

Estimación de una matriz Origen-Destino para el transporte urbano de mercancías. Aplicación a la ciudad de Sevilla.

Jesús Muñuzuri Sanz¹, Juan Larrañeta Astola², Luis Onieva Giménez³, Pablo Cortés Achedad⁴

¹ Dr. Ingeniero Industrial (Escuela Superior de Ingenieros, Camino Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, munuzuri@esi.us.es)

² Dr. Ingeniero Industrial (Escuela Superior de Ingenieros, Camino Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, astola@us.es)

³ Dr. Ingeniero Industrial (Escuela Superior de Ingenieros, Camino Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, onieva@us.es)

⁴ Dr. Ingeniero Industrial (Escuela Superior de Ingenieros, Camino Descubrimientos s/n 41092 Sevilla, pca@us.es)

RESUMEN

El trabajo presenta el proceso seguido para estimar una matriz origen-destino para el transporte de mercancías en la ciudad de Sevilla. Se concentra especialmente en el proceso de adquisición de información, que habitualmente es uno de los principales obstáculos a que se enfrenta este tipo de análisis. El modelo utilizado, basado en la maximización de entropía, y el algoritmo de resolución, incluyendo las aproximaciones lineales de Frank-Wolfe, son igualmente descritos. Finalmente, se muestran los resultados y la comparación con mediciones efectuadas sobre el terreno, así como las conclusiones extraídas.

Palabras clave: logística urbana de mercancías, matriz origen-destino.

1. Introducción.

Este trabajo se incluye en una línea de trabajo destinada a obtener una descripción de los movimientos de mercancías en la ciudad de Sevilla. La herramienta principal para realizar los análisis es el paquete comercial EMME/2, que lleva a cabo asignaciones de equilibrio (cálculos de flujos de tráfico) utilizando una red urbana dividida en zonas y una matriz origen-destino (O-D), que refleja cuántos vehículos se desplazan entre cada par de zonas. Se disponía previamente de una matriz O-D para el transporte privado, lo cual permitía realizar asignaciones de vehículos privados para la ciudad. Este trabajo mostrará el proceso seguido para estimar una matriz O-D para vehículos de transporte de mercancías, además de llevar a cabo una asignación conjunta de vehículos privados y de transporte de mercancías. Finalmente, se realizará una comparación entre los flujos estimados y los reales, identificando las debilidades del modelo y las necesidades adicionales de información.

Las matrices O-D que se estiman aquí para vehículos de mercancías, al igual que la referente a vehículos privados, corresponden al intervalo de 9 a 10 de la mañana de un día laborable. Es importante destacar que, mientras los vehículos privados suelen realizar un único desplazamiento, los de mercancías siguen una ruta con varias paradas en diferentes partes de la ciudad. Sin embargo, se supuso aquí que, en el intervalo temporal considerado, los vehículos de mercancías se desplazan de su zona origen a su zona destino, realizando

posteriormente su ruta dentro de esta última, sin ser por tanto recogida en la matriz O-D.

2. Recogida de información.

El principal problema a la hora de estimar una matriz O-D para cualquier ciudad es la falta de información numérica fiable. Según Cohen (1997) en la construcción de un modelo de este tipo pueden ser utilizadas dos tipos de fuentes de datos, las primarias y las secundarias. Las fuentes primarias proporcionan una información mucho más detallada, pero también más difícil y costosa de obtener que la extraída de fuentes secundarias. Una adecuada combinación de ambas, por tanto, es necesaria para completar adecuadamente el proceso de modelado.

