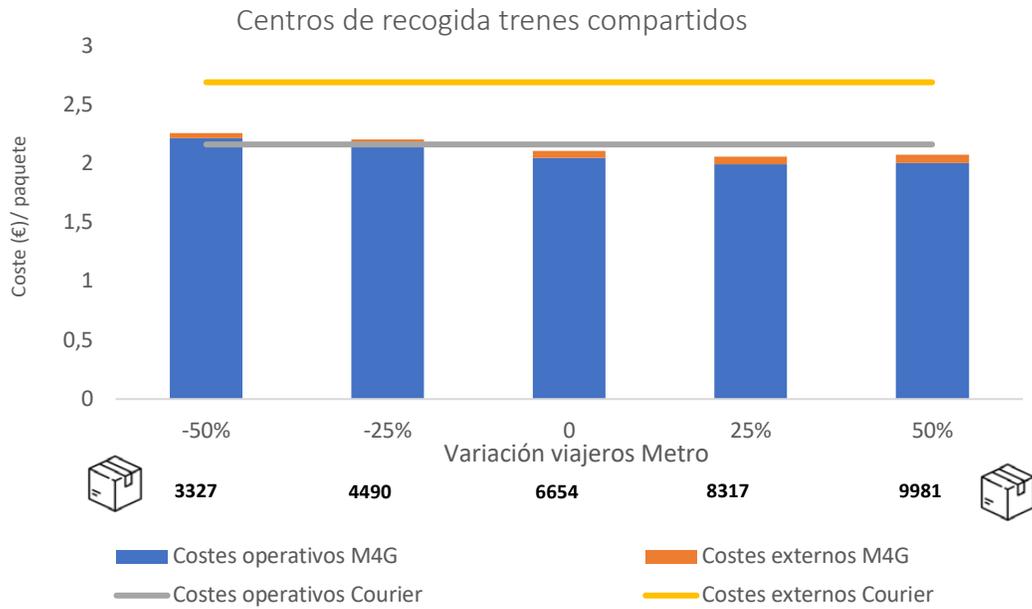


Figura 83. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos  
Fuente: elaboración propia

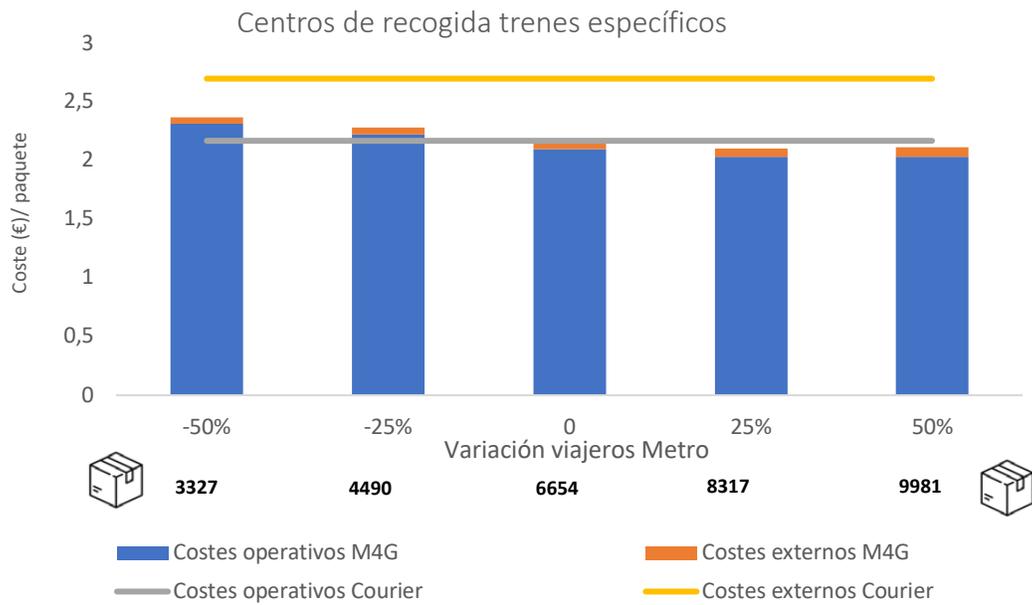


Figura 84. Costes operativos (€/paquete) ante variaciones en el número de paquetes para centros de recogida y trenes compartidos  
Fuente: elaboración propia

Una limitación operativa de esta alternativa se produce cuando el número de paquetes que se concentran en un centro es muy elevado. Por ejemplo, en el caso de un incremento de viajeros en un 50 %, el número de paquetes diarios que se entregarían en la estación de Sol es de 1010, lo que supondría disponer de unas infraestructuras suficientes para almacenar y entregar este volumen de paquetes diarios.

**B. Hábitos de compra y características de las transacciones de los potenciales usuarios:** por otro lado, la pandemia ha supuesto un acelerador para la compra de bienes a través del comercio electrónico y ha cambiado las reglas del sector *retail*. En solo doce meses se han producido tasas de crecimiento de compra *online* previstas para los próximos 4-5 años. Este hecho ha supuesto que nuevos cibercompradores se sumen a probar el canal digital y ha aumentado la frecuencia y el consumo de nuevos productos para aquellos que ya utilizaban la compra *online*.

La consecuencia se traduce en un incremento en el resto de las variables que determinan la demanda de paquetes de *e-commerce*, tanto de viajeros de Metro como de residentes. Así, podemos considerar que se verían incrementados el % de personas que usan Internet, el % de personas que usan Internet y compran *online*, la frecuencia de compra *online*, el % de compra *online* de bienes físicos que se pueden entregar en paquetes de *e-commerce* y el % de preferencia por un método de entrega determinado.

Al ser la presente investigación de tipo descriptivo-exploratoria, en el problema estudiado se han generado algunas hipótesis para obtener determinados resultados en unos escenarios concretos. En este contexto, el crecimiento de la demanda de paquetes procedentes del comercio electrónico viene condicionado por las características operativas específicas que se definan para el modelo M4G. Por ejemplo, la capacidad máxima de entrega de paquetes diaria a través de los trenes varía en función de las alternativas de entrega: para el caso de la entrega en taquillas inteligentes, la capacidad máxima definida por taquilla, considerada en este caso de estudio, es de 80 paquetes. En los casos de entrega en centros de recogida y de entrega a domicilio, para el presente estudio no se han fijado limitaciones de capacidad debido a que el número máximo de paquetes en una estación es de 1328 (estación de Casa de Campo que da cobertura al barrio de Aluche). Como referencia, un local 90-110 m<sup>2</sup> utilizado como centro de recogida o *microhub* puede almacenar 1250-1500 paquetes.

En el caso del modelo M4G presentado en esta investigación, si se produce un incremento de la demanda de pedidos *online*, por parte de viajeros o residentes, como consecuencia del incremento de alguna de las variables descritas anteriormente (o de la suma de algunas de ellas), el número de paquetes que es capaz de absorber el modelo para el caso de recogida en taquillas inteligentes se muestra en la figura 85.

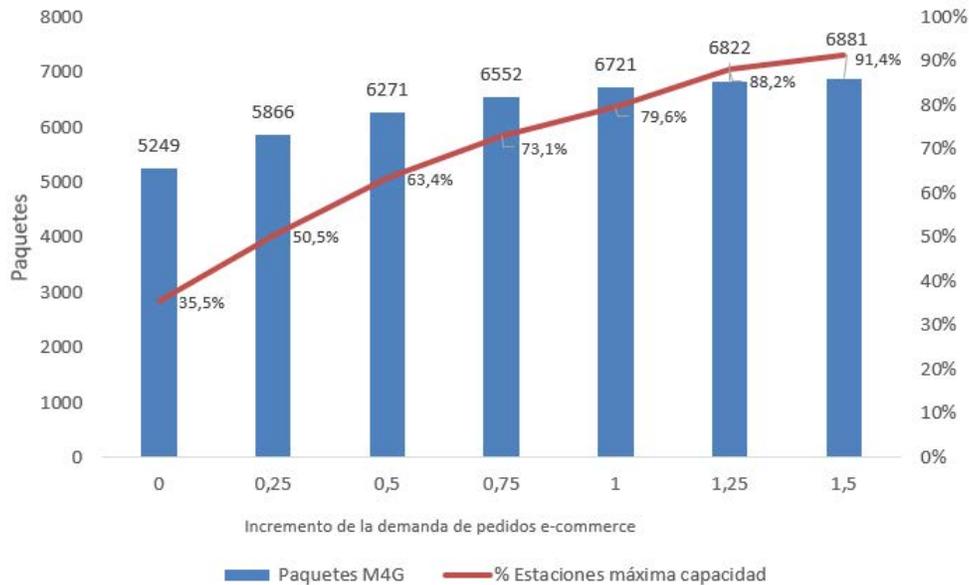


Figura 85. Número de paquetes de *e-commerce* y % de estaciones con máxima capacidad de paquetes en taquillas  
Fuente: elaboración propia

Como muestra la figura, ante aumentos en el porcentaje de pedidos *online*, el crecimiento de los paquetes dentro del modelo M4G resulta cada vez menor, como consecuencia de la capacidad máxima de la taquilla considerada por estación (80 paquetes/taquilla). Partiendo del valor de la demanda inicial considerada en el estudio (5249 paquetes), el porcentaje de estaciones que tienen una taquilla con el máximo de su capacidad es del 35,5 %. Con un aumento del 100 % en la demanda de pedidos *online*, el modelo M4G con taquillas es capaz de absorber 1472 paquetes más y hay un 79,6 % de las estaciones que tienen una taquilla con su máxima capacidad de entrega. Este crecimiento asintótico tiene una limitación máxima fijada en 7440 paquetes, cuando las 93 estaciones de las tres líneas seleccionadas presentan taquillas con 80 paquetes de forma diaria.

Para las alternativas de entrega en los centros de recogida y entregas a domicilio, no se han fijado limitaciones en el modelo M4G. La máxima capacidad de cada estación dependerá del almacenamiento de los locales que puedan actuar como centros de recogida o como *microhub*. Tampoco se han considerado limitaciones para la capacidad de carga de los trenes, ya que existen muchas posibilidades de utilizar horarios distintos para los trenes de carga.

Estos datos muestran la necesidad de que el modelo M4G debe ser una solución a medida para cada caso y para cada ciudad. Es crítico que el modelo sea capaz de adaptarse tanto a las particularidades de la demanda de paquetes de *e-commerce* (poder combinar, en la misma línea, estaciones con gran capacidad de entrega con otras que tengan menor cabida), como a los factores técnico-operativos del sistema de metro disponible.

## **PARTE IV. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---



# Capítulo 10. Conclusiones

---

## 10.1. Revisión de cumplimientos de objetivos

Como se expuso anteriormente en el capítulo 5, esta tesis doctoral presentaba 5 objetivos:

### **1. Determinar los retos a los que se enfrenta la logística urbana y la necesidad de incorporar nuevos modelos de reparto de mercancías**

La distribución urbana de mercancías tiene cada vez mayor presencia en las ciudades y existe una preocupación creciente en los diferentes grupos de interés que participan en la DUM. La actividad económica y social que se desarrolla en las grandes urbes aumenta cada día, presentando una influencia directa en el transporte de mercancías, que ya supone entre un 15 %-20 % del total del tráfico de una gran ciudad y hasta un cuarto de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Dablan, 2011; DGT, 2020). Estas dificultades se agravaban con el comercio electrónico, que ha irrumpido como nuevo hábito de compra entre la población y ha llevado a las grandes ciudades al borde del colapso logístico, si no son capaces de cambiar el actual modelo de reparto urbano.

Existen diferentes problemas y desafíos a los que se enfrenta la logística urbana (Taniguchi y Tamagawa, 2005; Allen *et al.*, 2007; Crainic *et al.*, 2012; Naciones Unidas, 2015; Muñuzuri *et al.*, 2016).

Problema	Desafío
Volúmenes de carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de los sistemas de transporte urbano de mercancías (congestión)</li> <li>• Velocidades de conducción más bajas y frecuentes interrupciones (fiabilidad)</li> <li>• Distribución descontrolada (consumo de espacio)</li> </ul>
Naturaleza de la distribución de mercancías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volúmenes pequeños y sensibles al tiempo</li> <li>• Cadena de frío</li> <li>• Comercio electrónico</li> </ul>
Aspectos medioambientales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir las externalidades ambientales (emisiones, ruido)</li> <li>• Creciente demanda de flujos logísticos inversos (residuos y reciclaje)</li> </ul>
Aspectos sociales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducir las externalidades sociales (congestión y salud)</li> <li>• Interferencia de pasajeros/carga (conflictos)</li> </ul>
Política y regulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso (vehículos permitidos, aparcamientos, ventanas de tiempo)</li> <li>• Zonificación (uso del suelo, agrupaciones de distribución de mercancías, plataformas de consolidación urbana)</li> </ul>

Para tratar de solventar estos problemas, se han lanzado numerosas iniciativas que intentan afrontar los desafíos derivados de la distribución urbana. Estas medidas suelen dar respuesta a una parte implicada en la logística urbana, sin tener en cuenta los efectos de manera general. Las iniciativas de intervención pública suelen buscar minimizar los costes sociales y medioambientales de la distribución urbana (Anderson *et al.*, 2005; Browne *et al.*, 2012; Ballantyne *et al.*, 2013; Dablanc, 2015; (<https://www.etp-logistics.eu/>, Patella *et al.*, 2020), pero tienden a penalizar la eficiencia de las operaciones logísticas en la ciudad. Por el contrario, las iniciativas de los actores que participan en la logística urbana suelen tratar de optimizar las operaciones de transporte y entrega (Leung *et al.*, 2000; Muñuzuri *et al.*, 2005; Boyer *et al.*, 2009; Behiri *et al.*, 2016), dejando en un segundo lugar los aspectos relacionados con el medioambiente y la calidad de vida en la ciudad.

Por lo tanto, sí existe la necesidad de incorporar nuevos modelos de distribución urbana alternativos que consideren la solución desde una perspectiva del triple balance y que se basen en una logística urbana más eficiente y sostenible, capaz de atender a las necesidades reales de las futuras ciudades.

## **2. Definir un nuevo modelo de reparto de última milla a través de un sistema de transporte público de viajeros como Metro.**

Los modelos actuales de distribución urbana son dependientes, en la mayoría de los casos, de las calles, carreteras y otras infraestructuras destinadas al tráfico rodado de que dispone la ciudad. En los últimos años, dentro del concepto de ciudad sostenible, existe una tendencia creciente que trata de valorar la utilización de sistemas de transporte público de viajeros para actividades

de transporte de mercancías (Cochrane *et al.*, 2017). Poder utilizar la capacidad excedente o la capacidad no utilizada de los sistemas de transporte público de viajeros en las actividades de carga es una opción que está captando la atención de las autoridades locales, ya que elimina al vehículo de las carreteras y lo sustituye por medios de transporte más sostenibles. En Europa, Zúrich (gestión de residuos), París (suministro de supermercados) o Dresde (suministro de piezas de repuesto a fábrica) son ejemplos de utilización de la red ferroviaria ligera existente (en superficie) para el transporte combinado de pasajeros y mercancías. Otros proyectos de naturaleza similar (Viena o Ámsterdam) no han tenido éxito a largo plazo, como consecuencia de la inversión inicial requerida, la falta de apoyo de las Administraciones públicas, la necesidad de colaboración de todas las partes interesadas y las dificultades operativas.

Dentro del marco de la investigación de esta tesis, no se conocen proyectos de implantación de sistemas logísticos urbanos a través de metro. Las razones se centran en la necesidad de apoyo financiero y organizativo por parte de las autoridades públicas, la necesidad de requerir un volumen mínimo para alcanzar la viabilidad económica y la dificultad que presentan estos sistemas para llegar al domicilio de los clientes.

Por lo tanto, para definir un sistema logístico urbano a través de la red de metro y que pueda ser considerado como una alternativa real para una ciudad como Madrid, es necesario que se den tres condiciones simultáneas: (i) viabilidad técnica para utilizar las infraestructuras de Metro en el reparto de mercancías, (ii) que exista un volumen mínimo a transportar y que el servicio al cliente ofrecido hagan rentable su utilización (Leung *et al.*, 2000), y (iii) que sea capaz de reducir las externalidades que actualmente se producen en esta actividad.

### **3. Definir los requisitos técnicos u operativos que son necesarios para utilizar un transporte público como el metro para la distribución urbana de comercio electrónico B2C**

En primer lugar, el sistema de transporte público debe disponer de unas infraestructuras adecuadas que permitan utilizar la red de metro como transporte de mercancías. Para ello se requiere de unos espacios de consolidación de la carga que permitan la manipulación y el almacenamiento temporal de grandes cantidades de paquetes de *e-commerce* antes de ser enviados a las distintas estaciones de la red de metro. Estos centros de consolidación deben estar situados preferentemente a las afueras del centro de la ciudad con el objeto de minimizar el tráfico y optimizar la ruta de camiones pesados que tienen como destinos estos centros. Metro de Madrid dispone, al menos, de un depósito de trenes al final o al inicio en cada una de sus líneas (situados fuera del centro de la ciudad) para realizar labores de mantenimiento y también como cochera de trenes. Estos depósitos pueden actuar como centros de consolidación y como punto inicial del reparto de paquetes a cada una de las estaciones.

Una vez que los paquetes están en los depósitos de mantenimiento de Metro, es importante determinar el tipo de tren que transportará los paquetes. En Metro de Madrid, dependiendo

del gálibo que presenta la línea (ancho o estrecho), los trenes disponen de mayor o menor capacidad de transporte en el interior de los coches, lo que condiciona su capacidad de carga.

El transporte de paquetes dentro de los trenes no puede realizarse a granel, es necesario utilizar sistemas de transporte rodante como contenedores móviles que permitan agrupar varios paquetes en un mismo contenedor y que se puedan cargar y descargar de forma rápida en los trenes. Un aspecto clave en la operativa de transporte se corresponde con la utilización de trenes compartidos con viajeros o trenes específicos para el transporte de paquetes. En cualquiera de los dos casos, la distribución se debe realizar cuando se produzca la menor afección posible al viajero. En el caso de los trenes compartidos con viajeros (por ejemplo, un tren que se compone de 5 coches para transportar viajeros + 1 coche para transportar paquetes), puede ser en el primer o en el último tramo horario, donde la demanda de viajeros es menor. En el caso de trenes específicos se pueden utilizar a conveniencia de Metro de Madrid, para ajustarlos en su tabla de trenes.

Con relación a las estaciones, existen dos aspectos importantes que definen la eficiencia en las operaciones logísticas. En primer lugar, la disponibilidad de ascensor para manejar las cargas de forma más rápida y cómoda. En segundo lugar, la forma de entrega del paquete al cliente de comercio electrónico. Si la entrega se realiza dentro de la estación (a través de taquillas inteligentes o centros de recogida), la capacidad tanto de las taquillas como de los centros de recogida condiciona el volumen máximo a recibir por cada una de las estaciones. Si la entrega se realiza fuera de la estación, en el domicilio del cliente de *e-commerce* dentro de zonas de alta densidad urbana, hay que considerar medios de transporte complementarios al metro para finalizar la entrega (a través de *cargo bikes* o andarines) y la necesidad de disponer de *microhubs* en las estaciones.

#### **4. Analizar el nivel de demanda de paquetes (masa crítica) que justifique la utilización del metro como operador logístico urbano**

El modelo de transporte de mercancías a través de metro, aunque puede utilizar la capacidad excedente de la red del transporte de viajeros y aprovechar las economías de alcance, requiere de inversiones iniciales para adaptarse a las necesidades logísticas de la distribución de paquetes de *e-commerce*. Estos gastos de capital, junto con los costes operativos, requieren un volumen de paquetes que hagan rentable esa inversión.

En la presente tesis se muestra el modelo M4G de una manera exploratoria. El nivel de demanda de paquetes está condicionado según los parámetros definidos y teniendo en cuenta las opciones planteadas en el modelo M4G. En este contexto, para el caso de entrega en taquillas, la demanda potencial diaria se sitúa en 5249 paquetes de *e-commerce* para viajeros y residentes de las tres líneas con mayor demanda acumulada. Para las entregas en centros de recogida, la suma de las 15 estaciones con mayor volumen de paquetes alcanza los 6654 paquetes. Por su parte, en el caso de las entregas a domicilio, las 9 estaciones seleccionadas que dan cobertura a los barrios con mayor población presentan una demanda potencial diaria de 9221 paquetes.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los viajeros de Metro y los residentes cercanos a las estaciones, sí existe un número suficiente de demanda de paquetes que pueda justificar utilizar la red de transporte de Metro de Madrid como operador logístico en el transporte de paquetes de *e-commerce*. Es importante señalar que, considerando cambios en algunos parámetros del modelo, la demanda puede variar. No se analiza en esta investigación cuántos operadores logísticos o *e-retailers* son necesarios para alcanzar esa masa crítica.

### **5. Cuantificar los beneficios económicos, medioambientales y sociales que se derivan de utilizar el transporte metropolitano para distribuir paquetes al centro de la ciudad**

En términos económicos, el modelo M4G presenta menores costes operativos que el escenario de referencia para el caso de entregas de paquetes dentro de la estación de Metro. De forma concreta, la opción de entregas en taquillas inteligentes disminuye los costes operativos en un 22,13 % (trenes compartidos) y 19,13 % (trenes específicos). Para el caso de entregas en la estación a través de los centros de recogida, los costes son menores en un 5,16 % (trenes compartidos) y en un 3,20 % (trenes específicos). Por el contrario, cuando la entrega de los paquetes se realiza en el domicilio del cliente, los costes operativos del modelo M4G son un 5,99 % (trenes compartidos) y un 7,50 % (trenes específicos) mayores que el escenario actual. Estos mayores costes son consecuencia de una segunda rotura de la carga, que se produce en el momento en que los paquetes llegan al *microhub* antes de llegar al cliente final. Hay que considerar que la entrega de última milla representa el 53 % del coste total de envío y el 41 % de los costes totales de la cadena de suministro (World Economic Forum, 2020).

Con relación a las externalidades producidas por el reparto de paquetes de *e-commerce*, las tres alternativas del modelo M4G generan unos costes externos muy inferiores al modelo de reparto con furgonetas. Los costes medioambientales y sociales son entre 8-9,8 veces superiores en el caso del escenario de referencia si se compara con el modelo M4G. No hay diferencia relevante entre compartir o no trenes, con lo que la decisión operativa puede centrarse en otros aspectos (económicos o minimizar la influencia con el viajero).

Los mayores costes externos son los costes de congestión, que en el caso del escenario de referencia son como consecuencia de las LCV que reparten paquetes por las calles de la ciudad, y en el caso del modelo M4G son resultado de los camiones pesados que trasladan paquetes desde los centros logísticos a los depósitos de Metro. En el contexto actual, parece evidente que la última milla no se volverá más ecológica y sostenible con más inversiones en infraestructura que favorezcan la distribución tradicional y aumenten las flotas de entrega (Accenture, 2021).

Si se tienen en cuenta los costes totales (ver figura 86), todas las alternativas del modelo M4G son más eficientes desde la perspectiva del triple balance. El coste de entregar un paquete de *e-commerce* es de 2,699 € en el escenario actual. Por otra parte, en el modelo M4G los costes de entregar paquetes de *e-commerce* varían desde los 1,745 a los 2,393 € por paquete.

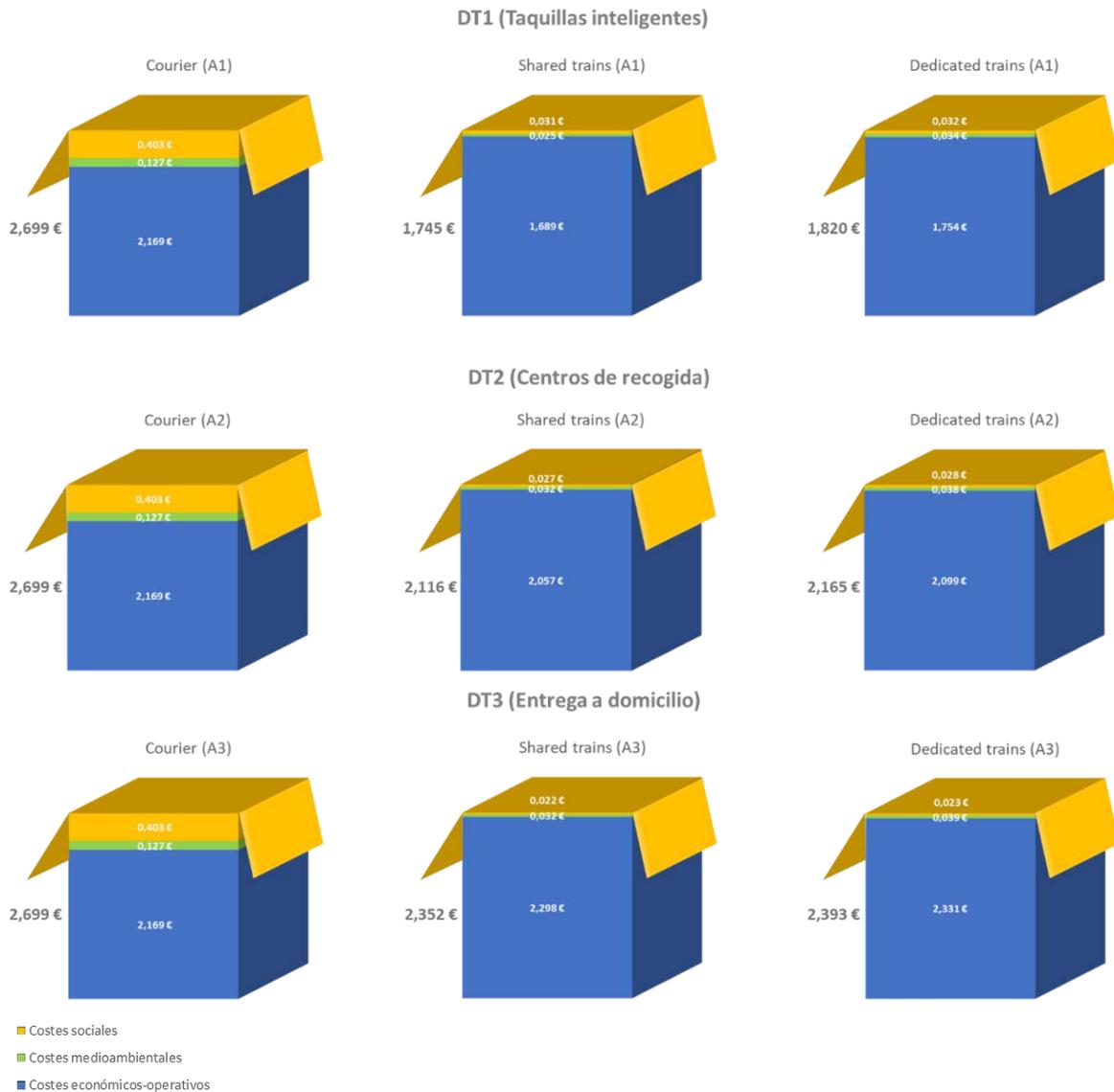


Figura 86. Costes sociales, medioambientales y económicos por paquete entregado de e-commerce y alternativa  
 Fuente: elaboración propia

De todas las alternativas estudiadas, la de menor coste total se corresponde con la entrega de paquetes de e-commerce en las taquillas de las estaciones. En esta opción, se aprovecha el propio desplazamiento del viajero de Metro o del residente cercano a una estación, que acomete la última parte de la distribución urbana recogiendo el paquete.

Al ser un modelo que presenta unas ventajas notables desde el punto de vista social y medioambiental, el análisis de sensibilidad puede permitir a los grupos de interés ver cómo es posible variar los parámetros consideradores en la modelización para que también pueda ser viable desde un punto de vista económico. Cambios en las condiciones del tráfico o de la zona urbana de reparto pueden derivar en aumentos o disminuciones en la productividad de entrega

de paquetes por mensajero. En las condiciones investigadas y si solo cambia la productividad de entrega, a partir de 76 paquetes entregados por LCV se igualan los costes operativos entre la entrega a través de taquillas y la entrega con furgonetas. Si se consideran todos los costes totales, las alternativas de entrega en la estación siempre son más eficientes. Por otro lado, el modelo M4G tiene margen económico para ser más rentable; este margen proviene de la tarifa por paquete que puede cobrar Metro al operador logístico. A partir de una tarifa inferior a 0,25 €/paquete entregado, todas las opciones del modelo M4G son más eficientes desde el punto de vista operacional y, por consiguiente, desde el punto de vista social y medioambiental.

Un aspecto clave en el estudio es el número de paquetes que hacen rentable la distribución a través de un sistema como el de Metro. Para el caso de entrega en taquillas inteligentes, este volumen de paquetes mínimo, para tres líneas en funcionamiento, se sitúa en 3019 paquetes/día (trenes compartidos) y 3227 paquetes/día (trenes específicos). En el caso de centros de recogida, suponiendo cinco centros de recogida en cada una de las tres líneas, el número de paquetes mínimo es de 4910 paquetes para trenes compartidos, y para la opción de trenes específicos es de 4811 paquetes. El modelo se puede implantar de forma autónoma en cada una de las líneas ya que las inversiones y los costes operativos son independientes. La elección de estas líneas puede venir condicionada por motivos operativos (estaciones con ascensor) o por motivos de demanda, considerando primero aquellas líneas que presenten estaciones con mayores pedidos de paquetes de *e-commerce*.



# Capítulo 11. Limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

---

## 11.1. Limitaciones

Inevitablemente, surgen varias limitaciones en el estudio realizado, que representan direcciones valiosas para futuras investigaciones.

Por un lado, existe una limitación con respecto al cálculo de la demanda teniendo en cuenta la realidad precovid-19. Tanto el crecimiento del comercio electrónico como la movilidad de las ciudades serán muy distintas en un escenario poscovid-19. El cálculo de la demanda de pedidos de *e-commerce* tiene en cuenta el número de residentes en Madrid, el número de viajeros de Metro y el comportamiento de ambos con relación al comercio electrónico. De estas variables, solo el número de residentes parece que se pueda mantener sin grandes cambios en los próximos años. La nueva realidad traerá, una vez superada la pandemia, tanto nuevos hábitos de consumo en el comercio electrónico como una nueva forma de movilidad dentro de las ciudades.

De igual forma, aparece una limitación a la hora de aplicar y comparar el modelo en condiciones homogéneas para todos los barrios de la ciudad. Existe una varianza importante en la productividad de entrega de paquetes según los distritos de la ciudad; en zonas de alta densidad de población es posible entregar más paquetes por cada parada realizada. Esto es una limitación del modelo, pero también una importante ayuda en la toma de decisiones, ya que puede indicar qué estaciones son las más propicias para entregar paquetes, teniendo en cuenta estas «zonas de alta densidad» tanto de residentes como de trabajadores.

Otra limitación de la investigación del modelo es no conocer la opinión del nuevo sistema de reparto de todos los actores que participan en la cadena de suministro de comercio *online*. Es importante conocer las limitaciones y las ventajas que les ofrece a ellos el modelo M4G, tanto a aquellos que lanzan el pedido *online* (clientes), como a los operadores logísticos, a los minoristas que venden los productos en su web y a las autoridades locales que gestionan la movilidad de la ciudad.

Además, es necesario profundizar en diversos aspectos operativos del modelo M4G que pueden representar barreras para una implementación efectiva: (i) capacidad operativa de los sistemas de transporte ferroviario urbano de pasajeros para actuar como operadores logísticos, (ii) viabilidad de colocar taquillas inteligentes, centros de recogida o *microhubs* en las estaciones de Metro, y (iii) impacto que puede tener en los viajeros compartir trenes con paquetes de comercio electrónico.

Por último, deben considerarse restricciones a la hora de aplicar el modelo M4G, según está definido en la presente investigación, en otras ciudades. La ciudad de Madrid presenta particularidades que hacen que el modelo M4G sea una solución a medida teniendo en cuenta las características de la ciudad, de su logística urbana, de sus habitantes y de los sistemas de transporte público de que disponen. Para su posible aplicación en otras ciudades, es imprescindible tener en cuenta estos aspectos para poder proponer modelos similares al M4G.

## **11.2. Recomendaciones y futuras líneas de investigación**

Las recomendaciones y futuras líneas de investigación vienen a cubrir las limitaciones que presenta la investigación y a complementar aspectos que no se han abordado en ella.

Desde el punto de vista metodológico: la presente tesis aborda el tema de estudio desde una perspectiva exploratoria. Sería deseable que se pudiera analizar la propuesta del modelo M4G desde una perspectiva de la optimización y la gestión de rutas a través de herramientas de simulación. El objetivo aquí se puede centrar en encontrar la ruta óptima para entregar paquetes de comercio electrónico a un conjunto finito de clientes teniendo en cuenta las posibles rutas de reparto de trenes, y considerando una selección óptima de la localización de las estaciones y depósitos. Es importante en esta optimización tener en cuenta las restricciones operativas que presenta el modelo. De igual forma, el cálculo de la demanda de paquetes de viajeros de Metro y de residentes se puede elaborar a partir de encuestas a clientes que definan tanto los productos comprados *online*, la frecuencia de compra y la preferencia para utilizar métodos de entrega distintos al domicilio.

Desde el punto de vista académico: sería recomendable que se analizara en mayor profundidad la opinión de los viajeros de Metro de Madrid sobre su disponibilidad de compartir las infraestructuras a cambio de tener entregas más sostenibles en la última milla. En esta misma línea, es importante conocer la opinión del resto de grupos de interés que participan en la logística de la ciudad.

Sería muy útil seguir investigando la viabilidad en el uso de la capacidad excedente de los medios de transporte público de viajeros para la distribución de mercancías. Existen otras opciones como los autobuses o los taxis (que realizan muchos de sus viajes en vacío) para poder realizar servicios complementarios al transporte de personas. Ahondando más en esta idea, una

recomendación a explorar puede centrarse en utilizar los medios ferroviarios de manera exclusiva, utilizando los recorridos de media distancia de la red de cercanías y poder combinarlos con la capilaridad que ofrece una red de metro.

Desde el punto de vista práctico: es necesario conocer en mayor profundidad los requisitos de los distintos grupos de interés a la hora de poner en marcha un sistema alternativo de reparto de paquetes a través de Metro. Estos grupos de interés pueden definir las características operativas que permitan definir el modelo de una manera más concreta y adaptada a sus necesidades. De igual forma, es recomendable que se tengan en cuenta criterios económicos, pero también sociales y medioambientales, a la hora de valorar la posible implantación del modelo M4G. Analizar otras vías de reparto, como el comercio B2B en las zonas restringidas para los coches, puede ser una opción a estudiar en futuras investigaciones.

La economía colaborativa, es decir, compartir los recursos, las infraestructuras y los medios de transporte para realizar la entrega en áreas urbanas, puede ser una de las soluciones a considerar en las ciudades del futuro. Modelos de colaboración horizontal entre empresas y modelos de colaboración pública-privada son necesarios, sobre todo, en las fases iniciales de proyectos como el M4G, donde se requieren tanto inversiones iniciales como un volumen mínimo de mercancía para ponerlos en marcha de forma rentable. Por tanto, es recomendable que se estudie más en profundidad este tipo de colaboración, tanto desde el punto de vista de la financiación como entre los agentes que intervienen en el reparto de mercancías y que pueden ayudar a aliviar los problemas asociados con la logística de última milla.

Por último, dentro de esta colaboración pública-privada, sería muy útil poder realizar una prueba piloto para testar las bondades teóricas del modelo y analizar, con datos reales, su posible implantación a un entorno real.



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---



- Accenture. (2016). *The New Delivery Reality. Achieving High Performance in the Post and Parcel Industry 2016*. [https://www.accenture.com/t20170320T061145Z\\_\\_w\\_\\_/us-en/\\_acnmedia/PDF-42/Accenture-The-New-delivery-Reality-HP-Post-and-Parcel-research-2016.pdf](https://www.accenture.com/t20170320T061145Z__w__/us-en/_acnmedia/PDF-42/Accenture-The-New-delivery-Reality-HP-Post-and-Parcel-research-2016.pdf)
- Accenture. (2021). *The sustainable last mile. Faster. Cheaper. Greener*. [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/PDF-148/Accenture-Sustainable-Mile-POV.pdf#zoom=40](https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-148/Accenture-Sustainable-Mile-POV.pdf#zoom=40)
- AENOR. (2015). *Normalización en ciudades inteligentes – España [CTN 178]*. <https://portal.aenormas.aenor.com/descargasweb/normas/aenor-Spanish-standardization-on-Smart-Cities-CTN-178.pdf>
- Alessandrini, A., Delle Site, P., Filippi, F. y Salucci, M. V. (2012). Using rail to make urban freight distribution more sustainable. *European Transport \ Trasporti Europei*, 50, pages 1-5.
- Alho, A., Abreu e Silva, J. de y Sousa, J. P. de. (2014). A state-of-the-art modeling framework to improve congestion by changing the configuration/enforcement of urban logistics loading/unloading bays. *Procedia*, 111, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.069>
- Aljohani, K. y Thompson, R. (2018). 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. <https://doi.org/10.3390/su11010124>
- Allen, J., Anderson, S., Browne, M. y Jones, P. (2000). *A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/ service flows: Summary report*. University of Westminster. <http://home.wmin.ac.uk/transport/download/urbandistsumm.pdf>
- Allen, J., Bektaş, T., Cherrett, T., Friday, A., McLeod, F., Piecyk, M., Piotrowska, M. y Austwick, M. Z. (2017). Enabling a freight traffic controller for collaborative multidrop urban logistics: Practical and theoretical challenges. *Transportation Research Record*, 2609(1), 77-84. <https://doi.org/10.3141/2609-09>
- Allen, J., Browne, M. y Thorne, G. (2007). *BESTUFS. Good practice guide on urban freight transport*. Best Urban Freight Solutions. [http://www.bestufs.net/download/BESTUFS\\_II/good\\_practice/English\\_BESTUFS\\_Guide.pdf](http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/good_practice/English_BESTUFS_Guide.pdf)
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A. y Leonardi, J. (2012). The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport. *Transport Reviews*, 32(4), 473-490. <https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074>
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., Cherrett, T., Ghali, K., Nguyen, T., Bektaş, T., Bates, O., Friday, A., Wise, S. y Austwick, M. (2018). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61(B), 325-338. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>
- Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe (Alice). (s. f.). *Home*. <https://www.etp-logistics.eu>

- Alonso, A., Monzón, A. y Wang, Y. (2017). Modelling land use and transport policies to measure their contribution to urban challenges: The case of Madrid. *Sustainability*, 9(3), artículo 378. <https://doi.org/10.3390/su9030378>
- Amazon Prime Air. (s. f.). *Amazon. Com: Prime air*. <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>
- Ambrosini, C. y Routhier, J. (2004). Objectives, methods and results of surveys carried out in the field of urban freight transport: An international comparison. *Transport Reviews*, 24(1), 57-77. <https://doi.org/10.1080/0144164032000122343>
- Ambrosino, D. y Grazia, M. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 610-624. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.04.009>
- Ander-Egg, E. (1985). *Las técnicas de comunicación al servicio del trabajo social*. Humanitas.
- Anderson, S., Allen, J. y Browne, M. (2005). Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives? *Journal of Transport Geography*, 13(1), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.002>
- Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. (2019). *Avance de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental. Madrid 360*. <https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMedios/noticias/2019/09%20septiembre/30Lunes/Notasprensa/Presen-taci%C3%B3n%20Madrid%20360/ficheros/Avance-Estrategia-Sostenibilidad-Ambien-tal-Madrid-360.pdf>
- Arnold, F., Cardenas, I., Sörensen, K. y Dewulf, W. (2018). Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. *European Transport Research Review*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0272-6>
- Arvidsson, N. (2013). The milk run revisited: A load factor paradox with economic and environmental implications for urban freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 51, 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.04.001>
- Arvidsson, N. y Browne, M. (2013). A review of the success and failure of tram systems to carry urban freight: The implications for a low emission intermodal solution using electric vehicles on trams. *European Transport*, 54, artículo 5. <https://www.openstarts.units.it/handle/10077/8871>
- Arvidsson, N. y Pazirandeh, A. (2017). An ex ante evaluation of mobile depots in cities: A sustainability perspective. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(8), 623-632. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1294717>
- Arvidsson, N., Givoni, M. y Woxenius, J. (2016). Exploring last mile synergies in passenger and freight transport. *Built Environment*, 42(4), 523-538. <https://doi.org/10.2148/benv.42.4.523>

- Asociación de Fabricantes y Distribuidores (AECOC). (2020). *Los impactos nocivos del transporte urbano en España suponen un coste económico del 2% sobre el PIB*.  
<https://www.aecoc.es/noticias/los-impactos-nocivos-del-transporte-urbano-en-espana-suponen-un-coste-economico-del-2-sobre-el-pib>
- Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (Anfac). (2019). *Informe anual 2018*. <https://anfac.com/publicaciones/informe-anual-2018>
- Audy, J.-F., Lehoux, N., D'Amours, S. y Rönnqvist, M. (2012). A framework for an efficient implementation of logistics collaborations. *International Transactions in Operational Research*, 19(5), 633-657. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2010.00799.x>
- Ayuntamiento de Madrid. (s. f.). *Home*. Recuperado 10 de abril de 2021, de <https://www.madrid.es/portal/site/munimadrid>
- Bakås, O., Bjerkan, K. Y., Nordtømme, M. E. y Sund, A. B. (2017). *Viable solutions for green urban freight: A business model for consolidation*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20036.12165>
- Ballantyne, E. E. F., Lindholm, M. y Whiteing, A. (2013). A comparative study of urban freight transport planning: Addressing stakeholder needs. *Journal of Transport Geography*, 32, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.08.013>
- Ballas, D. (2013). What makes a 'happy city'? *Cities*, 32, S39-S50.  
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.04.009>
- Behiri, W., Belmokhtar-Berraf, S. y Chu, C. (2018). Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 115, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.05.002>
- Behiri, W., Ozturk, O. y Belmokhtar-Berraf, S. (2016, junio). Urban freight by rail: A milp modeling for optimizing the transport of goods. *The 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Burdeos, Francia. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01740892>
- Behrends, S. (2011). *Urban freight transport sustainability. The interaction of urban freight and intermodal transport*. Chalmers University of Technology. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/150735.pdf>
- Bjerkan, K. Y., Sund, A. B. y Nordtømme, M. E. (2014). Stakeholder responses to measures green and efficient urban freight. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.05.001>
- Blauwens, G., De Baere, P. y van de Voorde, E. (2016). *Transport economics* (6.ª ed.). Berchem de Boeck.
- Blázquez, P. (2021, 3 de enero). De tienda a 'dark store'. *La Vanguardia*.  
<https://www.lavanguardia.com/economia/20210103/6162742/tienda-dark-store-distribucion-compra-online-alimentacion.html>

- Borbon-Galvez, Y. y Vanelslander, T. (2015). *Cross-Border Parcel Delivery Operations and its Cost Drivers* [Ref. Ares 2016/1317927]. Department of Transport and Regional Economics.
- Boyer, K. K., Prud'homme, A. M. y Chung, W. (2009). The last mile challenge: Evaluating the effects of customer density and delivery window patterns. *Journal of Business Logistics*, 30(1), 185-201. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2009.tb00104.x>
- Brau, L. (2018). La ciudad del coche. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 23(1235).
- Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D. y Visser, J. (2012). Reducing social and environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities. *Procedia*, 39, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.088>
- Buldeo Rai, H., Verlinde, S., Merckx, J. y Macharis, C. (2017). Crowd logistics: An opportunity for more sustainable urban freight transport? *European Transport Research Review*, 9(3), artículo 39. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0256-6>
- C40 Cities. (2019). *C40 2019 Annual Report - Message by Mark Watts*. [https://www.c40.org/blog\\_posts/c40-2019-annual-report-message-by-mark-watts](https://www.c40.org/blog_posts/c40-2019-annual-report-message-by-mark-watts)
- Capgemini Research Institute. (2019). *The last-mile delivery challenge*. <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/01/Report-Digital-%E2%80%93-Last-Mile-Delivery-Challenge1.pdf>
- Capgemini. (2016). *Making the last mile pay. Balancing customer expectations and commercial reality*. [https://www.capgemini.com/cn-zh/wp-content/uploads/sites/12/2017/08/making-the-last\\_mile-pay.pdf](https://www.capgemini.com/cn-zh/wp-content/uploads/sites/12/2017/08/making-the-last_mile-pay.pdf)
- Carbone, V., Rouquet, A. y Roussat, C. (2017). The rise of crowd logistics: A new way to co-create logistics value. *Journal of Business Logistics*, 38(4), 238-252. <https://doi.org/10.1111/jbl.12164>
- Cardenas, I., Borbon-Galvez, Y., Verlinden, T., Van de Voorde, E., Vanelslander, T. y Dewulf, W. (2017). City logistics, urban goods distribution and last mile delivery and collection. *Competition and Regulation in Network Industries*, 18(1-2), 22-43. <https://doi.org/10.1177/1783591717736505>
- Cardenas, I., Dewulf, W. y Vanelslander, T. (2016, 10-15 de julio). Developing a model for comparing home B2C deliveries vs pick-up points. En *Proceedings of the World Conference on Transport Research: WCTR 2016* (pp. 1-13), Shanghái. <https://cutt.ly/IbVGNVR>
- Castillo, V. E., Bell, J. E., Rose, W. J. y Rodrigues, A. M. (2018). Crowdsourcing last mile delivery: Strategic implications and future research directions. *Journal of Business Logistics*, 39(1), 7-25. <https://doi.org/10.1111/jbl.12173>
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D. y González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51-79. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>

- Chiu, C.-M., Wang, E. T. G., Fang, Y.-H. y Huang, H.-Y. (2014). Understanding customers' repeat purchase intentions in B2C e-commerce: The roles of utilitarian value, hedonic value and perceived risk: Understanding customers' repeat purchase intentions. *Information Systems Journal*, 24(1), 85-114. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2575.2012.00407.x>
- Civitas. (2015). *About*. Recuperado el 5 de mayo de 2021, de: <https://civitas.eu/es/about>
- Clarke, S. y Leonardi, J. (2017). *Final Report: Multicarrier consolidation—Central London trial*. Greater London Authority. <https://www.london.gov.uk/sites/default/files/gla-agile1-finalreport-02.05.17.pdf>
- Clement, J. (2021). *COVID-19 impact retail e-commerce site traffic 2019-2020*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1112595/covid-19-impact-retail-e-commerce-site-traffic-global>
- Cochrane, K., Saxe, S., Roorda, M. J. y Shalaby, A. (2017). Moving freight on public transit: Best practices, challenges, and opportunities. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(2), 120-132. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1197349>
- COFRET. (2014). *Carbon footprint of freight transport*. CORDIS. <https://cordis.europa.eu/project/id/265879/reporting/es>
- Colegio de Economistas de Madrid. (2020). Hacia una nueva movilidad en las ciudades [número completo]. *Economistas*, 169.
- Comi, A., Delle Site, P., Flippi, F. y Marcuci, E. (2008, 13-15 de diciembre). Differentiated regulation of urban freight traffic: Conceptual framework and examples from Italy. En *Proceedings of 13th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies* (pp. 13-15), Hong Kong.
- Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). (2020). *Data*. <http://data.cnmc.es/datagraph>
- Comunidad Autónoma de Madrid. Dirección General del Medio Ambiente. (2018). *Inventario de Emisiones a la Atmósfera en la Comunidad de Madrid*. [https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/cma\\_mam\\_documento\\_de\\_sintesis\\_geis\\_2016\\_web.pdf](https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/cma_mam_documento_de_sintesis_geis_2016_web.pdf)
- Confederación Española de Transporte de Mercancías (CETM). (2019). *El sector del transporte de mercancías por carretera, el gran olvidado de la Comunidad de Madrid*. <https://www.cetm.es/el-sector-del-transporte-de-mercancias-por-carretera-el-gran-olvidado-de-la-comunidad-de-madrid>
- Cossu, P., Luciettu, L., Chauhan, D. y Lotzov, V. (2014). *Final Report. C-LIEGE Project*. FINAL LAYOUT.indd (c-liege.eu)
- Crainic, T. G., Errico, F., Rei, W. y Ricciardi, N. (2012). Integrating c2e and c2c traffic into city logistics planning. *Procedia*, 39, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.090>

- Crujssen, F., Cools, M. y Dullaert, W. (2007). Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(2), 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.09.007>
- Dablanc, L. (2008). Urban goods movement and air quality policy and regulation issues in European cities. *Journal of Environmental Law*, 20(2), 245-266.
- Dablanc, L. (2011). City distribution, a key element of the urban economy: Guidelines for practitioners. En C. Macharis y S. Melo (eds.), *City Distribution and Urban Freight Transport* (pp. 13-36). Edward Elgar.
- Dablanc, L. (2015). *Parking for freight vehicles in dense urban centers—The issue of delivery areas in Paris* (Project Number: 14-3.2d) [informe]. MetroFreight Volvo Center of Excellence. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.963.5371&rep=rep1&type=pdf>
- Dampier, A. y Marinov, M. (2015). A study of the feasibility and potential implementation of metro-based freight transportation in Newcastle Upon Tyne. *Urban Rail Transit*, 1(3), 164-182. <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0024-7>
- Dans, E. (2019, 2 de abril). *Congestion charges are a welcome sign of the times*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/enriquedans/2019/04/02/congestion-charges-are-a-welcome-sign-of-the-times>
- Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S. y Tan, C. W. (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, artículo 109618. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618>
- Davis, B. A. y Figliozzi, M. A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.07.003>
- De Clercq, G. (2019). *Paris suburb pioneers «noise radar» to fine roaring motorcycles*. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-france-noise-motorcycles-idUSKCN1VK1AA>
- De Maere, B. (2018). *Economic and ecological impact of automated parcel lockers vs home delivery*. Vrije Universiteit Brussel.
- De Souza, R., Goh, M., Lau, H.-C., Ng, W.-S. y Tan, P.-S. (2014). Collaborative urban logistics – synchronizing the last mile a Singapore research perspective. *Procedia*, 125, 422-431. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1485>
- Delaître, L. y de Barbeyrac, C. Édric. (2012). Improving an urban distribution centre, the French case of Samada Monoprix. *Procedia*, 39, 753-769. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.145>
- Delivery Hero. (2020, 29 de abril). *Quick commerce: Pioneering the next generation of delivery*. <https://www.deliveryhero.com/blog/quick-commerce>

- Deloitte. (2018). *Retail ecommerce: Disrupción y transformación*.  
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ec/Documents/consumer-business/Retail-ecommerce.pdf>
- DGT. (2020). *Evolución de tráfico por el efecto de COVID-19*. Evolucion-Intensidades-07-06-2020.pdf (dgt.es) DHL Express inicia entregas con drones urbanos automatizados en China. (2019, 17 de mayo). *El Mercantil*. <https://elmercantil.com/2019/05/17/dhl-express-lanza-entregas-con-drones-urbanos-automatizados-en-china>
- DHL. (2016). *Logistics Trend Radar. 5th edition. Delivering insight today. Creating value tomorrow*.  
<https://www.dhl.com/gf-en/home/insights-and-innovation/insights/logistics-trend-radar.html>
- Dijkstra, L. y Poelman, H. (2014). *Regional Working Paper 2014. A harmonised definition of cities and rural areas: The new degree of urbanisation* (documento de trabajo 01/2014). European Commission.  
[https://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/work/2014\\_01\\_new\\_urban.pdf](https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/work/2014_01_new_urban.pdf)
- Diziain, D., Ripert, C. y Dablanc, L. (2012). How can we bring logistics back into cities? The case of Paris metropolitan area. *Procedia*, 39, 267-281.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.107>
- Diziain, D., Taniguchi, E. y Dablanc, L. (2014). Urban logistics by rail and waterways in France and Japan. *Procedia*, 125, 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1464>
- Doig, J. W. (2001). *Empire on the Hudson: Entrepreneurial vision and political power at the port of New York authority*. Columbia University Press.
- Dong, J., Hu, W., Yan, S., Ren, R. y Zhao, X. (2018). Network planning method for capacitated metro-based underground logistics system. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-14.  
<https://doi.org/10.1155/2018/6958086>
- Duarte, G., Rolim, C. y 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. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.03.006>
- Ducret, R. (2014). Parcel deliveries and urban logistics: Changes and challenges in the courier express and parcel sector in Europe — The French case. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.06.009>
- Duin, R. V. (2012). *Logistics Concept Development in Multi-Actor Environments. Aligning stakeholders for successful development of public/private logistics systems by increased awareness of multi-actor objectives and perceptions* (TRAIL Thesis Series T2012/6). the Netherlands TRAIL Research School.  
<https://doi.org/10.13140/2.1.1426.9122>
- E-commerce Europe. (2021). *Impact of the Coronavirus on e-commerce*. <https://ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2021/01/Coronavirus-Survey-Report-January-2021.pdf>

- E-commerce News. (2015). *Delivery startup Postmates launches in Europe in 2016*.  
<https://ecommercenews.eu/delivery-startup-postmates-launches-europe-2016>
- Ecoplan. (2014). *External Effects of Transport 2010. Monetising Environmental, Accident and Health-Related Effects*. <https://n9.cl/sncqr>
- Edwards, J., McKinnon, A., Cherrett, T., McLeod, F. y Song, L. (2010). Carbon dioxide benefits of using collection–delivery points for failed home deliveries in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, 2191(1), 136-143. <https://doi.org/10.3141/2191-17>
- Efe. (2018, 23 de agosto). Madrid sube en reputación por su crecimiento económico y estabilidad. *El Economista*.  
<https://www.economista.es/evasion/gente-estilo/noticias/9346373/08/18/Madrid-sube-en-reputacion-por-su-crecimiento-economico-y-su-estabilidad.html>
- Efulfillment Service. (2017). *The State of Ecommerce Order Fulfillment & Shipping*.  
<https://www.efulfillmentservice.com/wp-content/uploads/2017/09/State-of-Ecommerce-Order-Fulfillment-Shipping.pdf>
- Eriksen, K. S. (2000). Calculating external costs of transportation in Norway. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 0(1). <https://doi.org/10.18757/EJTIR.2000.0.1.3491>
- European Commission. (2012). *Study on Urban Freight Transport (Final Report 210041R4)*.  
<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf>
- European Commission. (2016a, 14 de abril). *Improve road haulage rules for industry, drivers and the environment, says Commission*. Mobility and Transport - European Commission.  
[https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/road-haulage-report\\_en](https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/road-haulage-report_en)
- European Commission. (2016b). *Urban mobility*. Mobility and Transport - European Commission. [https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban\\_mobility\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility_en)
- European Commission. (2017). *European Urban Mobility [Policy Context]*. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-sustainable-urban-mobility-policy-context.pdf>
- European Commission. (2019). *The European green deal (Document 52019DC0640)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>
- European Commission. (2020). *Handbook on the external costs of transport: Version 2019-1.1*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9781f65f-8448-11ea-bf12-01aa75ed71a1>
- European Commission. Directorate General for Mobility and Transport. (2019). *European urban mobility [Policy Context]*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.  
<https://data.europa.eu/doi/10.2832/827766>