2.1 Fuentes secundarias de información

Las fuentes secundarias utilizadas en este caso fueron varias, y la información obtenida no se mostrará aquí por razones de espacio, aunque puede encontrarse detallada en Muñuzuri (2003):

- Densidades de población, obtenidas de la Oficina del Padrón de Sevilla.
- Localización de establecimientos comerciales, obtenida de la Cámara de Comercio de Sevilla, que incluye el número de mayoristas y minoristas ubicados en cada zona de la ciudad en función de su tipo de actividad.
- Sectores de actividad, obtenidos a partir de una clasificación de la información anterior. Los cinco sectores considerados en este trabajo, que contienen todos los tipos de actividades comerciales relacionadas con el movimiento de mercancías en Sevilla, son:
 1. Transformación de minerales no metálicos y químicos: construcción, farmacias, cristal, pinturas, productos de limpieza, etc.
 2. Transformación de productos metálicos: maquinaria, informática, electricidad, vehículos, etc.
 3. Otras industrias: productos textiles, calzado, muebles, papel, entidades financieras, etc.
 4. Alimentos no frescos, bebidas y tabaco.
 5. Alimentos frescos: fruta, verduras, carnes y pescados.
- Número de furgonetas y camiones con licencia para transportar mercancías emitida en la ciudad de Sevilla, proporcionado por la Federación Andaluza de Transporte por Carretera (FATRANS). Este número es **5.823**, y se tomará como el número total de vehículos de mercancías que operan diariamente en la ciudad de Sevilla.

2.2 Fuentes primarias de información

Las fuentes primarias de información utilizadas fueron:

- Conteos de vehículos de mercancías en diversas calles de Sevilla, utilizados para la validación del modelo.
- Encuestas realizadas a un número significativo de minoristas en diversas partes de la ciudad (Muñuzuri, 2003), que proporcionaron una doble información:
 - ♦ El promedio de envíos recibidos diariamente por cada tipo de minorista, información recogida en la tabla 1.
 - ♦ El promedio de vehículos utilizados para el reparto a domicilio por cada minorista. Principalmente, son cuatro tipos de minoristas los que realizan repartos a domicilio: muebles (sector 4), electrodomésticos (sector 2), equipamientos de oficinas (sector 2)

y puertas, ventanas y persianas (sector 2). Se estimó que el establecimiento promedio utiliza un vehículo para repartos a domicilio, con lo que, de acuerdo con el total de establecimientos de los tipos anteriores localizados en la ciudad, el número de vehículos dedicados al reparto a domicilio sería de **1.028**.

SECTOR	ESTABLECIMIENTOS INCLUIDOS	ENTREGAS DIARIAS	SECTOR	ESTABLECIMIENTOS INCLUIDOS	ENTREGAS DIARIAS
1	Farmacias	1	3	Comida y bebida	3
	Perfumes, droguerías	0.2		Tiendas de comida	11
	Plantas	0.2		Tiendas de comida sin establecimiento	1
	Estaciones de servicio	1		Máquinas expendedoras de alimentos	1
	Semillas	1		Centros comerciales	2
	Recogida de residuos	0.2		Restaurantes	2
	Limpieza urbana	0.2		Cafeterías	2
	Servicios de limpieza	0.2		Bares y pubs	2
	Limpieza en seco de ropa	0.2		Comida y bebida sin establecimiento	1
	Materiales de construcción	1		Otras comida y bebida	2
2	Electrodomésticos	0.4	4	Hoteles y moteles	1
	Menaje del hogar	1		Textiles del hogar	0.4
	Puertas, ventanas y persianas	1		Ropa	0.4
	Equipamientos del hogar	1		Lencería	0.4
	Vehículos	0.2		Calzado	0.4
	Piezas de recambio para vehículos	1		Cuero y pieles	0.4
	Buques y barcos	0.2		Mobiliario (excepto oficina)	2
	Maquinaria	0.4		Bienes y muebles de segunda mano	1
	Neumáticos	1		Instrumentos musicales y accesorios	0.6
	Equipamientos de oficina	0.4		Sellos, monedas y medallas	0.4
	Instrumentos médicos	0.4		Libros, prensa y revistas	3
	Otra maquinaria	1		Joyerías y relojerías	0.4
	Servicios técnicos para electrodomésticos	1		Juguetes, armas y deportes	0.6
	Talleres para vehículos	0.4		Otros bienes	1
	Servicios técnicos para bienes de consumo	0.4		Textiles y ropas sin establecimiento	0.2
	Talleres de maquinaria industrial	0.4		Calzado sin establecimiento	0.2
	Otros servicios técnicos	0.4		Otros bienes sin establecimiento	0.2
	3	Confiterías y pastelerías		2	5
Panaderías		2	Carnicerías	1	
Helados y dulces		1	Huevos y recova	1	
Freidurías		1	Pescaderías	1	
Tabaco		1			

Tabla 1: Número estimado de repartos diarios recibidos por cada tipo de establecimiento dentro de los cinco sectores de actividad considerados.