- European Court of Auditors. (2017). *Acción de la UE en materia de energía y cambio climático: Análisis panorámico*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.  
<https://data.europa.eu/doi/10.2865/39081>
- European Environment Agency (EEA). (2020). *Greenhouse gas emissions from transport in Europe—European Environment Agency [Indicator Assessment]*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12>
- Eurostat. (2019a). *Digital economy and society statistics—Households and individuals—Statistics Explained*.  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Digital\\_economy\\_and\\_society\\_statistics\\_-\\_households\\_and\\_individuals](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Digital_economy_and_society_statistics_-_households_and_individuals)
- Eurostat. (2019b). *Glossary: E-commerce*.  
<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:E-commerce>
- Fan, W. y Jiang, X. (2013). Tradable mobility permits in roadway capacity allocation: Review and appraisal. *Transport Policy*, 30, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.09.002>
- Fan, Y., You, L. y Huang, R. (2016). Study on the planning scheme of underground container freight transportation system in Shanghai port. *7th International Symposium Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems*.
- Fatnassi, E., Chaouachi, J. y Klibi, W. (2015). Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 440-460. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.016>
- Feitelson, E. y Verhoef, E. T. (eds.). (2001). *Transport and environment: In search of sustainable solutions*. Edward Elgar.
- Fernández, Y. y Olmedillas, B. (2002). Transporte, externalidades y coste social. *Cuadernos de Economía*, 25, 45-67. [https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/5077/32581\\_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/5077/32581_3.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Flores, O. y Rayle, L. (2017). How cities use regulation for innovation: The case of Uber, Lyft and Sidecar in San Francisco. *Transportation Research Procedia*, 25, 3756-3768.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.232>
- Foltyński, M. (2014). Electric fleets in urban logistics. *Procedia*, 151, 48-59.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.007>
- Foncillas, P. (2019, 20 de marzo). Ikea y Decathlon conquistan tu ciudad. *La Vanguardia*.  
<https://www.lavanguardia.com/economia/20190320/461131934992/ikea-decathlon-le-roy-merlin-ciudad-pablo-foncillas-video-seo-lv.html>

- Foro de Empresas por Madrid y Centro de Innovación para la Logística y Transporte de Mercancía por Carretera (CITET). (2017). *Definición operativa de la distribución urbana de la ciudad de Madrid*.  
[https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspeInf/EnergiayCC/03Energia/3bMovilidad/3b08ViabilidadDUM/EstudioDUM\\_01\\_CITETyAyto-Mad.pdf](https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspeInf/EnergiayCC/03Energia/3bMovilidad/3b08ViabilidadDUM/EstudioDUM_01_CITETyAyto-Mad.pdf)
- Fortune. (2019). *Fedex plans to deliver your goods with this autonomous sameday bot*. <https://fortune.com/2019/02/27/fedex-autonomous-delivery-robot>
- Frazier, E. (2016, 1 de marzo). *At amazon, supply chain innovations deliver results*. Syracuse University. <https://onlinebusiness.syr.edu/blog/amazon-supply-chain-simplified>
- Freight in the City. (2017). *Air quality*. <http://freightinthecity.com/topics/air-quality>
- Galkin, A., Schlosser, T., Galkina, O., Hodáková, D. y Cápayová, S. (2019). Investigating using urban public transport for freight deliveries. *Transportation Research Procedia*, 39, 64-73.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.008>
- Garau, C. y Pavan, V. (2018). Evaluating urban quality: Indicators and assessment tools for smart sustainable cities. *Sustainability*, 10(3), artículo 575. <https://doi.org/10.3390/su10030575>
- García, K. (2018). *Shoppers increasingly impatient with delivery*. Insider Intelligence.  
<https://www.emarketer.com/content/shoppers-increasingly-impatient-with-delivery>
- Geroliminis, N. y Daganzo, C. F. (2005). *A review of green logistics schemes used in cities around the world* (Working Paper UCB-ITS-VWP-2005-5). Universidad de California. <https://escholarship.org/uc/item/4x89p485>
- Gevaers, R., Van de Voorde, E. y Vanelslander, T. (2009). *Technical and process innovations in logistics: Opportunities, barriers and best practices*. European Transport Conference 2008.
- Gevaers, Roel, Van de Voorde, E. y Vanelslander, T. (2014). Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative b2c supply chain environment with implications on urban areas and cities. *Procedia*, 125, 398-411. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1483>
- Ghilas, V., Demir, E. y Van Woensel, T. (2013). *Integrating passenger and freight transportation: Model formulation and insights* (Beta Publicatie Working Paper 441). Technische Universiteit Eindhoven. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/3893938/600823851742582.pdf>
- Giuffrida, M., Mangiaracina, R., Perego, A. y Tumino, A. (2016). *Home delivery vs parcel lockers: An economic and environmental assessment*. XXI Summer School «Francesco Turco» - Industrial Systems Engineering.
- González-Feliu, J. (2014). *Costs and benefits of railway urban logistics: A prospective social cost benefit analysis*. Expert Meeting in Urban Rail Freight.

- González-Feliu, J., Ambrosini, C. y Routhier, J.-L. (2012). New trends on urban goods movement: Modelling and simulation of e-commerce distribution. *European Transport*, 50(6). <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00626152/document>
- Gordijn, J., Akkermans, H. y Van Vliet, H. (2000). Business modelling is not process modelling. En S. W. Liddle, H. C. Mayr y B. Thalheim (eds.), *Conceptual Modeling for E-Business and the Web* (pp. 40-51). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-45394-6\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-45394-6_5)
- Graham, C. (2013). *Ecommerce delivery: What do customers want?* Econsultancy. <https://econsultancy.com/ecommerce-delivery-what-do-customers-want>
- Gutiérrez, C. (2020, 20 de octubre). La DGT se implica en digitalizar la distribución urbana para reducir accidentes y emisiones. *El Mercantil*. <https://elmercantil.com/2020/10/20/la-dgt-se-implica-en-digitalizar-la-distribucion-urbana-para-reducir-accidentes-y-emisiones>
- Halbur, T. (2008). *Cargo trams in Amsterdam*. Planetizen. <https://www.planetizen.com/node/35221>
- Halkias, M. (2021). Walmart is converting one North Dallas store into an online-only location. *NBC 5 Dallas-Fort Worth*. <https://www.nbcdfw.com/news/business/walmart-is-converting-one-north-dallas-store-into-an-online-only-location/2575617>
- Haupt, L. (1981). *Rapid transit in great cities (1891)*. Nycsubway. [https://www.nycsubway.org/wiki/Rapid\\_Transit\\_in\\_Great\\_Cities\\_\(1891\)](https://www.nycsubway.org/wiki/Rapid_Transit_in_Great_Cities_(1891))
- Havenga, J. H. (2015). Macro-logistics and externality cost trends in South Africa – underscoring the sustainability imperative. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 18(2), 118-139. <https://doi.org/10.1080/13675567.2015.1015509>
- Hayashi, K. y Nemoto, T. (2014). E-commerce and City Logistics Solution. En E. Taniguchi y R. G. Thompson (eds.), *City logistics: Mapping the future* (pp. 55-78). CRC Press.
- Hepp, S. B. (2018). *Innovation in Last Mile Delivery: Meeting evolving customer demands – The case of in-Car Delivery* [trabajo de fin de master, Universidade Católica Portuguesa]. Repositório Institucional da Universidade Católica Portuguesa. <http://hdl.handle.net/10400.14/25359>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Herson, M. (2015, 22 de junio). *Metamorphosis of UK parcels market*. Post & Parcel. <https://postandparcel.info/65831/news/metamorphosis-of-uk-parcels-market>
- Heskett, J. L., Jones, T. O., Loveman, G. W. Sasser, W. E. Jr. y Schlesinger, L. A. (2008). Putting the service-profit chain to work. *Harvard Business Review*, 72(2), 164-174.
- Holguín-Veras, J. (2010). The truth, the myths and the possible in freight road pricing in congested urban areas. *Procedia*, 2(3), 6366-6377. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.045>

- Holguín-Veras, J. y Jaller, M. (2014). Comprehensive Freight Demand Data Collection Framework for Large Urban Areas. En J. González-Feliu, F. Semet y J.-L. Routhier (eds.), *Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems* (pp. 91-112). Springer.
- Holguín-Veras, J., Encarnación, T., González-Calderón, C. A., Winebrake, J., Wang, C., Kyle, S., Herazo-Padilla, N., Kalahasthi, L., Adarme, W., Cantillo, V., Yoshizaki, H. y Garrido, R. (2018). Direct impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 84-103.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.013>
- Hollingsworth, J., Copeland, B. y Johnson, J. X. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environmental Research Letters*, 14(8), artículo 084031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8>
- Hörl, B., Dörr, H., Wanjek, M. y Romstorfer, A. (2016). Metro. Freight. 2020 – strategies for strengthening rail infrastructure for freight transport in urban regions. *Transportation Research Procedia*, 14, 2776-2784. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.478>
- Hübner, A. H., Kuhn, H. y Wollenburg, J. (2016). Last mile fulfilment and distribution in omnichannel grocery retailing: A strategic planning framework. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 44(3). <https://doi.org/10.1108/IJRDM-11-2014-0154>
- IAB Spain. (2019, 4 de julio). Estudio Anual de eCommerce 2019. <https://iabspain.es/estudio/estudio-anual-de-ecommerce-2019>
- Ibrahim, A., Obdulaziz, R., Ishaya, J. y Sowole, S. (2019). Vehicle routing problem with exact methods. *IOSR Journal of Mathematics*, 15(3), 5-15. <https://doi.org/10.9790/5728-1503030515>
- ICF Consulting y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2006). *Assessment of Greenhouse Gas Analysis Techniques for Transportation Projects*. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/25-25\(17\)\\_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/NotesDocs/25-25(17)_FR.pdf)
- IMRG. (2015). *Imrg UK Consumer Home Delivery Review 2015*.  
<https://www.imrg.org/res/files/D079A1FD568.pdf>
- IMRG. (2019/2020). *Imrg data report—Uk consumer home delivery review 2019/20*.  
<https://imrg.org/data-and-reports/imrg-reports/imrg-data-report-uk-consumer-home-delivery-review-2019-20>
- Institute for Mobility Research (Ifmo) (ed.). (2013). *Megacity mobility culture: How cities move on in a diverse world*. Springer.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2020). *Madrid: Población por municipios y sexo*.  
<https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2881&L=0>
- International Conference on City Logistics y Taniguchi, E. (eds.). (2004). *Logistics systems for sustainable cities: Proceedings of the 3. International Conference on City Logistics* (Madeira, Portugal, 25-27 de junio de 2003). Elsevier.

- International Conference on City Logistics, Taniguchi, E. y Thompson, R. G. (2012). *The Seven International conference on city logistics* (Mallorca, España, 7-9 de junio de 2011). Elsevier.
- International Post Corporation. (2020). *Cross-Border E-Commerce Shopper Survey 2019*.  
<https://www.ipc.be/services/markets-and-regulations/cross-border-shopper-survey>
- Ivend Retail. (2019). *Global Shopper Trends Report*. <https://ivend.com/survey-report-2019>
- Iwan, S., Kijewska, K. y Lemke, J. (2016). Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mile delivery solution – the results of the research in poland. *Transportation Research Procedia*, 12, 644-655. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018>
- Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(1), 33-44.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.10.004>
- Janjevic, M. y Ndiaye, A. B. (2014). Development and application of a transferability framework for micro-consolidation schemes in urban freight transport. *Procedia*, 125, 284-296.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1474>
- Jiang, X., Tang, T., Sun, L., Lin, T., Duan, X. y Guo, X. (2020). Research on consumers' preferences for the self-service mode of express cabinets in stations based on the subway distribution to promote sustainability. *Sustainability*, 12(17), artículo 7212.  
<https://doi.org/10.3390/su12177212>
- Jing, P., Xu, G., Chen, Y., Shi, Y. y Zhan, F. (2020). The determinants behind the acceptance of autonomous vehicles: A systematic review. *Sustainability*, 12(5), artículo 1719.  
<https://doi.org/10.3390/su12051719>
- Joerss, M., Schröder, J., Neuhaus, F., Klink, C. y Mann, F. (2016). *Parcel Delivery. The Future of last mile*. McKinsey. <https://cutt.ly/YbQQR5j>
- Jones Lang LaSalle. (2013). *E-commerce boom triggers transformation in retail*. <https://es.slideshare.net/JLL/e-commerce-boomtriggerstransformationinretaillogisticswhitepapernov2013>
- Kern, K. (2019). Cities as leaders in EU multilevel climate governance: Embedded upscaling of local experiments in Europe. *Environmental Politics*, 28(1), 125-145.  
<https://doi.org/10.1080/09644016.2019.1521979>
- Kikuta, J., Ito, T., Tomiyama, I., Yamamoto, S. y Yamada, T. (2012). New subway-integrated city logistics system. *Procedia*, 39, 476-489. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.123>
- Kim, E. y Farr, C. (2017). Amazon is exploring ways to deliver items to your car trunk and the inside of your home. *CNBC*. <https://www.cnn.com/2017/10/10/amazon-is-in-talks-with-phrme-and-is-working-on-a-smart-doorbell.html>

- Kin, B., Verlinde, S. y Macharis, C. (2017). Sustainable urban freight transport in megacities in emerging markets. *Sustainable Cities and Society*, 32, 31-41.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.011>
- Kin, B., Verlinde, S. y Macharis, C. (2018, 5-7 de septiembre). *Towards a sustainable urban freight transport system—Axes for intervention* [ponencia]. Logistics Research Network (LRN) Annual Conference, Plymouth, Reino Unido.
- Knight Frank. (2019). *Informe de Inversión Inmobiliaria Logística en España*.  
<https://content.knightfrank.com/research/1642/documents/es/snapshot-logistica-t3-2018-t3-2018-5921.pdf>
- Koch, J., Frommeyer, B. y Schewe, G. (2020). Online shopping motives during the covid-19 pandemic—Lessons from the crisis. *Sustainability*, 12(24), artículo 10247.  
<https://doi.org/10.3390/su122410247>
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., Varma, A. y Cox, V. (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport* (Ricardo-AEA/R/ED57769) [informe para la Comisión Europea].  
[https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook\\_on\\_external\\_costs\\_of\\_transport\\_2014\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/handbook_on_external_costs_of_transport_2014_0.pdf)
- Kotler, P. y Keller, K. (2012). *Dirección de marketing* (14.ª ed.). Pearson.
- Le Maître, H. (2015, 11-15 de enero). Noise costs of road traffic. En *Transportation Research Board 94th Annual Meeting Transportation Research Board* (Washington, Estados Unidos).  
<https://trid.trb.org/view/1336835>
- Lebeau, P. y Macharis, C. (2014). Freight transport in Brussels and its impact on road traffic? *Brussels Studies*, 80. <https://doi.org/10.4000/brussels.1239>
- Lee, H. L., Chen, Y., Gillai, B. y Rammohan, S. (2016). *Technological disruption and innovation in last-mile delivery*. Stanford Graduate School of Business. <https://www.gsb.stanford.edu/faculty-research/publications/technological-disruption-innovation-last-mile-delivery>
- Lee, J., Kim, C. y Wiginton, L. (2019). *Delivering Last-Mile Solutions A feasibility analysis of microhubs and cyclelogistics in the GTHA*. The Pembina Institute.  
<https://www.pembina.org/reports/delivering-last-mile-solutions-june-2019.pdf>
- Leech, E. (2008). *A Lesson from Amsterdam: Reducing Our Transportation Carbon Print*.  
<http://www.treehugger.com/cars/a-lesson-from-amsterdam-reducing-our-transportation-carbon-footprint.html>
- Lemke, J., Iwan, S. y Korczak, J. (2016). Usability of the parcel lockers from the customer perspective – the research in polish cities. *Transportation Research Procedia*, 16, 272-287.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.027>

- Letnik, T., Marksel, M., Luppino, G., Bardi, A. y Božičnik, S. (2018). Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. *Energy*, 163, 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.096>
- Leung, L. C., Waiman Cheung, y Yer Van Hai. (2000). A framework for a logistics e-commerce community network: The Hong Kong air cargo industry. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(4), 446-455. <https://doi.org/10.1109/3468.852438>
- Levin, H. M. y McEwan, P. J. (2001). *Cost-effectiveness analysis: Methods and applications* (2.<sup>a</sup> ed). Sage.
- Lim, S. F. W. T., Jin, X. y Srari, J. S. (2018). Consumer-driven e-commerce: A literature review, design framework, and research agenda on last-mile logistics models. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(3), 308-332. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2017-0081>
- Lindholm, M. y Behrends, S. (2012). Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region. *Journal of Transport Geography*, 22, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.001>
- Lioba, P. (2013). *Comentario del plano urbano de Madrid*. Geographia +. <https://sitasilvi.wordpress.com/2013/04/25/comentario-del-plano-urbano-de-madrid>
- Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes, N., Osorio, S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., ... Kan, H. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705-715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
- Liu, H. (2000). *Pneumatic Capsule Pipeline—Basic Concept, Practical Considerations, and Current Research* [ponencia]. Mid-Continent Transportation Symposium 2000. <https://trid.trb.org/view/655625>
- Lowe, R. y Rigby, M. (2014). *The Last Mile. Exploring the online purchasing and delivery journey*. Barclays.
- Lukic, V., Souza, R. y Wolfgang, M. (2013). *Same-Day Delivery. Not ready for Prime Time*. The Boston Consulting Group.
- Machado de Oliveira, C., De Mello Bandeira, R. A., Vasconcelos Goes, G., Schmitz Gonçalves, D. N. y De Almeida D'Agosto, M. (2017). Sustainable vehicles-based alternatives in last mile distribution of urban freight transport: A systematic literature review. *Sustainability*, 9(8), artículo 1324. <https://doi.org/10.3390/su9081324>
- Macharis, C. y Kin, B. (2017). The 4 A's of sustainable city distribution: Innovative solutions and challenges ahead. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(2), 59-71. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1196404>

- Macharis, C. y Nocera, S. (2019). The future of freight transport. *European Transport Research Review*, 11(1), artículo 21. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0359-3>
- Macharis, C., Turcksin, L. y Lebeau, K. (2012). Multi actor multi criteria analysis (Mamca) as a tool to support sustainable decisions: State of use. *Decision Support Systems*, 54(1), 610-620. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.08.008>
- Madrid Central: Así actúan otras ciudades contra la contaminación. (2019, 29 de mayo). *Europa Press*. <https://www.europapress.es/sociedad/noticia-caso-madrid-central-no-unico-asi-actuan-otras-ciudades-contra-contaminacion-20190529171518.html>
- Marcucci, E. y Gatta, V. (2017). Investigating the potential for off-hour deliveries in the city of Rome: Retailers' perceptions and stated reactions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.001>
- MARES y CITET (2019). MICRO-HUBS Estudio cualitativo sobre micro-hubs de distribución urbana de mercancías: principales ventajas, barreras y recomendaciones para su implementación [informe]. [https://maresmadrid.es/descargas/128/mar-movilidad/23300/informe-microhubs\\_para-web.pdf](https://maresmadrid.es/descargas/128/mar-movilidad/23300/informe-microhubs_para-web.pdf)
- Marinov, M., Giubilei, F., Gerhardt, M., Özkan, T., Stergiou, E., Papadopol, M. y Cabecinha, L. (2013). Urban freight movement by rail. *Journal of Transport Literature*, 7(3), 87-116. <https://doi.org/10.1590/S2238-10312013000300005>
- Martensson, L. (2005). *Volvo's Environmental Strategy for next generation trucks* [presentación]. First BESTUFS II Conference, Ámsterdam, Países Bajos. [http://www.bestufs.net/download/conferences/Amsterdam\\_Jun05/BESTUFS\\_Amsterdam\\_June05\\_Martensson\\_Volvo.pdf](http://www.bestufs.net/download/conferences/Amsterdam_Jun05/BESTUFS_Amsterdam_June05_Martensson_Volvo.pdf)
- Masson, R., Trentini, A., Lehuédé, F., Malhéné, N., Péton, O. y Tlahig, H. (2017). Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 81-109. <https://doi.org/10.1007/s13676-015-0085-5>
- Mazareanu, E. (2020). Average weight of packages in cross-border deliveries worldwide 2020. Statista. <https://www.statista.com/statistics/974065/cross-border-delivery-package-weight-worldwide>
- Mazzarino, M. y Rubini, L. (2019). Smart urban planning: Evaluating urban logistics performance of innovative solutions and sustainable policies in the venice lagoon—the results of a case study. *Sustainability*, 11(17), artículo 4580. <https://doi.org/10.3390/su11174580>
- MDS Transmodal Limited. (2012). *Study on Urban Freight Transport* (210041R4\_final report) [informe para la Comisión Europea]. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/studies/doc/2012-04-urban-freight-transport.pdf>

- Melacini, M., Perotti, S., Rasini, M. y Tappia, E. (2018). E-fulfilment and distribution in omnichannel retailing: A systematic literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(4), 391-414. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2017-0101>
- Melo, S. (2004). *Evaluation of urban goods distribution initiatives towards mobility and sustainability: Indicators, stakeholders and assessment tools* [tesis doctoral, Universidade do Porto]. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59846/1/000140073.pdf>
- Merchán, D. y Blanco, E. E. (2015). *The near future of megacity logistics overview of best-practices, innovative strategies and technology trends for last-mile delivery* [Technical Report]. MIT Center for Transportation & Logistics. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28441.42083>
- Merchán, D., Blanco, E. y Bateman, A. (2015, 7-10 de julio). *Urban Metrics for Urban Logistics: Building an Atlas for Urban Freight Policy Makers* [ponencia]. 14th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Cambridge, Estados Unidos.
- Metapack. (2018). *State of eCommerce Delivery Report – Global Insights* [Research Report]. <https://www.metapack.com/whitepaper/2018-state-of-ecommerce-delivery-report-global-insights-pdf>
- Metapack. (2020). *The global ecommerce consumer report*. [https://www.metapack.com/wp-content/uploads/2020/02/MP\\_2019-Consumer-Research-Report\\_exec-summary.pdf](https://www.metapack.com/wp-content/uploads/2020/02/MP_2019-Consumer-Research-Report_exec-summary.pdf)
- Mirhedayatian, S. M. y Yan, S. (2018). A framework to evaluate policy options for supporting electric vehicles in urban freight transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 22-38. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.11.007>
- Morgan, B. (2020). *Dark stores are the future of post-pandemic retail*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/blakemorgan/2020/04/25/dark-stores-are-the-future-of-post-pandemic-retail>
- Morganti, E., Seidel, S., Blanquart, C., Dablanc, L. y Lenz, B. (2014). The impact of e-commerce on final deliveries: Alternative parcel delivery services in France and Germany. *Transportation Research Procedia*, 4, 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.014>
- Moroz, M. y Polkowski, Z. (2016). The last mile issue and urban logistics: Choosing parcel machines in the context of the ecological attitudes of the y generation consumers purchasing online. *Transportation Research Procedia*, 16, 378-393. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.036>
- Motraghi, A. y Marinov, M. V. (2012). Analysis of urban freight by rail using event based simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 25, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.02.009>

- Muñuzuri, J., Larrañeta, J., Onieva, L. y Cortés, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, 22(1), 15-28.  
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2004.10.003>
- Muñuzuri, J., Onieva, L. y Guadix, J. (2016). Gestión pública de la logística urbana de mercancías: Una normativa, múltiples necesidades. *Economía Industrial*, 400, 21-28.
- Naciones Unidas. (2018, 16 de mayo). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*.  
[https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf)
- Nash, C., Sansom, T. y Still, B. (2001). Modifying transport prices to internalise externalities: Evidence from European case studies. *Regional Science and Urban Economics*, 31(4), 413-431.  
[https://doi.org/10.1016/S0166-0462\(01\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0166-0462(01)00059-X)
- Ogden, K. W. (1992). *Urban goods movement: A guide to policy and planning*. Routledge.  
<https://trid.trb.org/view/367489>
- Okholm, H. B., Thelle, M. H., Møller, A., Basalisco, B. y Rølmer, S. (2013). *E-commerce and delivery: A study of the state of play of EU parcel markets with particular emphasis on e-commerce*. Copenhagen Economics. <https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Publication/publicationPDF/8/238/0/E-commerce-and-delivery.pdf>
- Olsson, J., Hellström, D. y Pålsson, H. (2019). Framework of last mile logistics research: A systematic review of the literature. *Sustainability*, 11(24), artículo 7131.  
<https://doi.org/10.3390/su11247131>
- Ontsi. (2015). *Estudio y guía metodológica sobre ciudades inteligentes*.  
<https://www.ontsi.red.es/es/estudios-e-informes/Ciudades-Inteligentes/Estudio-y-Guia-Metodologica-sobre-Ciudades-Inteligentes>
- Ontsi. (2019). *El comercio electrónico b2c en España. 2018*.  
<https://doi.org/10.30923/2172-458x/b2c/201911>
- Ontsi. (2020). *El comercio electrónico B2C en España. Edición 2020*.  
<https://www.ontsi.red.es/es/estudios-e-informes/Hogares-y-ciudadanos/El-Comercio-Electronico-B2C-en-Espana-2019-%28Edicion-2020%29>
- Oracle. (2016). *Delivering Retail 2016*. <https://go.oracle.com/LP=39022/?>
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2003). *Delivering the Goods 21st Century Challenges to Urban Goods Transport*.  
<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/03deliveringgoods.pdf>

- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2020a). *Connecting businesses and consumers during covid-19: Trade in parcels*.  
<http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/connecting-businesses-and-consumers-during-covid-19-trade-in-parcels-d18de131>
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2020b). *E-commerce in the time of Covid-19*. <http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/e-commerce-in-the-time-of-covid-19-3a2b78e8>
- Organización Mundial del Comercio (OMC). (2020). *Examen estadístico del comercio mundial 2020*.  
[https://www.wto.org/spanish/res\\_s/statis\\_s/wts2020\\_s/wts2020\\_s.pdf](https://www.wto.org/spanish/res_s/statis_s/wts2020_s/wts2020_s.pdf)
- Packlink Pro. (2019). *3.ª Edición del estudio sobre logística del eCommerce y Marketplaces en España de Packlink*.  
<https://pro.packlink.es/becommerce/3a-edicion-del-estudio-sobre-logistica-del-ecommerce-y-marketplaces-en-espana-de-packlink>
- Parcel and Postal Technology International. (2014). *Annual Showcase 2014*.  
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Consumer-Business/gx-cb-last-mile.pdf>
- Patella, S. M., Grazieschi, G., Gatta, V., Marcucci, E. y Carrese, S. (2020). The adoption of green vehicles in last mile logistics: A systematic review. *Sustainability*, 13(1), artículo 6.  
<https://doi.org/10.3390/su13010006>
- Peinado, F. (2019, 20 de noviembre). Un millón de paquetes en un día: Se acerca en Madrid el lunes de las furgonetas. *El País*. [https://elpais.com/ccaa/2019/11/19/madrid/1574161909\\_139105.html](https://elpais.com/ccaa/2019/11/19/madrid/1574161909_139105.html)
- PricewaterhouseCoopers. (2021). *PwC's global consumer insights survey 2021*.  
<https://www.pwc.com/gx/en/industries/consumer-markets/consumer-insights-survey.html>
- PRNewswire (2019, 29 de abril). *Global drone service market report 2019: Market is expected to grow from USD 4.4 billion in 2018 to USD 63.6 billion by 2025, at a CAGR of 55.9%*. Markets Insider. <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/global-drone-service-market-report-2019-market-is-expected-to-grow-from-usd-4-4-billion-in-2018-to-usd-63-6-billion-by-2025-at-a-cagr-of-55-9-1028147695>
- Punakivi, M. y Saranen, J. (2001). Identifying the success factors in e-grocery home delivery. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 29(4), 156-163.  
<https://doi.org/10.1108/09590550110387953>
- Quak, H. (2008). *Sustainability of Urban Freight Transport Retail Distribution and Local Regulations in Cities* [tesis doctoral]. Erasmus Universiteit Rotterdam. <https://cutt.ly/pbKaM6Y>

- Quak, H. J. y de Koster, M. B. M. (2006). *Urban Distribution: The Impacts of Different Governmental Time-Window Schemes* (ERIM Report Series Research in Management ERS-2006-053-LIS). <https://ssrn.com/abstract=1101148>
- Quak, H., Balm, S. y Posthumus, B. (2014). Evaluation of city logistics solutions with business model analysis. *Procedia*, 125, 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1460>
- Quak, H., Nesterova, N. y van Rooijen, T. (2016). Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice. *Transportation Research Procedia*, 12, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.055>
- Rangaswamy, A. y Gupta, S. (2000). Innovation adoption and diffusion in the digital environment: Some research opportunities. En V. Mahajan, E. Muller y Y. Wind (eds.), *New-product diffusion models*. Springer.
- Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B. y Roccotelli, M. (2018). A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability*, 10(3), artículo 782. <https://doi.org/10.3390/su10030782>
- Regulation (EC). (2009). *Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32009R0443>
- Robinson, M. y Mortimer, P. (2004). *Rail in Urban Freight What Future, If Any?* Bestufs. [http://www.bestufs.net/download/NewsEvents/articles/What\\_Future\\_If\\_Any.pdf](http://www.bestufs.net/download/NewsEvents/articles/What_Future_If_Any.pdf)
- Roca-Riu, M. y Menéndez, M. (2019, 15-17 de mayo). *Logistic deliveries with drones: State of the art of practice and research* [ponencia]. 19th Swiss Transport Research Conference (STRC 2019), Ascona, Siuza. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000342823>
- Rohmer, S. y Gendron, B. (2020). *A guide to parcel lockers in last mile distribution-highlighting challenges and opportunities from an OR perspective*. CIRRELT. <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2020-11.pdf>
- Rojas-Cuevas, I.-D., Caballero-Morales, S.-O., Martínez-Flores, J.-L. y Mendoza-Vázquez, J.-R. (2018). Capacitated vehicle routing problem model for carriers. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 12. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v12i0.345>
- Russo, F. y Comi, A. (2011). A model system for the ex-ante assessment of city logistics measures. *Research in Transportation Economics*, 31(1), 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.11.011>
- Sabanoglu, T. (2021). *Global retail e-commerce sales 2014-2024*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/379046/worldwide-retail-e-commerce-sales>
- Savelsbergh, M. y van Woensel, T. (2016). 50th anniversary invited article—city logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579-590. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>

- Schröder, J., Heid, B., Neuhaus, F., Kässer, M., Klink, C. y Tatomir, S. (2018). *Fast forwarding last-mile delivery – implications for the ecosystem*. McKinsey. <https://cutt.ly/EbQQOAJ>
- Schroten, A., Schep, E., De Graaff, L., Bijleveld, M. y Vergeer, R. (2018). *Environmental Prices Handbook EU28 Version*. CE Delft. <https://www.cedelft.eu/en/publications/2191/environmental-prices-handbook-eu28-version>
- SEUR. (2019, 14 de marzo). *La evolución de las tendencias del eCommerce actual: Informe eShopper Barometer 2018*. <https://blog.seur.com/evolucion-tendencias-ecommerce-eshopper-barometer-2018>
- Shukla, R. y Raval, P. M. (2018). Impact of e-commerce on urban freight. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3258392>
- Śladkowski, A., Dantas, R., Micu, C., Arena, A. y Singhania, V. (2014). Urban freight distribution: Council warehouses & freight by rail. *Transport Problems*, 9, 29-43.
- Stathopoulos, A., Valeri, E., Marcucci, E., Gatta, V., Nuzzolo, A. y Comi, A. (2011). Urban freight policy innovation for Rome's LTZ: a stakeholder perspective. En C. Macharis y S. Melo (eds.), *City Distribution and Urban Freight Transport* (pp. 75-100). Edward Elgar.
- Stathopoulos, Amanda, Valeri, E. y Marcucci, E. (2012). Stakeholder reactions to urban freight policy innovation. *Journal of Transport Geography*, 22, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.11.017>
- Statista. (2019). *Timeframe willing to wait for fast shipping according to U.S. consumers as of September 2019*. <https://www.statista.com/statistics/561768/fast-online-order-delivery-us-consumers>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P. M. (eds.) (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)
- Straightsol. (2015). *Homepage*. <http://www.straightsol.eu>
- Sullivan, E. C. (2002). State route 91 value-priced express lanes: Updated observations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1812(1), 37-42. <https://doi.org/10.3141/1812-05>
- Swgalou, E., Ambrosini, C. y Routhier, J.-L. (2004). The Environmental Assessment of Urban Goods Movement. En E. Taniguchi y R. G. Thompson (eds.), *The 3rd International Conference on City Logistics* (Madeira, Portugal, 25-27 de marzo de 2003; pp. 207-220). Elsevier.
- Taniguchi, E. y Tamagawa, D. (2005). Evaluating city logistics measures considering the behavior of several stakeholders. *Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 3062-3076. <https://doi.org/10.11175/easts.6.3062>

- Taniguchi, E. y Thompson, R. G. (2002). Modeling city logistics. *Transportation Research Record*, 1790(1), 45-51. <https://doi.org/10.3141/1790-06>
- Taniguchi, E., Thompson, R. G. y Yamada, T. (2014). Recent trends and innovations in modelling city logistics. *Procedia*, 125, 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1451>
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Institute for City Logistics e International Conference on City Logistics. (eds.) (1999). *City logistics I: First International Conference on City Logistics* (Cairns, Australia, 12-14 de julio de 1999). Institute of Systems Science Research.
- Taylor, M. A. (2005, noviembre). *The city logistics paradigm for urban freight transport* [ponencia]. State of Australian Cities National Conference, Brisbane, Queensland, Australia. <https://trid.trb.org/view/1396490>
- Temando. (2017). *State of Shipping in Commerce* [resumen del informe]. <https://cutt.ly/dbVHV4U>
- The City of New York. (2012). *Nyc dot*. Recuperado el 5 de mayo de 2021, de <https://www1.nyc.gov/html/dot/html/about/projects-2012.shtml>
- Thune-Larsen, H., Veisten, K., Rodseth, K. L. y Klaeboe, R. (2014). *Marginal external costs of road transport*. Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research. <https://www.toi.no/getfile.php/1338984-1475057027/Publikasjon-ner/T%C3%98I%20rapporter/2014/1307-2014/1307-2014-sum.pdf>
- Tian, Y., Chiu, Y.-C. y Sun, J. (2019). Understanding behavioral effects of tradable mobility credit scheme: An experimental economics approach. *Transport Policy*, 81, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.05.019>
- Timms, P. (2014). Transferability of urban freight transport measures: A case study of Cariacica (Brazil). *Research in Transportation Business & Management*, 11, 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.02.001>
- Tipsa. (2019, 3 de junio). *El 31% del e-commerce hace uso de los puntos de conveniencia, según TIPS.A*. <https://blog.tip-sa.com/dossier-de-prensa/articulo/470-el-31-del-ecommerce-hace-uso-los-puntos-conveniencia-segun-tipsa>
- Tobar, S. (2021, 21 de marzo). El Corte Inglés y Dia explotan el boom de las ‘dark stores’ gracias a las ventas ‘online’. *El Español*. [https://www.elespanol.com/invertia/empresas/distribucion/20210321/corte-ingles-dia-explotan-stores-gracias-ventas/567443558\\_0.html](https://www.elespanol.com/invertia/empresas/distribucion/20210321/corte-ingles-dia-explotan-stores-gracias-ventas/567443558_0.html)
- TomTom (2018). *Tomtom Traffic Index. Measuring Congestion Worldwide*. [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index)
- Turban, E., Outland, J., King, D., Lee, J. K., Liang, T.-P. y Turban, D. C. (2018). *Electronic Commerce 2018*. Springer.
- Uber (s. f.). *Home*. <https://www.uber.com/es/es-es/elevate>
- U. S. Department of Energy. (2020). *FuelEconomy.gov—The official U.S. government source for fuel economy information*. <http://www.fueleconomy.gov>

- U. S. Department of Transportation. (1976). *Transport of solid commodities via freight pipeline: impact assessment. Volumen V. First year final report* [informe técnico].  
<https://doi.org/10.2172/5238248>
- University of Washington. Supply Chain Transportation & Logistics Center. (2020). *Common MicroHub Research Project Research Scan*.  
[http://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/research\\_pub\\_files/SCTL-Microhub-Research-Scan.pdf](http://depts.washington.edu/sctlctr/sites/default/files/research_pub_files/SCTL-Microhub-Research-Scan.pdf)
- UPS. (2019). *UPS Pulse of the Online Shopper™ Study*. <https://www.ups.com/assets/resources/media/knowledge-center/ups-pulse-of-the-online-shopper.PDF>
- Van den Bossche, M., Maes, J., Vanellander, T., Macário, R. y Reis, V. (2017). *Logistics schemes for E-commerce* (Non-binding guidance documents on urban logistics N° 4/6) [informe].  
<https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/904f45/165605.pdf>
- Van Duin, J. H. R., de Goffau, W., Wiegmans, B., Tavasszy, L. A. y Saes, M. (2016). Improving home delivery efficiency by using principles of address intelligence for b2c deliveries. *Transportation Research Procedia*, 12, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.006>
- Van Duin, J. H. R., Wiegmans, B. W., van Arem, B. y van Amstel, Y. (2020). From home delivery to parcel lockers: A case study in Amsterdam. *Transportation Research Procedia*, 46, 37-44.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.161>
- Van Duin, R., Wiegmans, B., Tavasszy, L., Hendriks, B. y He, Y. (2019). Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching. *Transportation Research Procedia*, 39, 565-575. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.058>
- Van Essen, H., Schrotten, A., Otten, M., Sutter, D., Schreyer, C., Zandonella, R., Maibach, M. y Doll, C. (2011). *External costs of transport in Europe. Update study for 2008*. CE Delft.  
[http://ecocalc-test.ecotransit.org/CE\\_Delft\\_4215\\_External\\_Costs\\_of\\_Transport\\_in\\_Europe\\_def.pdf](http://ecocalc-test.ecotransit.org/CE_Delft_4215_External_Costs_of_Transport_in_Europe_def.pdf)
- Van Essen, H., van Wijngaarden, L., Schrotten, A., Sutter, D., Bieler, C., Maffii, S., Brambilla, M., Fiorello, D., Fermi, F., Parolin, R., El Beyrouty, K., Europäische Kommission y Unit-Economic Analysis and Better Regulation. (2019). *Handbook on the external costs of transport*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://doi.org/10.2832/27212>
- Van Rooijen, T. y Quak, H. (2010). Local impacts of a new urban consolidation centre – the case of Binnenstadservice.nl. *Procedia*, 2(3), 5967-5979.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.011>
- Verdonck, L., Caris, A., Ramaekers, K. y Janssens, G. K. (2013). Collaborative logistics from the perspective of road transportation companies. *Transport Reviews*, 33(6), 700-719.  
<https://doi.org/10.1080/01441647.2013.853706>
- Verhoef, E. (1994). External effects and social costs of road transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 28(4), 273-287. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90003-5)

- Verlinde, S., Macharis, C. y Witlox, F. (2012). How to consolidate urban flows of goods without setting up an urban consolidation centre? *Procedia*, 39, 687-701.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.140>
- Visser, J. (2018). The development of underground freight transport: An overview. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 123-127. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.006>
- Visser, J., Nemoto, T. y Browne, M. (2014). Home delivery and the impacts on urban freight transport: A review. *Procedia*, 125, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1452>
- Walmart. (2020). *Walmart now piloting on-demand drone delivery with Flytrex*.  
<https://corporate.walmart.com/newsroom/2020/09/09/walmart-now-piloting-on-demand-drone-delivery-with-flytrex>
- We Are Social. (2021). *Digital 2021*. <https://wearesocial.com/digital-2021>
- Weltevreden, J. W. J. y Rotem-Mindali, O. (2009). Mobility effects of b2c and c2c e-commerce in the Netherlands: A quantitative assessment. *Journal of Transport Geography*, 17(2), 83-92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.11.005>
- Winkenbach, M. y Janjevic, M. (2018). Classification of last-mile delivery models for e-commerce distribution: A global perspective. En E. Taniguchi y R. G. Thompson (eds.), *City Logistics 1: New Opportunities and Challenges* (pp. 209-229). John Wiley & Sons.  
<https://doi.org/10.1002/9781119425519.ch11>
- Wired. (2016). *Uber just launched its food-delivery ubereats app in first us cities*.  
<https://www.wired.com/2016/03/ubereats-standalone-app-launches-us>
- Wolfenbarger, M. y Gilly, M. C. (2001). Shopping online for freedom, control, and fun. *California Management Review*, 43(2), 34-55. <https://doi.org/10.2307/41166074>
- World Bank Group. (2009). *Freight transport for development toolkit: Urban freight*.  
<https://olc.worldbank.org/content/freight-transport-development-toolkit-urban-freight>
- World Economic Forum. (2020). *The future of the last-mile ecosystem*.  
<https://www.weforum.org/reports/the-future-of-the-last-mile-ecosystem>
- Xu, M., Ferrand, B. y Roberts, M. (2008). The last mile of e-commerce – unattended delivery from the consumers and eTailers' perspectives. *International Journal of Electronic Marketing and Retailing*, 2(1), 20. <https://doi.org/10.1504/IJEMR.2008.016815>
- Zheng, C., Gu, Y., Shen, J. y Du, M. (2021). Urban logistics delivery route planning based on a single metro line. *IEEE Access*, 9, 50819-50830.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069415>

# **ANEXOS**

---



# Anexo I. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral

---

La tesis doctoral ha derivado en dos publicaciones científicas:

Villa, R., Monzón, A. (2021). Mobility Restrictions and E-Commerce: Holistic Balance in Madrid Centre during COVID-19 Lockdown. *Economies* 9, artículo 57.

<https://doi.org/10.3390/economies9020057>

Villa, R., Monzón, A. (2021). A Metro-Based System as Sustainable Alternative for Urban Logistics in the Era of E-Commerce. *Sustainability* 13, artículo 4479.

<https://doi.org/10.3390/su13084479>

La siguiente tabla muestra el *ranking* de las revistas científicas en las que se han publicado los dos artículos citados.

Revista	Categoría	Cuartil	Factor de impacto (citescore)
<i>Economies</i>	Economics, Econometrics and Finance	Q1 (Citescore)	1,2
<i>Sustainability</i>	Environmental Studies Geography, Planning and Development	Q2 (JCR) Q1 (Citescore)	2,576

A continuación, se adjuntan los dos artículos científicos referidos:



## Anexo I.I. Mobility Restrictions and E-Commerce: Holistic Balance in Madrid Centre during COVID-19 Lockdown



Article

### Mobility Restrictions and E-Commerce: Holistic Balance in Madrid Centre during COVID-19 Lockdown

Rafael Villa <sup>1,\*</sup> and Andrés Monzón <sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Technology and Science, Camilo José Cela University, 28692 Madrid, Spain

<sup>2</sup> Transport Research Centre (TRANSyT), Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; andres.monzon@upm.es

\* Correspondence: rvilla@ucjc.edu

**Abstract:** COVID-19 has brought about a substantial change in urban mobility, as well as an unprecedented increase in e-commerce throughout the world due to the emergence of new ways of shopping and consumption habits. In this context, urban logistics plays a crucial role in the triple bottom line of sustainability. The present document establishes a holistic vision of the problem aiming to (i) measure and compare the traffic generated in the Madrid Central area (low-emission zone) during the periods before and after the pandemic, and (ii) quantify e-commerce orders made by residents, as well as the Light Commercial Vehicles (LCV) required to deliver these parcels, measuring their environmental impact. The results show that road traffic in the Madrid Central area decreased by approximately 2/3 compared to normal levels and 1/2 in the case of LCVs. With regards to e-commerce, the number of parcels delivered doubled. This fact entailed an increase in the number of LCVs dedicated to package delivery in the central district and more pollution, but to a lesser extent than the growth of e-commerce. The challenge faced by urban logistics in the post-Covid era is managing to blend new mobility within large cities with the high volumes of e-commerce deliveries demanded by residents.

**Keywords:** city logistics; last-mile delivery; sustainable development; e-commerce; COVID-19; environmental economics; sustainable transport



**Citation:** Villa, Rafael, and Andrés Monzón. 2021. Mobility Restrictions and E-Commerce: Holistic Balance in Madrid Centre during COVID-19 Lockdown. *Economics* 9: 57. <https://doi.org/10.3390/economics9020057>

Academic Editor: George Halkos

Received: 23 February 2021

Accepted: 9 April 2021

Published: 13 April 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

#### 1. Introduction

Habitability, sustainability and competitiveness; these are the main challenges faced by large cities throughout the world. Their prioritization translates into improved quality of life for inhabitants and facilitates development from the three perspectives of sustainability: economic, social and environmental. There is a clear consensus among the main stakeholders of smart cities that human welfare and needs should be the starting point for a city's development, always taking into account sustainability criteria.

According to the European Commission (European Commission 2021), the large majority of European citizens live in an urban environment, and over 60% live in urban areas with over 10,000 inhabitants. Urban mobility accounts for 40% of all road transport CO<sub>2</sub> emissions and up to 70% of other transport contaminants. In cities like Rome (166), Paris (165) and London (149), traffic congestion causes residents to lose a significant number of hours on the road (INRIX 2020). The challenge for local administrations lies in reducing this traffic congestion in order to improve the habitability and competitiveness of their cities (Demir et al. 2015).

Within the context of urban goods distribution, globalization and e-commerce have generated exponential growth in road transport by enabling the development of an open market where products can be purchased from any location. Goods travel throughout the world and most are delivered in cities. This effect has been compounded by the COVID-19 crisis, as consumers have had to adopt new ways of shopping and new consumption habits, leading to an increase in the percentage of users who purchase physical products online. The number of trucks and vans is increasing due to the rising popularity of e-commerce

and the desire for faster deliveries (Savelsbergh and Woensel 2016), which, in turn, has led to more frequent and split deliveries in residential areas.

This increase in the number of transport vehicles in cities translates directly into greater congestion and accidents (social), more air pollution and noise (environmental) and higher logistics costs, with a subsequent increase of product prices (economic). Each city has attempted to implement its own solutions, resulting in initiatives that have generally been suboptimal at addressing this triple balance (Macharis and Melo 2011). In late 2020, the European Commission presented a sustainable and smart mobility strategy (European Commission 2020) which defined a roadmap of 82 initiatives grouped into three main pillars: digitalization, resilience and greening of mobility, in terms of both individuals and goods. This includes an exhaustive set of measures for goods transport, including weight reduction in road transport, the definition of specific plans to achieve sustainable urban logistics, and greater use of intermodal transport, favoring the use of railways and waterways, both inside and outside cities.

In order to tackle this challenge, cities must face the difficult task of promoting systems of urban goods distribution that are environmentally friendly as well as sufficiently efficient to satisfy both society and logistics businesses. It is important to highlight that sustainable development objectives can be pursued through measures that are occasionally contradictory and generate a different impact based on the affected stakeholders (Gatta and Marcucci 2014). The new challenge for city logistics lies in finding solutions that are capable of absorbing an increase in urban transport of goods derived from new consumption patterns while, at the same time, minimizing the associated social and environmental impact.

Accepting the radical changes that the emergence of COVID-19 has brought to our society in most fields, the present document aims to compare the pandemic's repercussions on traffic, e-commerce and urban logistics in the central district of the City of Madrid (Madrid Central area). More specifically, we aim to answer the following questions:

- What has been the impact on city traffic of the mobility restrictions imposed due to COVID-19?
- How has the demand for e-commerce parcels evolved before and after the pandemic?
- What have been the implications of this increase in e-commerce for urban logistics and the environment?

## 2. Literature Review

### 2.1. Urban Logistics: Context, E-Commerce and Measures in New Scenario

#### 2.1.1. Urban Movement of Goods

The movement of urban goods is essential for economic vitality (Allen et al. 2000; Muñuzuri et al. 2005) and key for industrial, commercial and leisure activities which, in turn, are vital in wealth generation. Following the ideas presented by various authors (International Conference on City Logistics et al. 2004; González-Feliu et al. 2012; Cattaruzza et al. 2017), the movement of goods within cities can be grouped into three main categories: (i) movement between businesses -B2B-, movement to end consumers -B2C- and urban management movement. Figure 1 shows these types of movements of goods and their main organization modalities.

Of total urban traffic, the distribution of urban goods is responsible for approximately 15% on a typical city (Dablanc 2011). Moreover, it involves other activities requiring greater use of space in cities: loading-unloading, storage, etc. Within urban logistics, different studies in French cities have determined that 46% of the total urban movement of goods is related to B2C commerce (Cattaruzza et al. 2017).

This paper addresses the transport of goods related to B2C commerce (ECM), specifically, urban logistics derived from e-commerce.

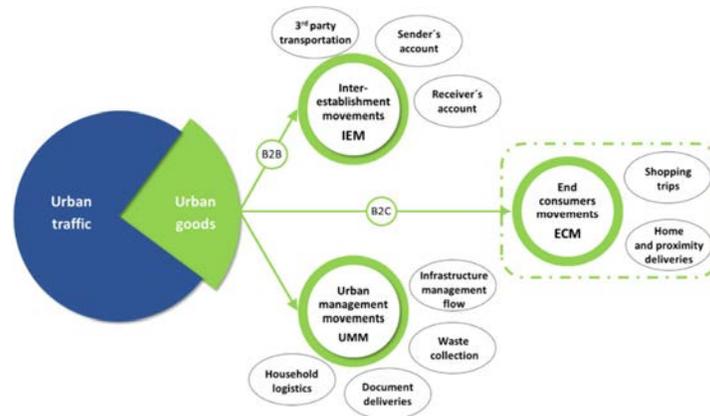


Figure 1. Classification of urban goods movement. Source: adapted from (Cattaruzza et al. 2017).

### 2.1.2. E-Commerce and Urban Logistics

Today, urban consumers can purchase everything they need online. In early 2020, the global population stood close to 7.75 billion inhabitants, of which 4.54 billion had used the Internet at least once, representing a penetration of 59%. Within the group of Internet users, 74% had made an online purchase during the studied period (We Are Social and Hootsuite 2021).

This continued growth of e-commerce throughout the world has accelerated in 2021, as COVID-19 has rewritten the rules of the retail sector. Between January 2019 and June 2020, retail platforms experienced an extraordinary increase in global traffic. The websites of retail businesses received nearly 22 billion visits in June 2020; a 35.5% increase year-on-year (Statista 2020a). In the United States, the share of e-commerce in total retail sales rose from 11.8 to 16.1% between the first and second quarters, and in the United Kingdom from 20.3 to 31.3%. In the EU-27, retail sales via mail order houses or the Internet in April 2020 increased by 30% compared to April 2019, while total retail sales diminished by 17.9% (OECD 2020a).

The reasons are evident: lockdown measures have driven new consumers to pursue online channel in order to avoid busy physical stores, and the shopping frequency of previous cyber-customers has increased and a multitude of businesses which did not yet have an online presence have launched such initiatives. E-commerce has become the only feasible option for many traditional brick-and-mortar stores during the pandemic, and has demonstrated its resilience by meeting growing consumer demand and ensuring the provision of essential goods and services, e.g., by posting products on social media sites and ordering product pick-up or delivery services (Koch et al. 2020; E-Commerce Europe 2021). However, the effect of the COVID-19 crisis on e-commerce has not been uniform across product categories or sellers. While the impact of COVID-19 on several categories has been considerable, it has had a much smaller impact on other products. Items related to food, fashion, electronics, beauty and household were the best-selling products, while others, such as tourism and airlines, have collapsed (OECD 2020b).

Amidst the unstoppable growth of e-commerce, while electronic transactions travel through data networks, the physical products being purchased still need to be transported and delivered to end consumers. During the first months of the pandemic, transportation and distribution of goods became one of the main causes of disruptions in the supply chain and affected the supply of essential items (Ivanov 2020; Linton and Vakil 2020). More people living in cities and simpler transactions for consumers translate into a higher frequency of deliveries and more vehicles on the road (Crainic et al. 2004;

Cardenas et al. 2017). This increase in e-commerce has resulted in increased pressure on last-mile logistics (Srinivas and Marathe 2021).

In addition, the on-demand economy and its instant deliveries have driven new consumer habits (Dablanc et al. 2017), where q-commerce (quick-commerce) has emerged as a new model within e-commerce, based on speed, convenience and customer care. Users value fast deliveries, being able to choose among different delivery options and being kept informed about the status of their orders. Regarding the evolution experienced by commerce in cities, Figure 2 shows the key characteristics of various generations of B2C commerce. Four new characteristics related to urban distribution are added to those previously established by Delivery Hero: Quick Commerce: Pioneering the Next Generation of Delivery (2020).

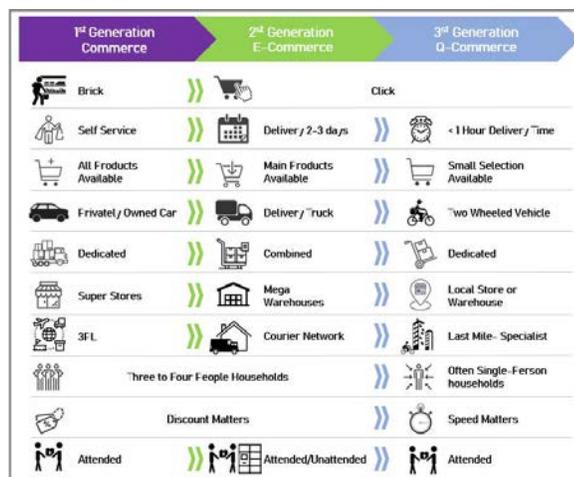


Figure 2. The evolution of quick commerce. Source: adapted from (Delivery Hero: Quick Commerce: Pioneering the Next Generation of Delivery 2020).

Figure 2 shows the evolution of consumer purchasing habits and the response by logistics operators to satisfy this demand. In the first generation of commerce, customers were the ones who visited physical stores, with a large product offering, to make their purchases. In q-commerce, purchases take place through a click, delivery time is a key variable and the product range is limited, since there are numerous online stores.

The logistics response to these shopping habits is very different. The first scenario deals with large volumes, employs large warehouses, optimizes loads and its essential element is cost. On the other hand, q-commerce volumes are small, operates through microhubs, response time is the key consideration and has couriers specializing in last-mile operations.