3. El algoritmo de estimación de la matriz O-D

Sea O_i el número de viajes de transporte de mercancías originados en la zona i , y sea D_j el número de viajes con destino en la zona j . El objetivo del proceso de estimación reside en el cálculo de los valores T_{ij} , es decir, el número de viajes de transporte de mercancías entre las zonas i y j , para todos los pares (i,j) de la ciudad. Estos valores T_{ij} son los elementos de la

matriz O-D. El modelo empleado para la estimación es el de maximización de entropía, recomendado por De la Barra (1989), formulado como sigue:

$$\text{Max } W = \frac{\left(\sum_i \sum_j T_{ij} \right)!}{\prod_{ij} (T_{ij} !)}$$

$$\text{s.a: } \sum_j T_{ij} = O_i$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j$$

$$T_{ij} \geq 0$$

Este es un problema de optimización no lineal con restricciones lineales. Debido al elevado número de variables (129^2 , siendo 129 el número de zonas en que se ha dividido la ciudad de Sevilla), la técnica de resolución empleada para este problema está basada en la aproximación lineal de Frank-Wolfe (Bertsekas, 1995), que cubre los siguientes pasos:

- Cálculo de un punto inicial, mediante Fase I.
- Cálculo de la dirección de mayor minimización del gradiente.
- Minimización unidireccional a lo largo de esa dirección.
- Comprobación de convergencia.

4. Estimación de repartos a domicilio

El número de orígenes y destinos para cada zona se calcula a partir de medias ponderadas:

$$O_i = \frac{N_d \cdot R_i}{\sum_i R_i} \quad \text{y} \quad D_i = \frac{N_d \cdot P_i}{\sum_i P_i} \quad , \text{ donde:}$$

R_i es el número de minoristas que realizan repartos a domicilio en la zona i , es decir, los correspondientes a mobiliario (sector 4), electrodomésticos (sector 2), equipamientos de oficina (sector 2), y puertas, ventanas y persianas (sector 2).

N_d es el número promedio de vehículos de mercancías usados diariamente para reparto a domicilio, igual a 1.028. Como se vio a partir de los sondeos realizados, este número es también igual a R_i .

P_i es la población en la zona i .

Un modelo de maximización de entropía fue formulado y resuelto para estos datos, estimándose la correspondiente matriz O-D para repartos a domicilio

5. Repartos a minoristas

Para cada sector k y para cada zona destino j el número de repartos diarios x_j^k puede estimarse como sigue:

$$x_j^k = \sum_{l \in k} d_j^l e^l \quad , \text{ donde:}$$

d_j^l es el número de minoristas receptores de mercancías de la clase l (donde l es cada uno de los tipos de minoristas mostrados en la tabla 1), incluidos en el sector k , ubicados en la zona j . Esta información fue extraída de los datos proporcionados por la Cámara de Comercio.

e^l es el número medio de entregas recibidas diariamente por un minorista genérico del tipo l . Esta información se toma directamente de la tabla 1.

Los valores calculados para los x_j^k se utilizan para el cálculo del número de vehículos que llega a cada zona, de la siguiente manera:

$$D_j^k = \frac{N x_j^k}{\sum_j \sum_k x_j^k} \quad , \text{ donde:} \quad [1]$$

D_j^k = número de vehículos de mercancías del sector k que tienen su destino en la zona j .

N = número de vehículos de mercancías que realizan entregas desde los mayoristas a los minoristas en la ciudad.

x_j^k = número de entregas diarias recibidas por el sector k en la zona j .