Q-commerce accentuates the difficulties already faced by e-commerce urban distribution: small volumes, more delivery addresses, higher resupply frequencies, lower stock levels, reduced optimization of vehicle loads and just-in-time deliveries (Lebeau and Macharis 2014). All of these elements entail an increasing dependence on urban roads and a need to find solutions for urban logistics. In this new context, lockers, collection points and mobile warehouses can have a positive impact from various perspectives and for all stakeholders involved in urban logistics by reducing the number of trips, failed deliveries and vehicles required. (Viu-Roig and Alvarez-Palau 2020).

### 2.1.3. Measures and Solutions to Improve Urban Logistics

In recent years, numerous initiatives have sought to minimize the negative effects of urban distribution and create the basis for a more solid and circular future economy where resources are employed more sustainably.

Different authors have classified and organized the significant number of measures proposed to improve city logistics into various categories (Russo and Comi 2011; Browne et al. 2012; Stathopoulos et al. 2012; CIVITAS 2015; Macharis and Kin 2017; Ranieri et al. 2018). However, the literature has mainly focused on the perspective of local authorities and political decision makers, despite the key role played by the private sector in many of these measures. Macharis and Kin (2017) focus on measures which explicitly include responsible stakeholders acting in city logistics. They classify these measures according to the so-called “four As”: (i) awareness, (ii) avoidance, (iii) acting and (iv) anticipation of new technologies (see Table 1).

**Table 1.** Measures and solutions to improve urban logistics.

	Type of Measure	Measure	Examples
Public intervention measures	Regulatory measures	Temporary access restrictions	Delivery restrictions during the day Silent deliveries at night
		Parking regulations	Loading and unloading restrictions Vehicle parking reservation systems Shared time in parking spaces
		Environmental restrictions	Emissions standards and restrictions related to motors Noise programs/regulations Low emission areas
		Access restrictions by size or load	Weight restrictions Vehicle size Load factor restrictions
	Market-based measures	Pricing (tolls, congestion tariffs and parking fees)	Road use tolls Congestion tariffs Parking fees
		Taxes, tax breaks and incentives	High taxes for polluting vehicles Subsidies for purchase of electric vehicles Tax exemptions for electric vehicles
		Negotiable permits and mobility credits	Purchase and sale of load transport services Mobility credits in city centers
	Infrastructure and land use	Adaptation of street loading/unloading areas	Providing space on pavement for parking and loading activities
		Building codes and construction regulations	New commercial premises providing adequate space for goods handling
		Nearby delivery areas	Providing loading areas at public or private parking, empty areas, etc.
Initiatives by urban logistics stakeholders	Technological innovation measures	Innovation in vehicles	Electric vehicles Unmanned vehicles: drones and terrestrial autonomous vehicles
		Delivery points	Mailboxes for parcels Smart lockers Collection points
	Advanced algorithms and optimization	Advanced algorithms and optimization	Integrated inventory management Task-courier matching Route optimization Data-driven demand forecast
		Collaboration in urban logistics	Order or load capacity exchange Collaborative local deliveries Collaborative storage Collaborative load sending
	Infrastructure and logistics systems	Urban infrastructure and logistics installations	Urban distribution centers Microhubs Consolidation of multiple operators
Urban logistics systems		Systems for underground transport of goods Deliveries through public transport Night distribution	

Source: own elaboration, based on (CIVITAS 2015; Macharis and Kin 2017; Ranieri et al. 2018).

These measures and initiatives are listed below, grouped into two main perspectives:

- Public intervention measures:
  - (a) Regulatory measures.
  - (b) Market-based measures.
  - (c) Infrastructure and land use planning
- Initiatives from players participating in urban logistics:
  - (d) Technological innovation measures
  - (e) Infrastructure and logistics systems

Therefore, there is no single solution for urban logistics; all measures work as levers that must be applied based on the characteristics and circumstances of each particular city and taking into account the interests of all stakeholders.

The remainder of this document is structured as follows: Section 3 describes the methodology used in the research. Sections 4 and 5 present the case study and results of the methodology for the Madrid Central area. Section 6 discuss the results and, lastly, Section 7 presents the conclusions and possible areas for further research.

### 3. Methodological Framework

To address the objectives described, the research is developed from two connected perspectives. First, from the descriptive side, traffic in the Madrid Central area is measured before and after COVID-19. Second, the effects of the pandemic on e-commerce are estimated, along with the impact on urban distribution of goods. The whole procedure is shown in Figure 3.

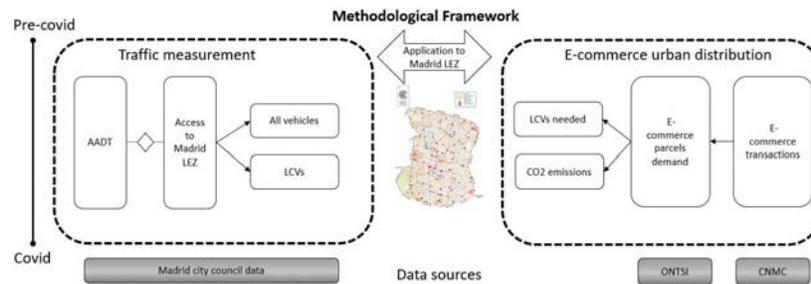


Figure 3. Methodological framework.

The first step was to measure the Annual Average Daily Traffic (AADT) and number of vehicles that accessed the Madrid Central area during the analyzed periods. The calculation of AADT was based on the information collected daily by City of Madrid through electromagnetic coils embedded into the pavement, which constantly quantify the passage of vehicles, thus enabling monitoring of traffic conditions in a given stretch of road. The measurement of vehicles accessing the Madrid Central area was based on data received from cameras placed on access points to monitor any registration plates entering it. The City of Madrid has installed 115 of these cameras to track vehicle access.

The second step consisted in analyzing the evolution of e-commerce in the studied periods through changes in consumption behaviors caused by the outbreak of COVID-19. The data was obtained from Spain's National Authority for Markets and Competition (CNMC). Quarterly e-commerce statistics take into consideration e-commerce (business volume and number of transactions) carried out using bank payment cards corresponding to the collaborating Spanish payment entity: Sistema de Tarjetas y Medios de Pago S.A. The products considered in this research are goods purchased through e-commerce and requiring physical distribution.

In the case of the Madrid Central area, the calculation of demand for e-commerce parcels considered home delivery as the most feasible and commonly used option. The calculation of this potential daily demand for e-commerce parcels was estimated through the chain-ratio method proposed by [Kotler and Keller \(2012\)](#), which multiplies a base number by several adjusting percentages to estimate the target demand.

The formulation would be as follows:

$$\begin{aligned} &\text{Daily demand for ecommerce parcels by residents} \\ (D) &= A \times P1 \times P2 \times P3 \times P4 \times P5 \end{aligned} \quad (1)$$

where:

*A* = residents over 16 years of age

*P1* = % average of residents over 16 years of age who use the Internet

*P2* = % average of residents over 16 years of age who use the Internet and shop online

*P4* = % average of residents over 16 years of age who use the Internet and shop online daily

*P5* = % average of residents over 16 years of age who use the Internet and shop online daily for products that are physically delivered

Resident data were obtained from City of Madrid public data repository, whereas data related to e-commerce came from the National Observatory for Telecommunications and the Information Society ([ONTSI 2020](#)), through its report “B2C e-commerce in Spain in 2019”.

Lastly, once the number of online transactions had been defined, the next step was to calculate the vehicles required to deliver those orders, taking into account both the number of courier companies and the theoretical load of light commercial vehicles (LCV). The market share of each courier was obtained from the CNMC through its annual report on the evolution of the postal sector ([CNMC 2019](#)).

Likewise, the CO<sub>2</sub> emissions generated by last-mile e-commerce deliveries were estimated for the two periods analyzed. The calculation of emissions took into account previous estimations of CO<sub>2</sub> emissions per kilometer travelled. The reference value to calculate emissions is kgCO<sub>2</sub> per km, following data from the [International Post Corporation \(2018\)](#), [DPDgroup \(2019\)](#) and [Deloitte \(2020\)](#).

#### 4. Case Study

Madrid is the largest city in Spain and the second largest in the European Union, with a population of 3,266,126. It is the core of Madrid Region, which has 6,663,394 inhabitants ([Spanish Statistics Institute, INE 2020a](#)).

Moreover, the Madrid Region has the highest GDP per capita in Spain and tenth highest in Europe, at over 35,000 euros per person in 2019 ([INE 2020b](#)). It is the seat of the main public institutions in the country and region, as well as the hub for political-administrative, financial and commercial activity. There are over 520,000 businesses in the region (16% of the country's total), but when narrowing the scope to those with over 500 employees, the percentage increases up to 40%.

Currently, the City of Madrid is divided into 21 administrative districts which, in turn, are comprised by 131 neighborhoods. Six of them form the Madrid Central area (see [Figure 4](#)), where we focused this research and which also make up the oldest part of the city. This area has a total surface of 523.73 ha and a population of 140,473 inhabitants as of 1 January 2020.

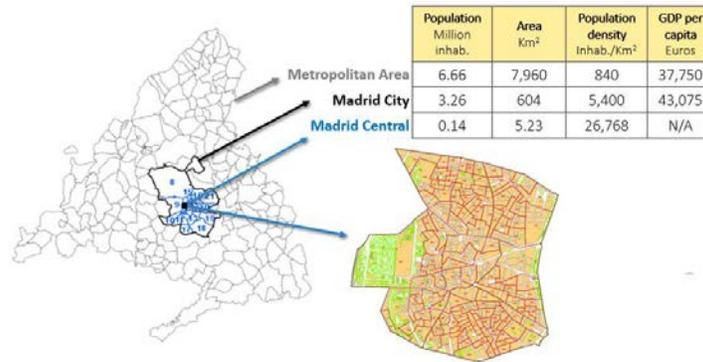


Figure 4. Region of Madrid, City of Madrid, and Madrid Central (adapted from City of Madrid website).

#### 4.1. Urban Transport

Urban transport in the City of Madrid, of both passengers and goods, has been identified as one of the most complicated among large European cities due to the orography and historical evolution of its urban structure. In terms of urban morphology, the City of Madrid presents an irregular and radio-centric map, with narrow streets and closed construction plans combined with large squares and regular avenues created by the successive remodeling undergone by the city since the 16th century.

Regarding traffic and urban distribution, Madrid's vehicle pool has a high percentage of diesel vehicles as well as older models, with an average age of 9.3 years (*Área de Gobierno de Medioambiente y Movilidad 2019*). According to the Inventory of Atmospheric Pollutant Gas Emissions (*Madrid City Council Environment and Mobility Office 2019*), road transport accounted for 34.1% of total greenhouse gas (GHG) emissions. In late 2018, commercial and industrial vehicles older than 10 years represented 73.2% of the total (*ANFAC 2019*).

In Madrid, congestion related to urban logistics reached 38% (18 points more than in the rest of Spanish cities) and has been forecasted to rise up to 47% by 2025 (*Madrid College of Economists 2020*).

#### 4.2. Madrid Central Area (Madrid LEZ)

A study analyzing 858 European cities concluded that the metropolitan section of Madrid was the urban area with the highest mortality related to nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) pollution in the continent. The study by ISGlobal (*Khomenko et al. 2021*) calculated that if all the analyzed cities reduced their concentrations of fine particles and NO<sub>2</sub> pollution to the levels recommended by the World Health Organization (WHO), they would prevent 51,000 premature deaths attributed to the former and 900 attributed to the latter.

In November of 2018, the City of Madrid defined a low-emission zone (LEZ) or "Madrid Central". This measure, known as "Madrid 360" since 2020, restricts the access of private vehicles to the central district of the capital in an effort to promote pedestrian mobility, bicycles and public transport. The only vehicles allowed are those belonging to residents, individuals with reduced mobility and security and emergency services. Logistics and distribution vehicles are allowed access to the 472 ha, but have been given a deadline to modernize their fleets.

The Madrid Central area is the core of the LEZ. Access regulations only allow eco-friendly vehicles with "0 Emissions" and "ECO" stickers, i.e., hybrid and electric vehicles, to drive and park in the area. Other vehicles can only access it if they are residents or to park in public parking or private garages.

## 5. Results

### 5.1. Calculation of Vehicle Traffic and Access to the Central District

Figures 5 and 6 show (i) traffic intensity and (ii) vehicle access to Madrid Central area for January–June in 2019 and 2020 (before and after COVID-19). The intensity, that is, the number of vehicles per hour, was registered at 177 measurement points distributed among the six neighborhoods of the Madrid Central area. Over 4,800,000 different measurements were recorded in all timeframes.

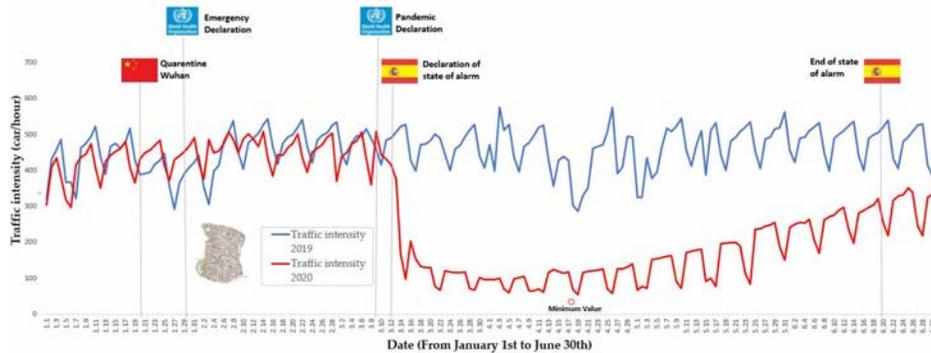


Figure 5. Traffic intensity 2019–2020 (Q1 and Q2: first and second quarter of the year).

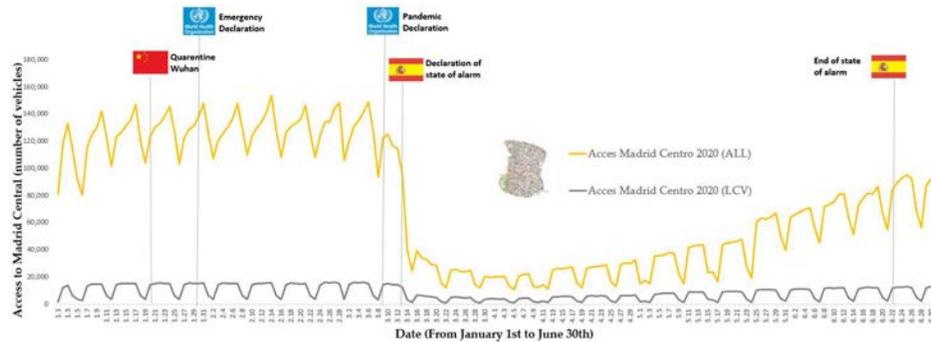


Figure 6. Vehicle access to the Madrid Central area in 2020 (Q1 and Q2).

As Figure 5 shows, the number of vehicles per hour was very similar during the first two months of both periods. The inflection point was 11 March, 2020, when the WHO declared a pandemic. Traffic intensity started to decrease considerably in the following days until, on 14 March, the Spanish Government declared a State of Alarm, limiting freedom of movement for citizens except for specific purposes and ordering most businesses to close, along with all leisure, education and cultural sites. On 15 March 2020, traffic intensity in the Madrid Central area was just 18.58% compared to the same day of the previous year.

Subsequently, in May 2020, traffic volume began to increase gradually until the end of June 2020. This increase corresponded to the progressive lifting of mobility restrictions in the City of Madrid. On 21 June, the State of Alarm was lifted, putting an end to the de-escalation process and bringing the country into the “new normal”. Nevertheless, on the last week of June, the “new normal” of 2020 saw 35.8% less traffic in the city center than on the same week of 2019.

Figure 7 shows vehicle access to the Madrid Central area during the analyzed periods (distinguishing access for all vehicles and for LCVs) and how the evolution was virtually the same as for traffic intensity. The correlation between traffic intensity and vehicle access (all vehicles) was 0.932 for 2019 and 0.995 for 2020. Regarding LCVs access, during 2019, this represented 9.72% out of the total vehicles accessing the Madrid Central area. This percentage remained similar during the pre-Covid period of 2020 (9.33%) and later increased up to 14.8% from 14 March to 30 June. In other words, the reduction in mobility in the Madrid Central area was more notable for other vehicles than for LCVs.

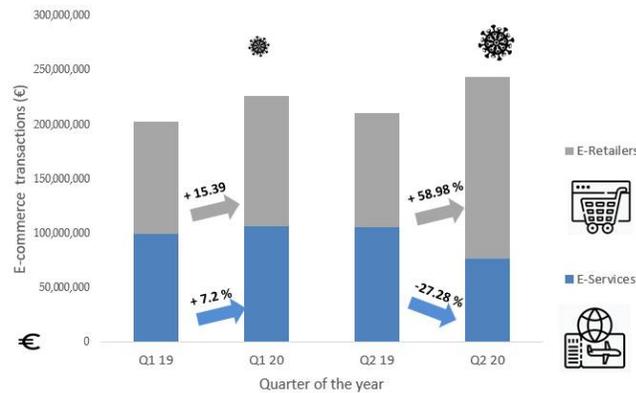


Figure 7. E-commerce transactions 2019–2020 (Q1 and Q2).

### 5.2. Calculation of E-Commerce Transactions for Physical Goods in Spain Pre- and Post-COVID

Concerning online sales, Figure 7 shows the volume of e-commerce transactions carried out by Spanish citizens throughout the analyzed period.

Focusing exclusively on e-retailers, or products requiring physical delivery, the increase in transactions reached 15.38% during the first quarter of 2020 (the last 15 days of this period correspond to the State of Alarm). In contrast, when comparing the second quarter of both years, the increase in physical goods purchased via e-commerce reached 58.97% during the first wave of the pandemic. Purchases at hypermarkets and supermarkets doubled and purchases of beverages, household appliances and audio-visual equipment tripled. Table 2 shows the 10 most popular product categories during the pandemic and their evolution throughout the 2014–2020 period. But not all sectors have experienced the same impact. Food, fashion, electronics, household products, beauty and parapharmacy have had remarkable growth while, for obvious reasons, tourism and airlines have been practically paralyzed.

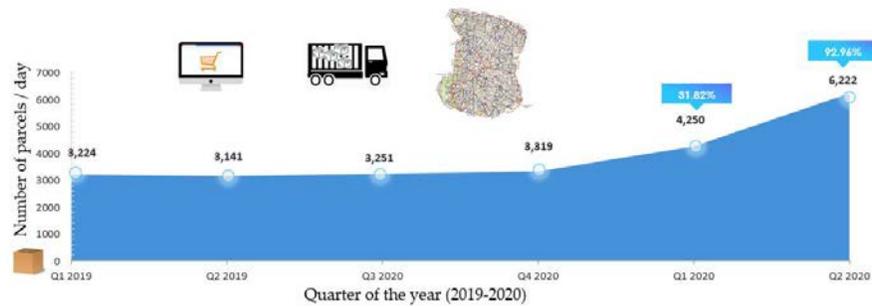
**Table 2.** Top 10 e-commerce product categories with highest growth rates.

ACTIVITY	2014-2020 (Q2)	YOY Growth Rate (Q2: 2019-2020)
FURNITURE, LIGHTING AND HOME		318%
HOME APPLIANCES, VISUAL AND AUDIO PRODUCTS		310%
BEVERAGES		291%
TOYS AND SPORTS ITEMS		247%
HARDWARE, PAINTS AND GLASS		244%
OTHER NON-SPECIALIZED TRADE		243%
PERFUMERY, COSMETICS		224%
MEDICAL AND ORTHOPEDIC ITEMS		218%
HYPERMARKETS, SUPERMARKETS AND FOOD SHOPS		213%
BODY MAINTENANCE		203%

Source: own elaboration.

### 5.3. Calculation of Demand for E-Commerce Parcels

Figure 8 shows an estimation of the daily demand for e-commerce parcels for residents of the Madrid Central area. The estimate distinguishes total demand by quarter for the period from January 2019 to June 2020. As shown, while the order volume increased slightly during 2019, the number of parcels delivered in the central district exploded after the start of the pandemic, almost doubling in number.

**Figure 8.** Daily online e-retail products 2019–2020.

As shown in Figure 9, the calculation of e-commerce demand begins with the total residents of the central district over 16 years of age and, applying the chain-ratio methodology, estimates the number of daily online shoppers for e-retailer products. The figure refers to Q1 2019.

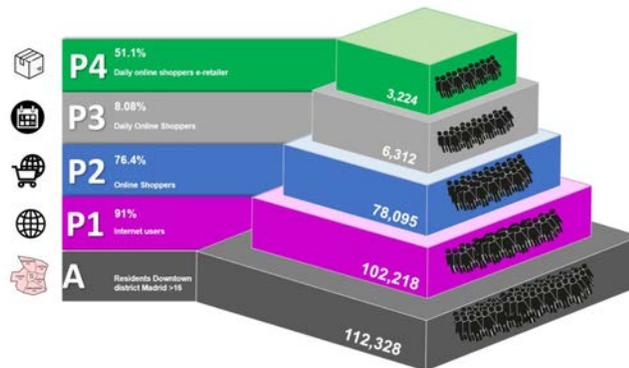


Figure 9. E-commerce factors explaining daily demand for residents.

#### 5.4. Calculation of Delivery Van Fleet

The calculation of vans required to deliver e-commerce parcels takes into account current operations in last mile logistics in the City of Madrid. These follow the traditional scheme, with large sorting and delivery centers located in the outskirts, in towns like Coslada, San Fernando de Henares, etc. These are large-scale fulfilment centers handling significant volumes. From these warehouses, LCVs service the different urban centers through routes of approximately 80–120 km per day and vehicle, delivering 80–125 parcels each day throughout long delivery periods (Deloitte 2020). Higher traffic intensity entails lower values in this range whereas, with lower intensity (greater fluidity), couriers are able to deliver a larger number of parcels in each route.

Figure 10 represents express and parcel delivery market share, where 10 companies account for nearly 75% of the Spanish courier sector. The remaining 25% is divided among a large number of companies with a very small market share. Therefore, only companies dealing with significant volumes are able to optimize loads and routes simultaneously.

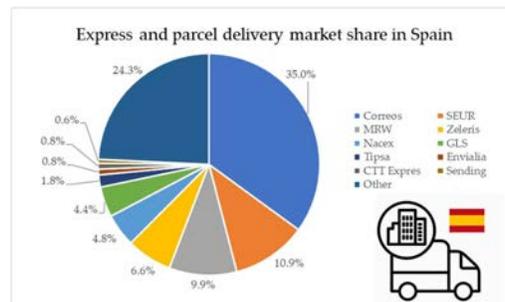


Figure 10. Market share: express and parcels delivery in Spain (source: CNMC 2020).

A larger number of couriers in the ecommerce market delivery brings down transport load optimization, since many operators will not have enough parcels to fully load their vans. In this scenario, they must either complete the route with less than their maximum capacity or combine it with other delivery areas.

Table 3 shows the minimum number of LCVs required to deliver the parcels requested by residents of the Madrid Central area, taking into account the market share of the courier sector and delivery productivity based on traffic (a value of 80–125 parcels/LCV is

considered following the traffic intensity explained in Appendix A). The figures represent daily data corresponding to the analysed period.

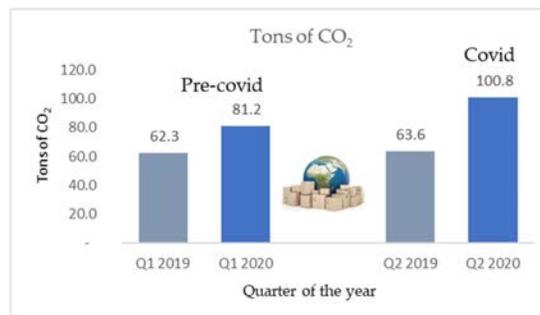
**Table 3.** Number of LCVs required to deliver parcels.

	Q1 2019	Q2 2019	Q1 2020	Q2 2020
Correos (35.0%)	15	14	17	18
SEUR (10.9%)	5	5	6	6
MRW (9.9%)	4	4	5	5
Zeleris (6.6%)	3	3	4	4
Nacex (4.8%)	2	2	3	3
GLS (4.4%)	2	2	3	3
Tipsa (1.8%)	1	1	1	1
Enviaia (0.8%)	1	1	1	1
CTT Express (0.8%)	1	1	1	1
Sending (0.6%)	1	1	1	1
Other (24.3%)	>40	>40	>40	>40

One relevant issue is the “Other” category, which groups nearly 25% of deliveries. This long tail (not quantified, since the breakdown was not available), represents a high number of LCVs carrying few parcels. In addition, this proportion of LCVs remained constant throughout the periods analyzed, since increasing the number of parcels also increased the number of delivery hours in the central district and load optimization of each LCV, but not the number of vehicles required.

##### 5.5. Calculation of the Fleet of Delivery Vans

Considering LCVs emissions based on parcels delivered and kilometers driven in each daily route, the environmental impact derived from the delivery of e-commerce parcels during the periods analyzed, measured in kg of CO<sub>2</sub> equivalent, is shown in Figure 11. CO<sub>2</sub> emissions for Q1 of both years are very similar in line with the number of packages delivered. On the other hand, for Q2, the increase in e-commerce orders (+98%) translates into a higher number of emissions but, due to the higher delivery productivity during the COVID-19 period, the increase in CO<sub>2</sub> is lower (+43.1%).



**Figure 11.** Tons of CO<sub>2</sub> emissions.

The reference value to calculate emissions is kgCO<sub>2</sub> per km, following the data from the [DPDgroup \(2019\)](#) and [Deloitte \(2020\)](#).

## 6. Discussion

The analysis of results seeks to answer in greater detail the questions posed at the start of the study. Table 4 reflects the number of vehicles per hour and access volume to the Madrid Central area for three specific time periods: January–June 2019 (pre-Covid), from January 1 to March 13 (pre-Covid) and from 13 March to 30 June (during Covid).

**Table 4.** Central district traffic statistics.

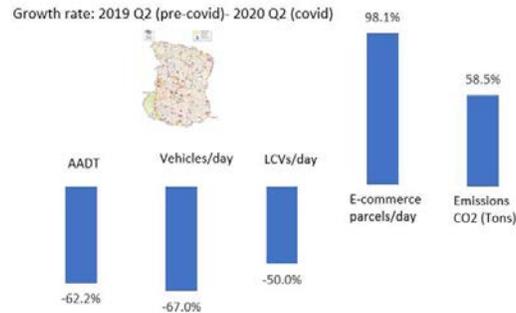
Date	AADT (Vehicles/h)			Vehicle Access (Vehicles/Day)			Vehicle Access (LCVs/Day)		
	Mean	SD	% Mean	Mean	SD	% Mean	Mean	SD	% Mean
(Q1+Q2) 2019	444	62	-	131,351	21,371	-	12,764	5580	-
01/01–03/13/20	439	48	−1.05	125,375	15,596	−4.55	11,415	4827	−10.57
03/14–06/30/20	166	83	−62.24	41,095	24,227	−67.22	6079	3789	−46.74

In Madrid, COVID-19 paralyzed all activities considered as nonessential and, therefore, movement was limited to these basic activities. On average, traffic intensity decreased by 62.24%. In turn, since the Government implemented the State of Alarm which locked down most of the population until the so-called “new normal” (11/05/2020), road traffic dropped, on average, down to 76.28%. Similar results were reported in the UK, where road traffic volumes fell by as much as 73% (Budd and Ison 2020), and in other cities around the world: New York (−74%), Barcelona (−73%), Milan (−74%), Stockholm (−48%) and Sao Paulo (−55%) (year-on-year traffic reduction between 16 March to 22 March 2020; Statista 2020b). In this context, all modes of transportation were affected and it would be interesting to know how citizens changed their daily commute preferences due to the healthcare crisis. In the case of car access volume, the reduction was similar for total vehicles (67.22%), but significantly lower for LCVs (46.74%). This observation is explained by the fact that, due to the state of alarm, access to the central district was restricted to key activities, including supply of essential goods and services, home delivery of food, healthcare services and the necessary industry to conduct key activities. Under normal conditions, urban distribution accounts for 20% of total traffic in Madrid (DGT 2020), but this percentage rose during the analyzed period, due to the decrease in general traffic when compared to LCV traffic reduction. Focusing only on the period of the state of alarm, overall vehicle access to the Madrid Central area fell by 82.18% and in the specific case of LCVs, by 67.38%.

In contrast, e-commerce transactions saw a significant increase during that same period, as consumers embraced new ways of shopping and adopted new consumption habits due to the lockdown. Comparing the second quarter of 2020 (amidst the pandemic) with the same period from the previous year highlights a doubling of e-commerce retail purchases for residents of the Madrid Central area (see Figure 8). It is important to note that this growth of e-commerce was not only due to an increase in shopping frequency by customers who already used the online channel, but also the emergence of new buyers who had previously been reluctant to make purchases through the Internet (ONTSI 2020). The necessity created by the limitations imposed forced these new customers to face that unknown barrier. All the signs seem to indicate that, once this obstacle has been overcome, most new customers will continue making purchases through the new channel.

This increase in e-commerce orders translated into a larger number of LCVs circulating through the city but, as a result of the reduced traffic, the number of parcels delivered in each route increased and less LCVs were required to absorb the increase (higher load optimization per LCV). Given the large number of couriers with a small market share, one alternative to consider would be the consolidation of these operators’ e-commerce parcels through a microhub located in the central district. This could be implemented via public (microhub) and private (logistics operators) collaboration.

In order to better compare the main magnitudes of the study, Figure 12 shows the variations in the periods analyzed.



**Figure 12.** Variation in the analyzed magnitudes.

Lastly, from a sustainability standpoint, it is important to highlight the increase in CO<sub>2</sub> caused by the growth of e-commerce for residents of the Madrid Central area. Comparing the second quarter of both years, emissions rose by 50%, a smaller increase than that experienced by the number of parcels. A greater decrease in emissions should be sought through the use of other, cleaner means for last-mile deliveries (bicycles, delivery on foot, electric vehicles, etc.) or else through greater productivity in the LCV kilometer/delivered parcel ratio. The option of incorporating a microhub to consolidate parcels would also lead to a reduction in CO<sub>2</sub> emissions.

With regard to congestion, the increase in e-commerce parcels has meant an increase in vans in the central district, but in a significantly lower proportion than the increase of online orders. This is explained by three main reasons: (i) the reduction in traffic intensity increases the number of parcels delivered through each route, (ii) transport operators with a lower market share are able to load more parcels into each vehicle and (iii) the greater the demand for parcels in a given delivery area, the greater the possibility of delivering multiple orders in each stop.

## 7. Conclusions and Future Perspectives

This study describes the impact of COVID-19 on traffic in the urban center of a large city. In addition, it quantifies the demand for e-commerce parcels by residents of an urban center and estimates the impact on LCV traffic, considering its environmental repercussions. The results, applied to the central district of a city like Madrid, seek to answer the questions posed in the introduction.

First and foremost, road traffic in the Madrid Central area was directly affected by the lockdown measures. During the period of the pandemic analyzed (Q2 2019), economic activity entered a state of hibernation and mobility was reduced to essential activities, which reduced traffic to approximately 35% of normal rates.

The exception was e-commerce, where transactions for physical goods increased by 98% during this period, in line with online retail shopping behavior in other EU countries and the US (Eurostat 2021; BCG Global 2020). The growth of e-commerce caused an increase in the number of vehicles dedicated to transporting e-commerce orders, albeit in a notably smaller proportion than the increase in demand. Courier companies have found themselves in an ideal scenario with increased demand and empty streets, enabling them to make deliveries with very few limitations.

In this exceptional context, it would not be reasonable to apply public intervention measures, as these generally focus on decreasing traffic congestion and vehicle emissions under circumstances of traffic saturation, a situation which did not take place. CO<sub>2</sub> emissions related to e-commerce last-mile increased 43.1% during the pandemic period,

but this increase in CO<sub>2</sub> is no relevant if we consider the global reduction of all pollutant emissions in cities due the reduction in traffic and other activities. Average NO<sub>2</sub> levels during the week of 16–22 March went down by 41% in Madrid, 51% in Lisbon, 55% in Barcelona, 21% in Milan and 26–35% in Rome (Cheval et al. 2020). Therefore, environmental measures could focus on using innovative technologies: IoT (Internet of Things), big data, parcel lockers, electric vehicles, route optimization algorithms, collaboration among couriers and the use of urban distribution centers (Taniguchi et al. 2020).

Will the world after COVID-19 bring a new normality or a new reality? It is undeniable that, once the pandemic is over, the world will be substantially different in multiple aspects. Two such examples are those studied in this research: urban mobility and an increase in e-commerce. In this new, uncertain scenario, it will be essential to adopt measures that stakeholders can agree upon, in order to improve urban distribution in large cities from a sustainable perspective. Focusing on the environmental perspective, the increase in courier activities, added to the new consumption and mobility trends, highlight the need to promote improvements in the current models for urban transport and distribution of goods, including: public-private collaboration for retailers and for transport and logistics operators, environmentally friendly vehicles for city dwellers and raising e-commerce customer awareness and regulation (Russo and Comi 2020).

Inevitably, the study has several limitations, which provide valuable paths for future research. First, it would be relevant to have a complete picture of citizen mobility during the pandemic, that is, to know the exact percentage who used public transport, how many used their private vehicles and how many chose to move around on foot or by bicycle. This would provide an understanding of the transfers that took place between different modes of transportation. Obtaining this information for the post-Covid period could be very useful in defining better urban mobility and logistics policies in the future. Another essential element would be calculating the exact percentage of vehicles employed in urban logistics versus total traffic. Understanding this information and knowing delivery schedules would contribute to more efficient and sustainable proposals for urban logistics and traffic in big cities. Furthermore, it would be valuable to study how other modes of delivery (smart lockers, collection points, etc.) may contribute to improve economic aspects for couriers and social and environmental aspects for the city.

Lastly, this study could be extended from the perspective of city logistics operators, examining specific initiatives to improve urban distribution of goods in the context analyzed. Likewise, it would be useful to extend this study to evaluate the economic, social and environmental impact of the pandemic on both road traffic in general and urban distribution of goods in particular. Moreover, this analysis requires more detailed studies considering the new post-Covid reality, where mobility in the city will be different and new consumer habits will require more resilient and efficient urban logistics. These aspects will be developed in future research.

**Author Contributions:** All authors contributed equally to the data preparation and the analysis and to the interpretation of results. All authors made major contributions to writing the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Data related to E-commerce transactions can be found in CNMC database at <http://data.cnmc.es/datagraph/>. Data related to traffic measurement can be found in Madrid city council data at <https://datos.madrid.es/portal/site/egob>. Data for the calculation of the variables in E-commerce parcels demand can be found in ONTSI at <https://www.ontsi.red.es/es/ontsi-data>.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

### Appendix A

- Productivity of LVCs in Madrid: 80–125 parcels/day
- Kms driven by LCVs in Madrid: 70–125 kms/day
- Emissions per van: 180–250 g CO<sub>2</sub>/km

The values considered in the case of the Madrid Central area are as follows:

Operational Aspect	Traffic: Dense Loading/Unloading: Difficult (Pre-Covid Period)	Traffic: Fluid Loading/Unloading: Easy (Covid Period)
Productivity LVCs/day	80	125
Kms driven LVCs/day	72	90
Emissions per LCV	250 g CO <sub>2</sub> /km	

Interval of 80–125 parcels/LCV considers traffic intensity (Deloitte 2020; International Post Corporation 2018; DPDgroup 2019).

### References

- Allen, Julian, Stephen Anderson, Michael Browne, and Peter Jones. 2000. A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows. In *Transport Studies Group*. London: University of Westminster.
- ANFAC. 2019. Annual Report 2018. Available online: <https://anfac.com/wp-content/uploads/2019/07/ANFAC-Annual-Report-2018.pdf> (accessed on 10 January 2021).
- Área de Gobierno de Medioambiente y Movilidad. 2019. Madrid 360: Avance de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental. Available online: <https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMedios/noticias/2019/09%20septiembre/30Lunes/Notasprensa/Presentaci%C3%B3n%20Madrid%20360/ficheros/Avance-Estrategia-Sostenibilidad-Ambiental-Madrid-360.pdf> (accessed on 25 January 2021).
- BCG Global. 2020. Can Delivery Companies Keep Up with the E-Commerce Boom? Available online: <https://www.bcg.com/publications/2020/can-delivery-companies-keep-up-with-the-ecommerce-boom> (accessed on 31 March 2021).
- Browne, Michael, Julian Allen, Toshinori Nemoto, Daniele Patier, and Johan Visser. 2012. Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities. *Procedia—Social and Behavioral Sciences* 39: 19–33. [CrossRef]
- Budd, Lucy, and Stephen Ison. 2020. Responsible Transport: A post-COVID agenda for transport policy and practice. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 6. [CrossRef]
- Cardenas, Ivan, Yari Borbon-Galvez, Thomas Verlinden, Eddy Van de Voorde, Thierry Vanelslander, and Wouter Dewulf. 2017. City Logistics, Urban Goods Distribution and Last Mile Delivery and Collection. *Competition and Regulation in Network Industries* 18: 22–43. [CrossRef]
- Cattaruzza, Diego, Nabil Absi, Dominique Feillet, and Jesús González-Feliu. 2017. Vehicle Routing Problems for City Logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics* 6: 51–79. [CrossRef]
- Cheval, Sorin, Cristian Mihai Adamescu, Teodoro Georgiadis, Mathew Herrnegger, Adrian Piticar, and y David R. Legates. 2020. Observed and Potential Impacts of the COVID-19 Pandemic on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 4140. [CrossRef] [PubMed]
- CIVITAS. 2015. Smart Choices for Cities Making Urban Freight Logistics More Sustainable. Available online: [https://civitas.eu/sites/default/files/civ\\_pol-an5\\_urban\\_web.pdf](https://civitas.eu/sites/default/files/civ_pol-an5_urban_web.pdf) (accessed on 15 February 2021).
- CNMC. 2019. Informe Anual Sobre la Evolución del Sector Postal en 2019. Available online: [https://www.cnmc.es/sites/default/files/3284892\\_13.pdf](https://www.cnmc.es/sites/default/files/3284892_13.pdf) (accessed on 30 March 2021).
- CNMC. 2020. CNMC Household Panel, 2019. Available online: <http://data.cnmc.es/datagraph/> (accessed on 15 January 2021).
- Crainic, Teodor Gabriel, Nicoletta Ricciardi, and Giovanni Storchi. 2004. Advanced Freight Transportation Systems for Congested Urban Areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 12: 119–37. [CrossRef]
- Dablanc, Laetitia. 2011. City Distribution, a Key Element of the Urban Economy: Guidelines for Practitioners. In *City Distribution and Urban Freight Transport*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, pp. 20–44.
- Dablanc, Laetitia, Eleonora Morganti, Niklas Arvidsson, Johan Woxenius, Michael Browne, and Neila Saidi. 2017. The rise of on-demand “instant deliveries” in European cities. *Supply Chain Forum: An International Journal* 18: 203–17. [CrossRef]
- Delivery Hero: Quick Commerce: Pioneering the Next Generation of Delivery. 2020. Available online: <https://www.deliveryhero.com/blog/quick-commerce/> (accessed on 15 January 2021).
- Deloitte. 2020. Logística de Última Milla. Retos y Soluciones en España. Available online: <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/operations/articles/logistica-de-ultima-milla.html> (accessed on 15 January 2021).
- Demir, Emrah, Yuan Huang, Sebastiaan Scholts, and Tom Van Woensel. 2015. A Selected Review on the Negative Externalities of the Freight Transportation: Modeling and Pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 77: 95–114. [CrossRef]

- DGT. 2020. Evolución de Tráfico Por el Efecto de COVID-19. Available online: [https://www.dgt.es/es/COVID-19/index\\_20200330/](https://www.dgt.es/es/COVID-19/index_20200330/) (accessed on 31 March 2021).
- DPDgroup. 2019. Driving Change. Corporate Social Responsibility. Available online: [https://www.dpd.com/group/wp-content/uploads/sites/77/2019/06/20190619\\_DPDgroup\\_CSR-report-2018\\_EN.pdf](https://www.dpd.com/group/wp-content/uploads/sites/77/2019/06/20190619_DPDgroup_CSR-report-2018_EN.pdf) (accessed on 18 January 2021).
- E-Commerce Europe. 2021. Impact of the Coronavirus on E-Commerce. Available online: <https://ecommerce-europe.eu/wp-content/uploads/2021/01/Coronavirus-Survey-Report-January-2021.pdf> (accessed on 23 March 2021).
- European Commission. 2020. Sustainable and Smart Mobility Strategy—Putting European Transport on Track for the Future. Available online: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF) (accessed on 20 January 2021).
- European Commission. 2021. Mobility and Transport: Clean transport, Urban Transport. Available online: [https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban\\_mobility\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility_en) (accessed on 20 January 2021).
- Eurostat. 2021. Online Shopping Ever More Popular in 2020. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210217-1> (accessed on 31 March 2021).
- Gatta, Valerio, and Edoardo Marcucci. 2014. Urban Freight Transport and Policy Changes: Improving Decision Makers' Awareness via an Agent-Specific Approach. *Transport Policy* 36: 248–52. [CrossRef]
- González-Feliu, Jesus, Christian Ambrosini, and Jean-Louis Routhier. 2012. New Trends on Urban Goods Movement: Modelling and Simulation of E-Commerce Distribution. Post-Print. HAL. Available online: <https://econpapers.repec.org/paper/haljourml/halshs-00626152.htm> (accessed on 15 January 2021).
- INE. 2020a. Población del Padrón Continuo por Unidad Poblacional a 1 de enero. Available online: <https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaDesdeHome&nombrePoblacion=Madrid> (accessed on 15 January 2021).
- INE. 2020b. Renta Por Persona y Unidad Consumo Por Comunidades Autónomas. Available online: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=9947> (accessed on 15 January 2021).
- INRIX. 2020. Global Traffic Scorecard. INRIX Research, March 2020. Available online: <https://inrix.com/scorecard/> (accessed on 15 January 2021).
- International Conference on City Logistics, Eiichi Taniguchi, and Russell G. Thompson, eds. 2004. *Logistics Systems for Sustainable Cities*. Amsterdam: Elsevier.
- International Post Corporation. 2018. Postal Sector Sustainability Report 2018. Available online: <https://www.ipc.be/sector-data/reports-library/ipc-reports-brochures/sr2018> (accessed on 25 March 2021).
- Ivanov, Dmitry. 2020. Predicting the Impacts of Epidemic Outbreaks on Global Supply Chains: A Simulation-Based Analysis on the Coronavirus Outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) Case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 136. [CrossRef] [PubMed]
- Khomenko, Sasha, Marta Cirach, Evelise Pereira-Barboza, Natalie Mueller, Jose Barrera-Gómez, David Rojas-Rueda, Kees de Hoogh, Gerard Hoek, and Mark Nieuwenhuijsen. 2021. Premature Mortality Due to Air Pollution in European Cities: A Health Impact Assessment. *The Lancet Planetary Health* 5: e121–e134. [CrossRef]
- Koch, Julia, Britta Frommeyer, and Gerhard Schewe. 2020. Online Shopping Motives during the COVID-19 Pandemic—Lessons from the Crisis. *Sustainability* 12: 10247. [CrossRef]
- Kotler, Philip, and Kevin Keller. 2012. *Dirección de Marketing. Place of Publication Not Identified*. London: Pearson Education.
- Lebeau, Philippe, and Cathy Macharis. 2014. Freight transport in Brussels and its impact on road traffic? *Brussels Studies*. [CrossRef]
- Linton, Tom, and Bindya Vakil. 2020. Coronavirus Is Proving We Need More Resilient Supply Chains. *Harvard Business Review*. Available online: <https://hbr.org/2020/03/coronavirus-is-proving-that-we-need-more-resilient-supply-chains> (accessed on 1 April 2021).
- Macharis, Cathy, and Bram Kin. 2017. The 4 A's of Sustainable City Distribution: Innovative Solutions and Challenges Ahead. *International Journal of Sustainable Transportation* 11: 59–71. [CrossRef]
- Macharis, Cathy, and Sandra Melo, eds. 2011. City distribution and urban freight transport: multiple perspectives. In *NECTAR Series on Transportation and Communications Networks Research*. Cheltenham and Northampton: Edward Elgar.
- Madrid City Council Environment and Mobility Office. 2019. Portal web del Ayuntamiento de Madrid. Inventario de Emisiones. Available online: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Medio-ambiente/Cambio-Climatico/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=0ca36936042fc310VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=4b3a171c30036010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&idCapitulo=6877178> (accessed on 20 January 2021).
- Madrid College of Economists. 2020. *Hacia una Nueva Movilidad en las Ciudades*. Junio de 2020/N°169. Madrid: Madrid College of Economists.
- Muñuzuri, Jesús, Juan Larrañeta, Luis Onieva, and Pablo Cortés. 2005. Solutions Applicable by Local Administrations for Urban Logistics Improvement. *Cities* 22: 15–28. [CrossRef]
- OECD. 2020a. E-Commerce in the Time of COVID-19. Available online: <http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/e-commerce-in-the-time-of-covid-19-3a2b78e8/#endnotea0z3> (accessed on 31 March 2021).
- OECD. 2020b. Connecting Businesses and Consumers during COVID-19: Trade in Parcels. OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19). Available online: <http://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/connecting-businesses-and-consumers-during-covid-19-trade-in-parcels-d18de131/> (accessed on 23 March 2021).

- ONTSI. 2020. El Comercio Electrónico B2C en España 2019 (Edición 2020). Available online: <https://www.ontsi.red.es/es/estudios-e-informes/Hogares-y-ciudadanos/El-Comercio-Electronico-B2C-en-Espana-2019-%28Edicion-2020%29> (accessed on 15 January 2021).
- Ranieri, Luigi, Salvatore Digiesi, Bartolomeo Silvestri, and Michele Roccotelli. 2018. A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision. *Sustainability* 10: 782. [CrossRef]
- Russo, Francesco, and Antonio Comi. 2011. A Model System for the Ex-Ante Assessment of City Logistics Measures. *Research in Transportation Economics* 31: 81–87. [CrossRef]
- Russo, Francesco, and Antonio Comi. 2020. Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability* 12: 1439. [CrossRef]
- Savelsbergh, Martin, and Tom Van Woensel. 2016. City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science* 50: 579–90. [CrossRef]
- Srinivas, S. Srivatsa, and Rahul R. Marathe. 2021. Moving towards “Mobile Warehouse”: Last-Mile Logistics during COVID-19 and Beyond. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 10. [CrossRef]
- Stathopoulos, Amanda, Eva Valeri, and Edoardo Marcucci. 2012. Stakeholder Reactions to Urban Freight Policy Innovation. *Journal of Transport Geography*, 34–45. [CrossRef]
- Statista. 2020a. COVID-19 Impact on Global Retail E-Commerce Site Traffic 2019–2020. Available online: <https://www.statista.com/statistics/1112595/COVID-19-impact-retail-e-commerce-site-traffic-global/> (accessed on 20 January 2021).
- Statista. 2020b. COVID-19: Traffic Reduction in Selected Cities Worldwide. Available online: <https://www.statista.com/statistics/1106135/change-in-daily-traffic-volume-amid-coronavirus-crisis-key-countries/> (accessed on 1 April 2021).
- Taniguchi, Eiichi, Russell G. Thompson, and y Ali G. Qureshi. 2020. Modelling City Logistics Using Recent Innovative Technologies. *Transportation Research Procedia*, 3–12. [CrossRef]
- Viu-Roig, Marta, and Eduard Alvarez-Palau. 2020. The Impact of E-Commerce-Related Last-Mile Logistics on Cities: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 12: 6492. [CrossRef]
- We Are Social and Hootsuite. 2021. Digital 2020. Global Digital Overview. Available online: <https://wearesocial.com/digital-2020> (accessed on 15 January 2021).

## Anexo I.II. A Metro-Based System as Sustainable Alternative for Urban Logistics in the Era of E-Commerce



Article

### A Metro-Based System as Sustainable Alternative for Urban Logistics in the Era of E-Commerce

Rafael Villa <sup>1,\*</sup> and Andrés Monzón <sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Technology and Science, Camilo José Cela University, 28692 Madrid, Spain

<sup>2</sup> Transport Research Centre (TRANSyT), Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; andres.monzon@upm.es

\* Correspondence: rvilla@ucjc.edu

**Abstract:** Business to consumer e-commerce (B2C) has increased sharply in recent years driven by a growing online population and changes in consumer behavior. In metropolitan areas, the “Amazon effect” (online retailers’ vast selection, fast shipping, free returns, and low prices) has led to an increased use of light goods vehicles. This is affecting the rational functioning of the transport system, including a high degree of fragmentation, low load optimization, and, among other externalities, higher traffic congestion. This paper investigates the potential of a metro system, in a big city like Madrid, to provide delivery services by leveraging its existing carrying capacity and using the metro stations to collect parcels in lockers. It would be a new mixed distribution model for last-mile deliveries associated with e-commerce. To that end, the paper evaluates the cost and impacts of two alternative scenarios for managing the unused space in rolling stock (shared trains) or specific full train services (dedicated trains) on existing lines. The external costs of the proposed scenarios are compared with current e-commerce delivery scenario (parcel delivery by road). The results show that underground transport of parcels could significantly reduce congestion costs, accidents, noise, GHG emissions, and air pollution.

**Keywords:** city logistics; last-mile innovation; urban rail freight; sustainable development; e-commerce; externality



**Citation:** Villa, R.; Monzón, A. A Metro-Based System as Sustainable Alternative for Urban Logistics in the Era of E-Commerce. *Sustainability* **2021**, *13*, 4479. <https://doi.org/10.3390/su13084479>

Academic Editors: Maja Kiba-Janiak, Michael Browne, Russell Thompson, Leise de Oliveira and Pietro Evangelista

Received: 25 February 2021  
Accepted: 14 April 2021  
Published: 16 April 2021

**Publisher’s Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

#### 1. Introduction

Cities are cornerstones of human life. According to the UN (2018), 55% of the world’s population is currently living in cities and the percentage of urbanization will increase up to two-thirds of the global population by 2030 [1]. In parallel, the past decade has seen a notable increase in Internet usage, as it has gradually become one of the key instruments for societal and urban change. In the case of the EU-28, in 2018 the level of urbanization reached 74% of the population and the proportion of homes with Internet access rose to 89%, about 29 percentage points more than in 2008 [2]. In this regard, urban logistics presents a dichotomy. On the one hand, it plays a key role in the economic development of cities and it is essential for providing services to their citizens, contributing to wealth-generating activities and the competitiveness of industry. However, on the other hand, urban freight transport also generates negative social and environmental impacts [3] in cities. At present, the transport sector is responsible for 32% of CO<sub>2</sub> emissions in the European Union [4]. Of these, 44% were from passenger cars, 9% from light commercial vehicles, and 19% from heavy-duty vehicles [5]. The freight share is rather unbalanced due most goods being transported by road. In the 28 countries of the European Union, 76.7% of the internal Ton-km was transported by road [2]. In the case of Spain, this percentage reached 95.1% in 2017. Moreover, urban distribution of goods is responsible for approximately one-fourth of road traffic in a typical city [6] and, in addition, involves other activities requiring the use of urban spaces: Loading–unloading, storage, etc. The European Union, through its European Green Deal, has presented an ambitious set of

measures culminating in a proposal for a climate-neutral EU by 2050. With regards to urban goods transport, ALICE (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe) has defined a roadmap to mitigate the environmental impact of urban freight, focused on reducing emissions through specific action plans [7]. Urban railway logistics is considered difficult to implement for several reasons: (i) The distances travelled by urban transport rail services are short and do not appear viable without considerable financial and organizational support during the project's development phase [8]; (ii) the volume transported by each individual logistics operator is not sufficiently large, thus requiring the aggregate demand of several operators in order to reach the necessary volume to achieve financial viability [9], and (iii) there is a significant operational limitation on door-to-door delivery, as this requires other complementary modes of transport in order to have the goods reach customers' homes.

This research specifically addresses new options for e-commerce goods delivery in cities, by using the metro underground public transport system. In particular, the research has the following goals:

- What level of parcel demand would justify the use of a metro network as an urban logistics operator?
- How would the infrastructure and trains have to be adapted to implement this model?
- What are the economic, social and environmental benefits derived from using metro to distribute parcels in the city center?

To that end, a daily e-commerce demand model is built based on the chain-ratio method. A new urban last-mile delivery mixed system (truck + metro) is defined. The operating and external costs of this distribution system are calculated and compared with the current costs of e-commerce delivery by Light Duty Vehicles (LDV).

The remainder of this document is structured as follows: Section 2 describes the literature review and Section 3 shows the materials and methods used in the design of parcels distribution system using the metro network. Section 4 presents the study case, Section 5 shows the results, and, lastly, Sections 6 and 7 present the discussion, the conclusions, and possible areas for further research.

## 2. Literature Review

### 2.1. E-Commerce and the Key Role of Delivery

Massive Internet adoption in recent years has boosted the role of e-commerce as a distribution channel, providing consumers the opportunity to choose among a large selection of products, compare prices, select retailers, communicate with sellers, and personalize necessary products through their connected devices. This continued growth of e-commerce throughout the world has accelerated in 2021, as Covid-19 has re-written the rules of the retail sector. Between January 2019 and June 2020, retail platforms experienced an extraordinary increase in global traffic. The websites of retail businesses received nearly 22 billion visits in June 2020, a 35.5% increase year-on-year [10]. Amidst this unstoppable rise of in e-commerce, while electronic transactions travel through digital networks, the physical products being acquired must still be transported and delivered to end consumers. More people living in cities and simpler transactions for consumers require a higher frequency of deliveries [11,12]. The inefficiency of the urban distribution is due to several factors: Smaller volumes, more delivery addresses, higher replenishment frequencies, tight delivery schedules, lower inventory levels, low load factors of delivery vehicles, and just-in-time deliveries [13]. In addition, home delivery includes other options such as same-day delivery, creating additional problems due to failed deliveries and returned orders. Road dependence and the impact of deliveries on cities are becoming important.

E-shoppers and retailers are currently concerned about delivery problems and costs. Therefore, delivery plays a critical role in improving e-commerce. Current e-commerce delivery services must have a convincing value proposition because consumers have developed a "multitude of new demands." According to various studies, there are multiple critical factors associated with the successful delivery of e-commerce goods. The main ones

are cost, choice alternatives, speed, convenience, and returns [14–18]. With regard to the choice alternatives of e-commerce deliveries for end consumers (B2C), Table 1 compares the characteristics of various existing alternatives. Two new delivery options are added to the classification established by the BESTUFS project [19]: On-Demand Delivery and BOPIS (Buy Online, Pickup In Store).

**Table 1.** Delivery alternatives in B2C (adapted from [19]).

	Attended Delivery	On-Demand Delivery	Reception Box/Delivery Box	Control Access System	Locker Bank	Collection Point	BOPIS
Who covers the last mile?	Delivery Company	Delivery Company	Delivery Company	Delivery Company	Customer	Customer	Customer
Customer present?	Yes	Yes	No	No	No	No	No
Types of products	Any	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages, groceries	Packages	Any
Failed deliveries	High	Low	none	none	none	none	none
Delivery window	Fixed delivery hours	Fixed delivery hours	Delivery company operation hours	Delivery company operation hours	Delivery company operation hours	CP opening times	Store opening times
Times at which goods can be collected	Not appropriate	Not appropriate	24 h	24 h	24 h	CP opening times	Store opening times
Retrieval time for customer	None	None	Very short	Very short	Short-Long	Short-Long	Short-Long
Drop-off time	Long	Long	Short	Short	Very short	Very short	Short
Initial investment	Low	Low	High—Medium	Medium	Medium	Low- Medium	Low
Delivery Costs	High	High	Low	Low	Lowest	Lowest	Lowest
Possible operational problems	High failed deliveries	High failed deliveries	Large number of boxes needed	Need for suitable delivery location	Customer has to travel to collect	Customer has to travel to collect	Customer has to travel to collect, waiting time

## 2.2. Rail-Based Experiences: E-Commerce Goods Distribution through Tram and Metro

In urban logistics, increasing the use of other modes of transport than road is better for the environment and reduces the use of urban space. CO<sub>2</sub> emissions per ton-kilometer of railways and inland waterways are approximately 3.5 and 5.0 times lower than those of road freight transport [20]. Four European cities: Dresden, Germany (CarGoTram, 2001), Zurich, Switzerland (Zürich Cargo-Tram, 2003), Vienna, Austria (GüterBim, 2005), and Amsterdam, The Netherlands (City Cargo, 2007) have run pilot tests using trams to transport goods. Out of these four, only one is still in operation. CarGoTram started running in 2001 in Dresden and have delivered replacement parts to the Volkswagen plant until January 2021. After this date, the end of production of the VW e-Golf and the design of a new logistics concept has resulted that trams were no longer necessary. Zurich Cargo-Tram is used for garbage collection and runs several times a month, each time from a different pick-up point. The barriers identified in both Amsterdam and Vienna were linked to the initial investment required, lack of support from Public Administrations, involvement and collaboration of different stakeholders, and operational difficulties [21–23]. Although the use of existing underground public transport systems to deliver goods is considered a promising and sustainable solution, there are few research studies that address urban distribution through the metro network [22,24–30]. These scientific papers consider the potential use of metro as a cargo carrier from organization and optimization perspectives, requiring tailored studies, investment to transform metro network facilities, and public commitment. In order for an urban transport system, such as metro, to become a real alternative for the distribution of e-commerce goods in metropolitan areas, research studies require a more in-depth analysis of the economic and technical feasibility and a more precise quantification of the social and environmental costs of the proposed solution. Within large cities, the potential use of underground transport systems (metro) for the urban distribution of e-commerce

goods and the use of its excess capacity will depend on three main aspects: (i) Reducing operating costs, (ii) meeting delivery deadlines and improving customer service for urban demand [31], and (iii) reducing current externalities.

### 3. Materials and Methods

The method of e-commerce demand estimation, the design of the physical parcel distribution system linked to a Metro Transport Network, and the calculation of the operational and external costs are shown in Figure 1. It is important to note that the calculations of e-commerce demand are based on data from official government sources.

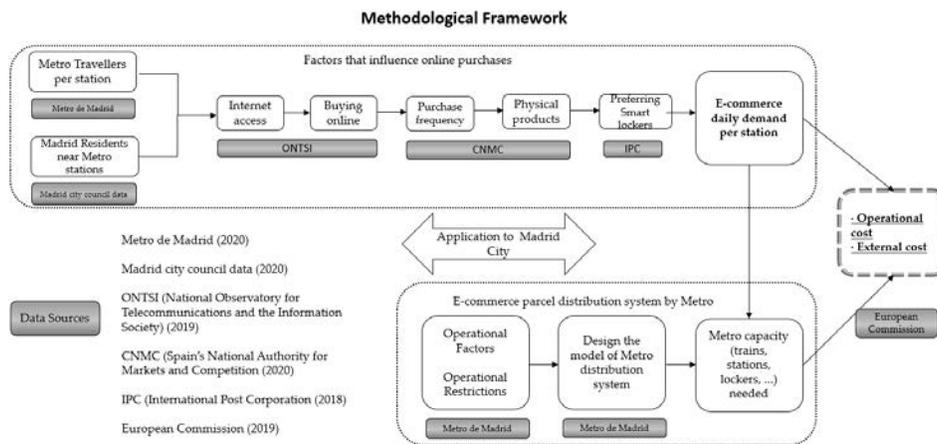


Figure 1. Methodological framework.

#### 3.1. Demand for Logistics Distribution by Metro

Online buyers have numerous options when deciding which products to buy, where to acquire them, and when to make their purchases. In the same way, when we talk about e-commerce parcel delivery, customers expect to be offered several alternatives. A company offering a high value service in e-commerce deliveries (or perceived thus by a customer), increases customer satisfaction during the purchase process in general and, in addition, gains a direct effect in loyalty and engagement, which will eventually generate more consumption and, by extension, will increase the company's revenue [32]. Therefore, the way in which physical delivery is materialized will condition demand in e-commerce.

Daily demand of e-commerce orders has two components:

##### 1. Metro travelers

There is a potential synergy between urban railway transport of people and goods in large cities. A metro user can be a traveler and an e-commerce customer at the same time, so they may collect an order they placed online when entering or leaving a station. This combined demand is calculated by determining which share of the metro travelers could be potential e-commerce shoppers, and who may collect their orders at stations. We consider smart lockers as the most viable option, as they provide the best advantages within the various types of unattended delivery (see Table 1). The calculation of this potential daily demand of e-commerce orders by Metro travelers is built based on the chain-ratio method [33], which consists of multiplying a baseline figure by a series of percentages until the target demand is reached.

The formulation would be as follows:

Daily demand for e-commerce parcels by Metro traveler (Dtrav)

$$(D_{trav}) = A \times P1 \times P2 \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (1)$$

where: A = daily Metro trips by station; P1 = average% of different Metro travelers by station; P2 = average% of people who travel by Metro > x years per station; P3 = average% of people > x years using the Internet; P4 = average% of people > x years using the Internet and buying online; P5 = average% of people > x years using the Internet and buying online daily; P6 = average% of people > x years using the Internet and buying online daily, physical products that could fit into a locker; P7 = average% of people > x years using Internet and buying online daily, physical products that could fit into a locker, and preferring lockers as a method of delivery

## 2. Residents living nearby metro stations

The privileged location of all metro stations in large cities (in terms of distance and accessibility) provides a competitive advantage when determining the possible points of delivery for e-commerce parcels. These are very convenient, clearly identified, and accessible locations for the residents of those neighbourhoods.

Similarly to the case of metro travelers, it is possible to calculate the potential daily demand for e-commerce deliveries by people living within the catchment area of a metro station (considering as such the neighborhood where a given resident lives) who may collect the delivery at a smart parcel locker.

In this case, the formulation would be:

Daily demand for e-commerce parcels by residents (Dres)

$$(D_{res}) = Y \times P3 \times P4 \times P5 \times P6 \times P7 \quad (2)$$

where: Y = residents > x years living in the area of influence of a metro station and do not use metro regularly.

The total demand for e-commerce deliveries by station would be the sum of both concepts:  
Daily demand for e-commerce deliveries by station

$$(DT) = D_{trav} + D_{res} \quad (3)$$

Being able to determine the level of demand for e-commerce deliveries is essential in order to adjust the supply of logistics services using metro transport infrastructures.

### 3.2. Capacity of Metro Network and Operational Factors

The calculation of the supply of e-commerce logistics services by metro stations (for residents and travelers) will be conditioned both by aspects linked to the demand for deliveries at each of those stations, and by operational logistics factors. As shown in Table 2, these operational factors (including capital expenditures and operating expenses) will determine the shipping cost per parcel through the metro system.

Table 2. Operational factors in the proposed model.

	Definition	Characteristics	Value Adopted
Type of train 	Based on the lines with the highest parcel demand, the type of train (series) rolling on them will be different. Each of these trains has a specific internal carriage design and, therefore, a different parcel transport capacity.	Internal capacity +++ (by carriage)	12–16 large roll containers
		Internal capacity + (by carriage)	12–18 medium roll containers
Size of container 	Due to their ease of use and capacity, roll containers are used as the means to transport parcels in trains. The most appropriate size of roll container is selected based on the internal capacity of the train.	Large roll container	1.2 × 0.8 × 1.8 (40 parcels)
		Medium roll container	0.8 × 0.7 × 1.8 (25 parcels)
Train operation 	Shared trains: trains do not change their current travelers transport frequency and a part of the train is used to provide logistics services. Dedicated trains: trains are only used to transport parcels. These trains are not available for travelers and have a different schedule.	Shared train	Transport conducted early (prior loading at depot)
		Dedicated train	Transport conducted late (off-peak times)
Time to unload containers at station 	Time required to unload roll containers at each station	Shared train	=to stop time for traveler transport
		Dedicated train	Based on number of roll containers
Size of parcels and size of lockers 	Various parcel sizes are considered (The parcel lockers have been designed in such a way that 96% of all parcels intended to be sent to a parcel locker will fit in them (Van Duin et al., 2019). This enables, 1 order = 1 parcel, so as to include several products in the same parcel or consider various combinations based on the necessary m3 Medium-sized lockers = 40 parcels Large-sized lockers = 80 parcels	Small parcel	LWH = (0.09, 0.34, 0.3)
		Medium parcel	LWH = (0.2, 0.4, 0.3)
		Large parcel	LWH = (0.4, 0.4, 0.4)
		Special parcel	LWH = (0.6, 0.6, 0.3)

### 3.3. External Costs

According to the European Commission [34]: “external costs, also known as externalities, arise when the social or economic activities of one (group of) person(s) have an impact on another (group of) person(s) and when that impact is not fully accounted, or compensated for, by the first (group of) person(s)”. Decision makers have the responsibility to “internalize” external cost when organizing access and pricing policies to use the transport network. By applying the methodology developed in the handbook of external costs of transport [34], it is possible to define and quantify the following external costs (see Table 3):

**Table 3.** External costs: Variables affecting the type of cost and definition.

External Costs	Type of External Cost	Variables Affecting the Type of Cost	Definition
I: Social	Congestion cost $C_c$	$C_c = f(D, T, M, P)$	Loss of time suffered by an individual which arises when an additional vehicle reduces the speed of other vehicles in the flow of traffic, increasing travel time.
	Accident cost $C_a$	$C_a = f(D, M, P)$	Considers not just material costs (administrative costs, material damage to other vehicles and infrastructures, etc.), but also the immaterial costs (pain and suffering caused to others, etc.).
II: Environmental	Noise cost $C_n$	$C_n = f(D, M, T, P, H)$	Transport systems are a source of noise. Noise can be defined as unwanted sounds of varying duration, intensity or other quality that causes physical or psychological harm to humans.
	Air pollution cost $C_{ap}$	$C_{ap} = f(D, M, P, F, S, E)$	Engines driving transport emit certain contaminants (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, . . . ) into the atmosphere. Considers both the effects those air pollutants produce on health and other kinds of damage, such as material and construction damage, etc.

where: D (km): The distance travelled to deliver electronic commerce packages by a specific mode of transportation. M: Mode of transportation (Light Duty Vehicles, High Duty Vehicles, Metro). T: Level of traffic (over capacity, congested, near capacity, dense, thin, etc.). P: Area of coverage of parcel transport (urban area, inter-urban area, etc.). H: Time of the Day. F: Fuel type. S: Vehicle size. E: Emission class.

The monetary quantification of the externalities of the model for distribution of e-commerce parcels through the underground public transport system considers the following aggregate costs:

$$TEC = SC + EC \quad (4)$$

with:

$$SC = C_c + C_a \quad (5)$$

$$EC = C_n + C_{ap} + C_{cc} \quad (6)$$

where: TEC = Total External Cost, SC = Social Cost, EC = Environmental Cost.

#### 4. Case Study

The following section describes the application of the proposed mixed last-mile delivery system for e-commerce goods in the city of Madrid. This new form of urban distribution is carried out through the Madrid Metro underground public transport system.

##### 4.1. Background

Urban distribution is essential for the activity and development of any city, and Madrid is no exception. Due to its terrain and the historical evolution of its urban structure, distribution within the city of Madrid is one of the most complicated among large European cities. The city, an essential driver of Spain's economy that accounts for 12% of national GDP, is divided into 21 districts with a total population of 3.3 million [35] and has a total area of 60,436.7 hectares, with an average population density of 54 inhabitants per hectare.

At present, there are two main types of problems associated to urban distribution in the city of Madrid [36]:

- Urban infrastructure:
  - There is no planning of distribution points at the urban level.
  - Problems with the use of parking and loading/unloading areas.
  - Significant growth of e-commerce deliveries at private homes.
- Management:

- There is no model for the management of distribution logistics that adequately identifies and organizes the numerous agents and operations for each urban distribution channel.
- Growth of e-commerce and new delivery models.
- Inefficient use of loading/unloading activities and reserved spaces.

According to Madrid City Council, urban road transport accounted for 22.6% of total GHG emissions [37]. During the period between January and June 2019, 13,000–16,000 LDV (Light Duty Vehicles) accessed the Central Madrid low-emission zone established in 2018 (472 hectares) during working days. Madrid's car fleet stands out due to its high percentage of diesel vehicles, with an average age of 9.3 years, and the motorization rate is 383 [38].

On the other hand, the Madrid Metro system is the largest in Spain, with 12 lines totaling 294 kilometers inside the city, and additional branches connecting 12 municipalities in the suburbs. It has the highest share among public transport modes in the region of Madrid. During the winter season, over 2.3 million travelers use the underground each working day (pre-Covid-19). Commuting to work and educational institutions accounts for 70% of total weekday travel [39].

#### 4.2. Description of the Mixed Delivery Model

The activities carried out in the current e-commerce distribution model and in the proposed mixed model are detailed in Figure 2. The reference scenario, considering the current delivery model, includes the following sequential activities:

- (1) A resident of a neighborhood in Madrid makes an online purchase and selects the option for home delivery.
- (2) The order is processed and prepared at the e-fulfilment center.
- (3) Several delivery options are offered to the customer:
  - a. A Heavy-Duty Vehicle (HDV) from the fulfilment center to a local depot or delivery center. The order is subsequently classified and delivered to the customer's home by an LDV.
  - b. The LDV starts at the fulfilment center and delivers directly to the customer's home address. This is the option considered in the present study.

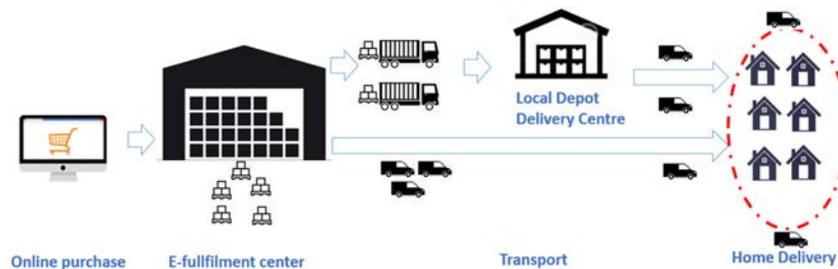


Figure 2. Online order delivery model: Current practice.

The existing delivery model is modified to incorporate metro services within the logistics distribution. Therefore, the proposed model using urban rail distribution, the activities would be as follows (see Figure 3):

- (1) A Madrid neighborhood resident or metro traveler makes an online purchase and selects the option for delivery to a smart locker in a station.
- (2) The order is processed and prepared at the e-fulfilment center. Roll containers are prepared by station.

- (3) Transport to the metro depot by an HDV from the e-fulfilment center to the selected Metro depot, in order to be loaded on the trains.
- (4) Transport from the metro depot to the smart locker: Trains are used to transport the orders to smart lockers located at the stations. The traveler or resident collects the order from the locker.



Figure 3. Online order and Metro-based urban delivery model.

The modes of transport used are HDV from the fulfilment center to the Metro depot and trains (see an example in Figure 4) from the depot to the smart locker.

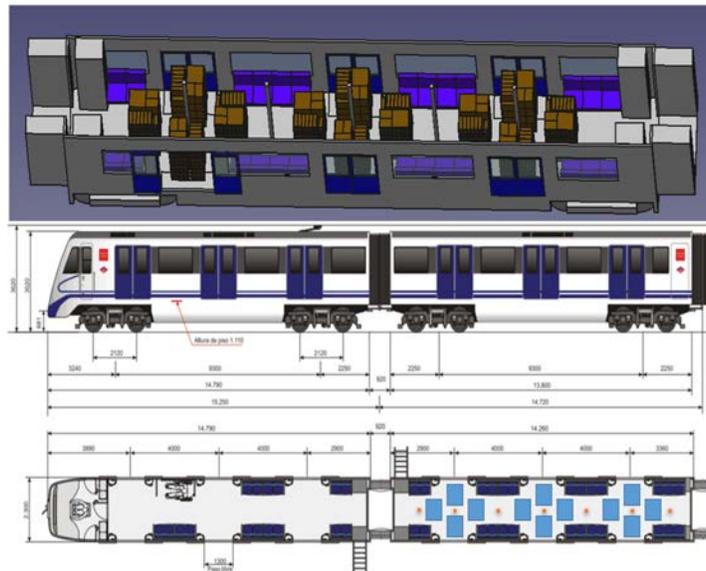


Figure 4. Example of series 3000 trains loaded with roll containers.

The calculation of external costs in each e-commerce parcel delivery model depends on the mode of transport used for each stage (LDV, HDV, or train). These methods of transportation are conditioned by the demand for parcels (both from travelers and residents) for each selected station.

## 5. Results

### 5.1. Calculation of Parcel Demand by Metro Line

Table 4 shows the total potential daily demand for e-commerce parcels by metro line. It includes the demand from travelers and residents, calculated following the proposed methodology. The amount and distribution of parcels, considering operational factors, enables calculation of roll container requirements and the stations where smart lockers should be installed. Demand is differentiated based on whether stations have elevators or not, an aspect that determines the logistics operation at each station:

**Table 4.** Number of parcels, roll containers, and parcel lockers per metro line.

	Parcels per Day		Roll Containers Used per Day to Transport Parcels		Metro Stations with Lockers Used Daily	
	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2
Line 1	1944	1175	62	38	33	20
Line 2	986	596	47	27	20	11
Line 3	1191	1191	50	50	19	18
Line 4	1153	530	56	25	23	10
Line 5	1756	592	55	19	32	11
Line 6	1875	1187	53	34	28	17
Line 7	1138	783	41	28	24	16
Line 9	1175	485	39	17	24	10
Line 10	1242	854	42	28	22	15
Total best 3	5575	3553	170	122	93	55
Net total b3	5249	3083	155	104	88	49

DT1: total demand of e-commerce parcels/day requested by metro commuters and nearby residents on each line (all stations).

DT2: total demand of e-commerce parcels/day requested by metro commuters and nearby residents on each line (only stations with elevator).

The demand has been calculated only for stations located within the city of Madrid, excluding Metro stations in the suburbs. Likewise, lines 8 and 11 were also excluded due to their limited extension. It is worth noting that, in this model, each station may absorb a maximum daily demand of 80 packages, due to the size of the lockers considered. In case the number of daily parcels per station is low (<25), it may be reasonable not to deliver every day and wait for a minimum volume. Due to operational efficiency issues, only the three lines with highest demand have been selected (Total best 3). Since some stations are shared by several lines (e.g., Gran Via station is part of Lines 1 and 5), duplicates have been eliminated, in order to have single values (Net total b3).

As an example, Figure 5 shows the number of parcels per station for Line 6 (1875 parcels) for DT1. Distribution to all stations is carried out from the depot located at Laguna station.

### 5.2. Different Alternatives in the Mixed Distribution Model

As shown in Table 5, we can distinguish two different alternatives of mixed models, based on the mode of metro train usage to transport goods (shared or dedicated trains). Alternative 0 is home delivery, i.e., the current situation for a given demand of e-commerce parcels.

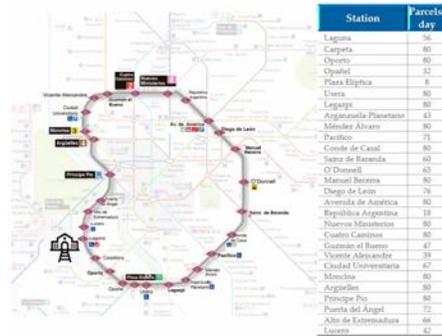


Figure 5. Line 6 (number of e-commerce parcels per station).

Table 5. Alternatives of the model.

Alternative	Characteristics	Mode of Transportation	Place of Delivery
Reference Scenario (A0)	Current e-commerce parcel delivery	LDV	Home
Alternative 1 (A1)	Use of shared trains for the delivery of parcels to the stations in the metro lines with highest demand	HDV + shared trains	Station (parcel locker)
Alternative 2 (A2)	Use of dedicated trains for the delivery of parcels to the stations in the metro lines with highest demand	HDV + dedicated trains	Station (parcel locker)

### 5.3. Coefficients Based on Interviews with Experts and Literature (Reference and New Scenarios)

The productivity of delivery varies considerably depending on the area where it is completed. An urban area is characterized by significant efficiency gains, the higher the population density in a specific area, the more parcels can be delivered in less kilometers. Various studies have estimated the average number of kilometers and parcels that a courier can deliver during a 7.5–8 h working day:

- UK [40]: Estimated that a courier can deliver 120 parcels in an 80 km route.
- Poland [41]: Estimated that a courier can deliver 60 parcels in a 150 km route.
- Brussels [42]: A courier can deliver 85 parcels in a 70 km route.

It is also necessary to consider the first time hit rate (the percentage of how many first delivery attempts to a consignee are successful on average) [43], which stands at 18–30% [44–46].

Data validation of the current scenario: Personal interviews were conducted with four experts (the experts' names have been omitted for confidentiality reasons) from the main e-commerce logistics operators working in Madrid (February 2020). The range was established at 60–90 packages transported by a standard courier. Regarding the weight transported, the group of experts consulted considered an average weight of between 1.5 and 3 kg per parcel. Thus, the model considers a value of 2 kg, following data from an International Post Corporation survey [47].

Based on the literature and expert opinions, the following coefficients are considered:

- T (working day) = 8 h.
- Dt (distance travelled) = 90 km.
- Pr (packages on route) = 75.
- FTHR (rate of returns) = 20%.
- Pd (packages delivered) = 60.

- Parcel weight = 2 kg.
- Distance from e-fulfilment center to depot = 25 km.
- Roll container weight = 15 kg.
- Truck load optimization from the e-fulfilment center to the Metro depot: >80% ( $\geq 22$  large or  $\geq 35$  medium roll containers).

#### 5.4. Calculation of the Main Indicators for the Alternatives of the Model

Table 6 summarizes the main indicators for all the alternatives:

**Table 6.** Main indicators for the various alternatives.

	DT1: All Stations on the Line			DT2: Only Stations with Elevators		
	Courier (A0)	Shared trains (A1)	Dedicated trains (A2)	Courier A(0)	Shared trains (A1)	Dedicated trains (A2)
Operational Cost (€) per parcel	1.97	1.69	1.75	1.97	1.92	2.01
CO <sub>2</sub> emission (road) tons per annum	329.97		70.02	193.77		52.51
Annual fuel consumption liters	113,715		22,908	66,776		17,181
Kilometres/day (road)	7874		400	4624		300
Parcels/day		5249			3083	

#### 5.5. Calculation of External Costs

This section details the daily external costs of the various alternatives analyzed (see Table 7). The calculation distinguishes two options, based on the number of stations to deliver e-commerce parcels, depending on whether or not the station has an elevator.

**Table 7.** External cost for the different volumes of e-commerce demand.

External Cost	Mode	DT1: All Stations on the Line			DT2: Only Stations on the Line with Elevator			
		Courier (A0)	Shared trains (A1)	Dedicated trains (A2)	Courier (A0)	Shared trains (A1)	Dedicated trains (A2)	
Environmental	Noise Cn	LDV	133.86			78.60		
		HDV Rigid 20–26 t Euro IV (Euro IV: European Union emission standard regulations for vehicles)		41.14	41.14		19.00	19.00
		Metro						
	Air pollution cost Cap	LDV Euro 4 Diesel	329.92			193.74		
		HDV Rigid 20–26 t Euro IV		55.38	55.38		25.58	25.58
		Metro			22.34			14.04
	Climate change cost Ccc	LDV Euro 4 Diesel	203.15			119.29		
		HDV Rigid 20–26 t Euro IV		34.81	34.81		16.08	16.08
		Metro			23.94			21.06
	Total Environmental (€/day)		<b>666.93</b>	<b>131.33</b>	<b>177.61</b>	<b>391.63</b>	<b>60.66</b>	<b>95.76</b>
Social	Accident cost Ca	LDV Euro 4 Diesel	59.84			35.14		
		HDV Rigid 20–26 t Euro IV		3.62	3.62		1.46	1.46
		Metro			5.88			3.70
	Congestion cost Cc	LDV Near capacity	2055.10			1206.80		
		HDV Near capacity		157.05	157.05		104.70	104.70
		Total Social (€/day)	<b>2114.94</b>	<b>160.67</b>	<b>166.55</b>	<b>1241.94</b>	<b>106.16</b>	<b>109.86</b>

## 6. Discussion

The total costs estimated for the two alternatives proposed indicate that the use of the metropolitan rail system to deliver e-commerce packages through smart lockers could be a promising alternative from a social and environmental standpoint.

This section analyzes the results from various perspectives:

(1) Total cost per package. The data for the operation cost of delivering a package to a home (B2C) by an external logistics provider vary based on the reference city, value of the parameters considered previously (distance travelled, parcels delivered per route, urban density, etc.), and the labor costs and material means employed for the delivery.

In the reference scenario, these values stand at around 2.02–3.87 €/parcel [41–43], for various European cities. In the case of Madrid (considering the areas with higher population density), based on expert opinions, the range would be around 1.85–2.30 €/parcel. The data collected in the study place the cost per package at €1.97, within the margins established by the experts.

It is worth noting that the operating costs for the mixed model presented vary between €1.69 and €2.01 per package (see Figure 6). In three of the scenarios, there is a reduction in operating costs between 14.72% and 3.04%, compared with urban distribution by LDV. Only for delivery to stations with elevator and dedicated trains scenario is the operating cost 1.52% higher than the reference scenario.

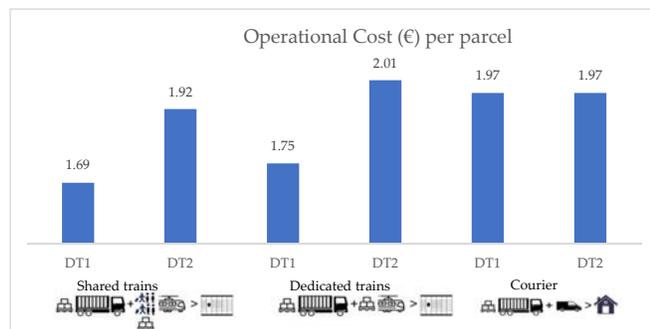


Figure 6. Comparison of operational cost per parcel.

(2) External cost per package. In order to compare the environmental efficiency of each alternative, it is necessary to associate the total external cost to the number of packages delivered, as shown in Figure 7.



Figure 7. Comparison of external costs per parcel. Demand = DT1 (left); DT2 (right).

The sums of all external costs for the reference scenario (current situation) are around 9.8 and 8.2 times higher than the proposed alternatives. Within the alternatives of the new model, the values are similar, and the externalities caused by dedicated trains are scarcely relevant. As can be seen from the values for the alternatives with the same demand for parcels, the external costs of heavy trucks traveling to Metro depots entail a significantly larger impact than the externalities of dedicated trains carrying packages. For the alternatives involving dedicated trains, the difference lies in optimizing the number of heavy trucks employed in the transport to depots and trains transporting roll containers.

(3) Cost by type of externality. Considering each type of externality, Figure 8 shows the distribution of average costs per parcel associated to each model (current or proposed):

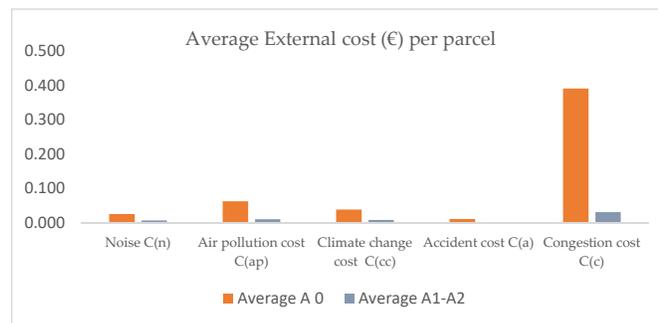


Figure 8. Average external cost per parcel for different externalities.

For the current situation (Average A0), the cost of congestion represents 73.8% of the total externalities. In the case of the proposed alternatives (A1–A2), the distribution is considerably more balanced between the different types of external costs, while all the time remaining significantly lower than the external costs of the current model.

(4) Analysis of sensitivity of demand. Daily demand for e-commerce parcels can vary depending on two main parameters: The number of people who place orders online (Metro travelers or residents near a station) and the behavior or characteristics of e-commerce consumers (% of Internet users and online shoppers, frequency of online purchases, % of online purchases of physical goods delivered in parcels, and preference for a specific delivery method).

If we focus on the number of people who place orders online, a priori, we can consider values to be stable overall, with small increases and decreases over time. Even though the Covid-19 pandemic has not had a significant impact on the number of residents living in Madrid's districts, it has led to a substantial change in the number of travelers who use the metro public transport system. Figure 9 shows the evolution of residents in the city of Madrid along with the evolution of Madrid Metro travelers during the period 2000–2020 [39,48].



Figure 9. Number of Metro travelers and residents in Madrid 2000–2020.

The two lines in Figure 9 show similar evolutions until 2020. In that year, while the number of Madrid residents continued to grow, the figure for Madrid Metro travelers fell dramatically. In 2019, from Monday to Friday, Madrid had an average of 2.3 million Metro travelers per day. During the pandemic, excluding the total lockdown period (March–June 2020), the number of travelers remained stable at 50% of the pre-Covid period. Regarding the variation in the volume of Metro travelers (maintaining the same structure of the origin-destination matrix and other variables unchanged), the variation in the daily demand for e-commerce parcels and the cost per parcel for DT1 is shown in Figure 10.

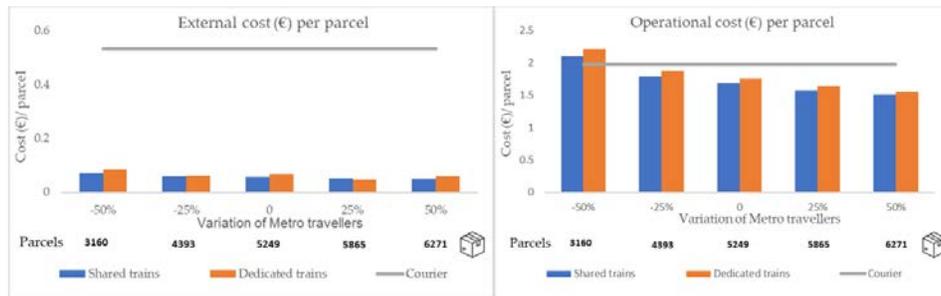


Figure 10. Impact of demand levels on operation costs (left) and externalities (right).

With regard to operational cost, when shared trains are used, the mixed distribution model’s costs are lower than the reference scenario, given  $\pm 50\%$  variations in passenger demand. In terms of specific trains, only a 50% reduction in Metro travel demand entails higher operating costs in the mixed distribution model. Nevertheless, if external costs are taken into account, the mixed model always incurs lower costs in both alternatives.

Finally, Table 8 shows a comparison of the total cost of sending an e-commerce package in the city of Madrid in the case of the current model (courier) and the mixed models (truck + metro).

**Table 8.** Main annual indicators for the alternatives of the mixed model.

	DT1			DT2		
	Alternative 0 (Courier-LDV)	Alternative 1 (Shared Trains)	Alternative 2 (Dedicated Trains)	Alternative 0 (Courier-LDV)	Alternative 1 (Shared Trains)	Alternative 2 (Dedicated Trains)
Operational cost (€)	1.97	1.69	1.92	1.97	1.75	2.01
External costs (€)	0.53	0.056	0.066	0.53	0.054	0.067
Total cost per parcel (€)	2.5	1.746	1.986	2.5	1.804	2.068

On the whole, results show that the implementation of metro for urban freight has significant potential benefits on urban transportation for the different stakeholders in city logistics. For both carriers and retailers, this entails lower operation cost (and hence higher profitability). For local authorities, this means lower external costs (social and environmental), and for customers, the solution can reduce the number of time deliveries required and the cost of shipping. It also decreases traffic for residents, by reducing the LDV traffic required. However, its contribution to alleviating traffic congestion is far less than that to improve logistics efficiency and reducing other externalities.

The data highlight the differences between the outcome variables analyzed in the reference scenarios and the proposed scenarios and show that the current scenario entails higher economic, social, and environmental costs for the city of Madrid. The likely increase of e-commerce market in the near future, due to its growth during the coronavirus outbreak, and the recent drop in commuters per train suggest the value of investigating this last-mile delivery system in large cities.

However, some limitations should be noted. The specific method used to determine the demand for e-commerce of travelers and residents is based on official statistics [39,48–52] but considers several static variables in a very dynamic reality. Other methods of calculating demand may offer different opportunities to improve the data obtained. Similarly, in a changing and highly globalized environment, certain variables such as consumer preference for collection at smart locker can change significantly from one survey to another. Furthermore, the particularity of the case study on both, the supply (metro) and demand sides (travelers and residents), means that the transferability of the proposed solution to other cities should be studied in greater detail.

## 7. Conclusions and Perspectives

This study lays out the quantification of economic, environmental, and social cost analysis of a new model for e-commerce parcel delivery using underground public transport network in a large city.

The findings of this study have a number of important implications for future practices and policies. First, the demand for e-commerce packages by travelers and residents living near stations reaches a sufficient volume to justify the use of trains for their delivery. In many cases, this demand exceeds the capacity of the lockers at stations, which may suggest adapting each parcel locker to the real demand of each station in the future.

Second, the economic, social, and environmental costs associated with the proposed delivery model are considerably lower than those of the current system based on LDV. At present, the use of shared trains offers greater operational advantages by using the existing capacity of the metro network. The operating costs of the mixed model are 14.72–11.16% lower than the current ones. On the social and environmental side, the average external cost per parcel in the proposed model is between 8.2 and 9.8 times lower than the current scenario.

Sharing trains between commuters and e-commerce parcels is the key to improving operational costs. In this case, the externalities are generated by heavy trucks travelling from the e-fulfilment center to the Metro depot. These external costs are very similar to those of dedicated trains. Considering the total cost per parcel, all the alternatives of the proposed mixed model are better than the current scenario.

Inevitably, several limitations arise in the study, which represent valuable directions for future research. On the one hand, it would be essential to calculate the new demand for metro commuters and the growth of e-commerce for city dwellers in a post Covid-19 scenario. In addition, it is necessary to delve deeper into various operational issues that may represent barriers to effective implementation: (i) Operational capacity of urban passenger rail transport systems to act as logistics operators, (ii) viability of placing smart lockers at all metro stations, and (iii) impact that sharing trains with e-commerce packages may have on commuters.

The results will be made available to Madrid Public Transportation Authority, which is interested in this topic and willing to explore/test alternative service configurations in a real-life pilot study.

It is vital to know the opinion of two main actors about the new model of delivery: Acceptance by metro travelers and satisfaction of online buyers. Both aspects would represent future lines of research. Lastly, this study could be extended by considering other forms of delivery (convenience stores, home delivery, etc.) and evaluating the economic, social, and environmental impacts of the main alternatives currently existing in e-commerce.

**Author Contributions:** R.V. and A.M. contributed equally to the data preparation and the analysis and to the interpretation of results. All authors made major contributions to writing the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Data related to E-commerce transactions can be found in CNMC database at <http://data.cnmc.es/datagraph/>. Data related to Madrid residents can be found in Madrid city council data at <https://datos.madrid.es/portal/site/egob>. Data for the calculation of the variables in E-commerce parcels demand can be found in ONTSI at <https://www.ontsi.red.es/es/ontsi-data>. Data related to Metro travellers can be found at <https://www.metromadrid.es/es/transparencia/proyectos-y-datos#panel1>.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Sanchez-Diaz, I.; Browne, M. Accommodating urban freight in city planning. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2018**, *10*, 55. [CrossRef]
- Eurostat Digital Economy and Society Statistics—Households and Individuals—Statistics Explained. Available online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Digital\\_economy\\_and\\_society\\_statistics\\_-\\_households\\_and\\_individuals](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Digital_economy_and_society_statistics_-_households_and_individuals) (accessed on 10 June 2020).
- Rai, H.B.; Verlinde, S.; Merckx, J.; Macharis, C. Crowd logistics: An opportunity for more sustainable urban freight transport? *Eur. Transp. Res. Rev.* **2017**, *9*, 39. [CrossRef]
- Macharis, C.; Nocera, S. The future of freight transport. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2019**, *11*, 21. [CrossRef]
- Greenhouse Gas Emissions from Transport in Europe—European Environment Agency. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12> (accessed on 10 June 2020).
- Dablanc, L. Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2007**, *41*, 280–285. [CrossRef]
- ERTRAC. *Urban Freight. Research & Innovation Roadmap*. 2015. Available online: [https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id36/ERTRAC\\_Alice\\_Urban\\_Freight.pdf](https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id36/ERTRAC_Alice_Urban_Freight.pdf) (accessed on 10 June 2020).
- González-Feliu, J. Costs and Benefits of Railway Urban Logistics: A Prospective Social Cost Benefit Analysis. Available online: [https://halshs.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/1056135/filename/Costs\\_and\\_benefits\\_of\\_railway\\_urban\\_logistics.pdf](https://halshs.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/1056135/filename/Costs_and_benefits_of_railway_urban_logistics.pdf) (accessed on 10 June 2020).
- Browne, M.; Allen, J.; Woodburn, A.; Piotrowska, M. The Potential for Non-road Modes to Support Environmentally Friendly Urban Logistics. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2014**, *151*, 29–36. [CrossRef]
- Statista COVID-19 Impact on Global Retail e-Commerce Site Traffic 2019–2020. Available online: <https://www.statista.com/statistics/1112595/covid-19-impact-retail-e-commerce-site-traffic-global/> (accessed on 16 January 2021).

11. Crainic, T.G.; Ricciardi, N.; Storchi, G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2004**, *12*, 119–137. [CrossRef]
12. Cardenas, I.; Borbon-Galvez, Y.; Verlinden, T.; Van De Voorde, E.; Vanelslander, T.; Dewulf, W. City logistics, urban goods distribution and last mile delivery and collection. *Compet. Regul. Netw. Ind.* **2017**, *18*, 22–43. [CrossRef]
13. Lebeau, P.; Macharis, C. Freight transport in Brussels and its impact on road traffic? *Bruss. Stud.* **2014**. [CrossRef]
14. Morganosky, M.A.; Cude, B.J. Consumer demand for online food retailing: Is it really a supply side issue? *Int. J. Retail. Distrib. Manag.* **2002**, *30*, 451–458. [CrossRef]
15. Boston Consulting Group. *Same-Day Delivery. Not Ready for Prime Time*. 2013. Available online: [https://image-src.bcg.com/Images/BCG\\_Same-Day\\_Delivery\\_Mar\\_2013\\_tcm9-97034.pdf](https://image-src.bcg.com/Images/BCG_Same-Day_Delivery_Mar_2013_tcm9-97034.pdf) (accessed on 16 January 2021).
16. McKinsey & Company Parcel Delivery. The Future of Last Mile; Travel, Transport and Logistics; 2016. Available online: [https://www.mckinsey.com/~/{}/media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel\\_delivery\\_the\\_future\\_of\\_last\\_mile.ashx](https://www.mckinsey.com/~/{}/media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx) (accessed on 18 January 2021).
17. DELOITTE 2018 Holiday Survey. Ringing in the Retail; 2018. Available online: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4737\\_2018-holiday-survey/DI\\_2018-holiday-survey.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4737_2018-holiday-survey/DI_2018-holiday-survey.pdf) (accessed on 14 January 2021).
18. Capgemini Research Institute. The Last-Mile Delivery Challenge. *Giving Retail and Consumer Product Customers a Superior Delivery Experience without Impacting Profitability*; 2019. Available online: <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/01/Report-Digital-%E2%80%93-Last-Mile-Delivery-Challenge1.pdf> (accessed on 21 January 2021).
19. Allen, J.; Thorne, G.; Browne, M. Good Practice Guide on Urban Freight Transport; BESTUFS; 2007. Available online: [http://www.bestufs.net/download/BESTUFS\\_II/good\\_practice/English\\_BESTUFS\\_Guide.pdf](http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/good_practice/English_BESTUFS_Guide.pdf) (accessed on 16 January 2021).
20. Lemmens, N.; Gijsbrechts, J.; Boute, R. Synchromodality in the Physical Internet—Dual sourcing and real-time switching between transport modes. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2019**, *11*, 19. [CrossRef]
21. Arvidsson, N.; Browne, M. A Review of the Success and Failure of Tram Systems to Carry Urban Freight: The Implications for a Low Emission Intermodal Solution Using Electric Vehicles on Trams. *Eur. Transp.* **2013**, *54*, 18.
22. Marinov, M.; Giubilei, F.; Gerhardt, M.; Özkan, T.; Stergiou, E.; Papadopol, M.; Cabecinha, L. Urban freight movement by rail. *J. Transp. Lit.* **2013**, *7*, 87–116. [CrossRef]
23. Strale, M. The Cargo Tram: Current Status and Perspectives, the Example of Brussels. In *Transport and Sustainability*; Macharis, C., Melo, S., Woxenius, J., Lier, T.V., Eds.; Emerald Group Publishing Limited: Bingley, UK, 2014; Volume 6, pp. 245–263. ISBN 9781784410629.
24. Oishi, R.; Taniguchi, E. Effects and Profitability of Constructing the New Underground Freight Transport System. In Proceedings of the 1st International Conference on City Logistics, Cairns, Queensland, Australia, 12–14 July 1999.
25. Robinson, A.M.; Mortimer, P.N. Logistics & Transport Focus; 2004. Available online: [http://www.bestufs.net/download/NewsEvents/articles/What\\_Future\\_If\\_Any.pdf](http://www.bestufs.net/download/NewsEvents/articles/What_Future_If_Any.pdf) (accessed on 22 January 2021).
26. Kikuta, J.; Ito, T.; Tomiyama, I.; Yamamoto, S.; Yamada, T. New Subway-Integrated City Logistics Szystem. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2012**, *39*, 476–489. [CrossRef]
27. Dampier, A.; Marinov, M. A Study of the Feasibility and Potential Implementation of Metro-Based Freight Transportation in Newcastle upon Tyne. *Urban Rail Transit* **2015**, *1*, 164–182. [CrossRef]
28. Behiri, W.; Belmokhtar-Berraf, S.; Chu, C. Urban freight transport using passenger rail network: Scientific issues and quantitative analysis. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2018**, *115*, 227–245. [CrossRef]
29. Gatta, V.; Marcucci, E.; Nigro, M.; Serafini, S. Sustainable urban freight transport adopting public transport-based crowdshipping for B2C deliveries. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2019**, *11*, 13. [CrossRef]
30. Li, Q.; Lai, Y.; Wang, Q.; Lu, Z. Mechanical Structure Design of Underground Logistics System Based on Passenger and Freight Transportation. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *688*, 044075. [CrossRef]
31. Leung, L.; Cheung, W.; Van Hai, Y. A framework for a logistics e-commerce community network: The Hong Kong air cargo industry. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A Syst. Hum.* **2000**, *30*, 446–455. [CrossRef]
32. Okholm, H.B.; Thelle, M.H.; Möller, A.; Basalisco, B.; Rølmer, S.; European Commission; DG Internal Market and Services. *Copenhagen Economics E-Commerce and Delivery: A Study of the State of Play of EU Parcel Markets with Particular Emphasis on e-Commerce*; EUR-OP: Luxembourg, 2013; ISBN 9789279297342.
33. Kotler, P.; Keller, K. *Marketing Management*, 14th ed.; Pearson: Upper Saddle River, NJ, USA, 2012.
34. Essen, H.; van Wijngaarden, L.; van Schrotten, A.; Sutter, D.; Bieler, C.; Maffii, S.; Brambilla, M.; Fiorello, D.; Fermi, F.; Parolin, R.; et al. *Handbook on the External Costs of Transport*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019; ISBN 9789279969171. [CrossRef]
35. Padrón Municipal de Habitantes. Available online: <http://portalestadistico.com/municipioencifras/?pn=madrid&pc=ZTV21> (accessed on 25 April 2020).
36. Plan de Calidad de Aire de la Ciudad de Madrid y Cambio Climático (PLAN A)—Ayuntamiento de Madrid. Available online: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Publicaciones/Plan-de-Calidad-de-aire-de-la-ciudad-de-Madrid-y-Cambio-Climatico-PLAN-A-/?vgnextfmt=default&vgnextoid=2b809df12834b510VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=f6ff79ed268fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD> (accessed on 25 April 2020).

37. Cambio Climático—Inventario de emisiones—Ayuntamiento de Madrid. Available online: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Medio-ambiente/Cambio-Climatico/?vgnnextfmt=de-fault&vgnnextoid=0ca36936042fc310VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=4b3a171c30036010VgnVCM1000000dc0ca8c0RCRD&idCapitulo=6877178> (accessed on 25 April 2020).
38. Ayuntamiento de Madrid Traffic Density Indicators by District. Available online: <http://www-2.munimadrid.es/CSE6/control/seleccionDatos?numSerie=15020101040> (accessed on 25 April 2020).
39. Metro de Madrid Proyectos y Datos. Available online: <http://www.metromadrid.es/es/transparencia/proyectos-y-datos> (accessed on 25 April 2020).
40. Edwards, J.; McKinnon, A.; Cherrett, T.; Song, L. *The Impact of Failed Home Delivery on Carbon Emissions: Are Collection/Delivery Points Environmentally-Friendly Alternatives*; Heriot Watt University: Cardiff, UK, 2009.
41. Lemke, J.; Iwan, S.; Korczak, J. Usability of the Parcel Lockers from the Customer Perspective—The Research in Polish Cities. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *16*, 272–287. [CrossRef]
42. Bart, D.M. *Ecological and Economic Impact of Automated Parcel Lockers vs. Home Delivery*; Vrije Universiteit Brussel: Brussel, Belgium, 2017.
43. Gevaers, R.; Van de Voorde, E.; Vanelander, T. Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities. *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2014**, *125*, 398–411. [CrossRef]
44. Van Duin, J.; De Goffau, W.; Wiegman, B.; Tavasszy, L.; Saes, M. Improving Home Delivery Efficiency by Using Principles of Address Intelligence for B2C Deliveries. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *12*, 14–25. [CrossRef]
45. Van Duin, J.; Wiegman, B.; van Arem, B.; van Amstel, Y. From home delivery to parcel lockers: A case study in Amsterdam. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *46*, 37–44. [CrossRef]
46. Edición del Estudio Sobre Logística del eCommerce y Marketplaces. Available online: <https://pro.packlink.es/becommerce/3a-edicion-del-estudio-sobre-logistica-del-ecommerce-y-marketplaces-en-espana-de-packlink/> (accessed on 19 June 2020).
47. International Post Corporation. IPC Cross-Border E-Commerce Shopper Survey; 2019. Available online: <https://www.ipc.be/sector-data/e-commerce/cross-border-e-commerce-shopper-survey> (accessed on 19 June 2020).
48. Spanish Statistical Office. Available online: <https://www.ine.es/en/> (accessed on 22 February 2021).
49. El Comercio Electrónico B2C En España 2019 (Edición 2020) | Ontsi—Red.Es. Available online: <https://www.ontsi.red.es/es/estudios-e-informes/Hogares-y-ciudadanos/El-Comercio-Electronico-B2C-en-Espana-2019-%28Edicion-2020%29> (accessed on 22 March 2021).
50. CNMCDData—Comision Nacional de Los Mercados y La Competencia. Available online: <http://data.cnmc.es/datagraph/> (accessed on 22 March 2021).
51. Union, P.O. of the E. Handbook on the External Costs of Transport: Version 2019-1.1. Available online: <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9781f65f-8448-11ea-bf12-01aa75ed71a1> (accessed on 22 April 2020).
52. Padrón Municipal—Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid. Available online: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9f9be4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=1d755cde99be2410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD> (accessed on 22 April 2020).



## **Anexo II. Datos para la modelización M4G y magnitudes operativas para el reparto de paquetes en el escenario de referencia**

---



Dato para modelo M4G	Valor	Observaciones/fuente
Días laborables	249,0	todos los días - fines de semana y festivos CAM (12)
Coste circulación trenes (€)/km	2,62	informe corporativo Metro de Madrid
Coste de apertura (€)/estación	854 576,0	informe corporativo Metro de Madrid
Coste de apertura (€)/estación/día/hora de apertura	214,5	informe corporativo Metro de Madrid
Coste (€) de administración/km	0,966	informe corporativo Metro de Madrid
Coste (€) de transporte camión HDV (1 viaje)	450,0	D. + S. + FM (22/02/2020)
Horas anuales de trabajo	1800,0	( <a href="https://www.insst.es/documents/94886/96082/Jornada+y+horarios+de+trabajo/ad9dd0c7-80c7-4cff-9b42-afeffd7b934f">https://www.insst.es/documents/94886/96082/Jornada+y+horarios+de+trabajo/ad9dd0c7-80c7-4cff-9b42-afeffd7b934f</a> )
Coste anual de un trabajador reparto	21 700,0	( <a href="https://es.talent.com/salary?job=repartidor">https://es.talent.com/salary?job=repartidor</a> )
Coste hora/trabajador reparto	12,1	( <a href="https://es.talent.com/salary?job=repartidor">https://es.talent.com/salary?job=repartidor</a> )
Coste hora/trabajador oficina atención	10,0	salario para <i>call center</i> en España - salario medio (talent.com)
<i>Fee</i> de Metro de Madrid	0,4	importe por paquete que cobra Metro de Madrid por utilizar sus instalaciones
Coste (€) almacén temporal (carpa)	40 000,0	presupuesto M.M. + G.C. (18/01/2020)
Coste (€) de taquilla grande	10 000,0	presupuesto S.P. + V.C. (02/02/2020)
Coste (€) taquilla mediana	6000,0	presupuesto S.P. + V.C. (02/02/2020)
Factor multiplicador de <i>rollers</i>	2,2	compra inicial necesaria de contenedores rodantes para todo el modelo
Módulos de estanterías para <i>microhubs</i>	92,0	módulos de estanterías manuales necesarios para un <i>microhub</i> (máximo 1300 paquetes)
Consumo de HDV <i>rigid</i> (Europa) cada 100 km	23,0	( <a href="https://www.globalfueleconomy.org/media/404893/gfei-wp14.pdf">https://www.globalfueleconomy.org/media/404893/gfei-wp14.pdf</a> )
Consumo de LCV (Europa) cada 100 km	5,8	( <a href="https://www.iea.org/reports/fuel-economy-in-major-car-markets">https://www.iea.org/reports/fuel-economy-in-major-car-markets</a> )
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g) por km HDV <i>rigid</i> (Europa)	703,0	( <a href="https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment">https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment</a> )
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g) por km LCV <i>rigid</i> (Europa)	168,3	( <a href="https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment">https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment</a> )
Emisiones de CO <sub>2</sub> (g) por coche/km (Metro)	691,9	informe corporativo Metro de Madrid
Paquetes diarios entregados	60,0	

Magnitudes operativas reparto de paquetes <i>courier</i>	<i>Courier A1-0</i>	<i>Courier A2-0</i>	<i>Courier A3-0</i>	Unidad
Paquetes totales de reparto	5249	6654	9221	paquetes/día
Paquetes que entrega un mensajero en furgoneta	60,00	60,00	60,00	paquetes/día
Número de mensajeros	87,49	110,90	153,68	n.º personas/día
Coste de materiales día (furgoneta, gasolina)	22,73	22,73	22,73	€/día
Costes de estructura (alquiler local, gastos admon., etc.)	1035,04	1311,96	1818,09	€/día
Coste diario (suma de costes personal + materiales)	10 350,39	13 119,62	18 180,91	€/día
Coste total diario	11 385,43	14 431,58	19 999,00	€/día
Horas diarias de mensajero	699,91	887,16	1229,41	horas/día
Kilómetros diarios recorridos	7873,93	9980,59	13 830,90	km/día
Toneladas de CO <sub>2</sub>	1,33	1,68	2,17	Tn CO <sub>2</sub> /día
Litros gasoil consumidos	456,69	578,87	802,19	litros/día

## **Anexo III. Desglose costes económicos de las alternativas del modelo M4G**

---



*Shared trains (A1)*

CAPEX			
Datos de compra no recurrente	Cantidad	Importe	Coste (€)
<i>Rollers</i> grandes	372	260,0	96 668,0
<i>Rollers</i> medianos		170,0	-
Almacén temporal depósito (carpa)	3	40 000,0	120 000,0
Taquillas grandes	69	10 000,0	690 000,0
Taquillas medianas	19	6000,0	114 000,0
Adecuación cuarto pequeño de estación	88	2000,0	176 000,0
Obras de adecuación y otros gastos (escáneres, portones)	1	300 000,0	300 000,0
			1 496 668,0
OPEX			
Costes diarios	Cantidad	Importe	Coste (€)
Transporte de <i>rollers</i> a depósito (i/v)	8	450,0	3600,0
Descarga de <i>rollers</i> en depósitos (horas/día)	11,27	11,9	134,6
Preparación de <i>rollers</i> y carga en trenes	21,00	11,9	250,8
Descarga de <i>rollers</i> en estación y reposición taquilla	123,50	11,9	1475,1
Devolución de <i>rollers</i> a depósito (estación y depósito)	44,00	11,9	525,6
Fee Metro Opex (almacenamiento temporal + coste por utilización de instalaciones de Metro)	5249	0,4	2099,7
Fee Metro Capex (almacenamiento temporal + coste por utilización de instalaciones de Metro)	1 496 668,00	10 años	601,1
Gastos mantenimiento	44 900	3 %	180,3
Costes totales diarios			8867,21 €