Es importante mencionar que los cálculos se llevan a cabo de forma diferente para el sector 5, dedicado a los productos frescos de alimentación. Estos productos se distribuyen diariamente para el total de la ciudad desde el mercado de productos frescos de Sevilla, Mercasevilla, localizado en la zona 104. El número de vehículos con licencia para operar desde Mercasevilla es **206**, lo que significa que para el sector 5 habrá 206 vehículos con origen en la zona 104, y sus zonas de destino serán calculadas de acuerdo con [1]. Por tanto, para el resto de sectores, el número restante de vehículos será: $N = 5.823 - N_d - 206 = \mathbf{4.589}$.

Los valores obtenidos finalmente para los D_j^k se muestran en la tabla 2. Una vez que se conocen estos valores D_j^k , es posible estimar el número de vehículos de cada sector k con origen en cada zona i , es decir, los O_i^k para el transporte de mercancías entre mayoristas y minoristas. La hipótesis de partida establece que el número de viajes que se originan en la ciudad para cada sector O^k debe ser igual al número de destinos para ese sector:

$$O^k = \sum_i O_i^k = \sum_j D_j^k = D^k$$

Este es el número total de vehículos asignados a los mayoristas de cada sector para el total de la ciudad. La cantidad de estos vehículos que tiene su origen en cada zona de la ciudad se estima seguidamente haciendo:

$$O_i^k = \frac{O^k o_i^k}{\sum_i \sum_k o_i^k} \quad , \text{ donde:}$$

O_i^k = número de vehículos de mercancías del sector k con origen en la zona i .

O^k = número total de vehículos del sector k .

o_i^k = número de mayoristas del sector k localizados en la zona i .

Los valores estimados para los O_i^k se muestran en la tabla 3. A partir de aquí, se planteó un modelo de maximización de entropía para cada sector, obteniéndose así cinco nuevas matrices O-D correspondientes al reparto de mercancías desde los mayoristas a los minoristas en la ciudad.

ZONA	SECTOR				
	1	2	3	4	5
1	1,73	4,00	30,65	11,43	1,22
2	1,73	4,00	30,65	11,43	1,22
3	1,73	4,00	30,65	11,43	1,22
4	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
5	1,22	4,29	26,55	15,67	1,57
6	1,22	4,29	26,55	15,67	1,57
7	1,73	4,00	30,65	11,43	1,22
8	1,22	4,29	26,55	15,67	1,57
9	3,06	6,50	45,03	14,25	3,12
10	3,06	6,50	45,03	14,25	3,12
11	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
12	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
13	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
14	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
15	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
16	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
17	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
18	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
19	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
20	0,35	0,58	3,96	0,65	0,46
21	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
22	0,35	0,58	3,96	0,65	0,46
23	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
24	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
25	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
26	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
27	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
28	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
29	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
30	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
31	91,58	1,19	13,28	4,15	1,16
32	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
33	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
34	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
35	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
36	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
37	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
38	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
39	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
40	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
41	1,35	2,48	22,10	9,58	2,22
42	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
43	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
44	0,91	2,16	17,43	5,90	1,93
45	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
46	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
47	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
48	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
49	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
50	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
51	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
52	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
53	1,22	4,29	26,55	15,67	1,57
54	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
55	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
56	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
57	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
58	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
59	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
60	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
61	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
62	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
63	2,46	2,60	19,31	6,91	1,78
64	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
65	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
66	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
67	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
68	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
69	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
70	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
71	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
72	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
73	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
74	1,70	2,57	20,96	6,10	2,74
75	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
76	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
77	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
78	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
79	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
80	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
81	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
82	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
83	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
84	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
85	2,05	2,18	16,10	5,75	1,49
86	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
87	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
88	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
89	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
90	0,78	0,75	8,85	2,51	1,25
91	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65
92	1,20	2,45	19,32	4,78	0,76
93	1,20	2,45	19,32	4,78	0,76
94	1,20	2,45	19,32	4,78	0,76
95	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
96	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
97	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
98	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
99	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
100	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
101	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
102	1,11	2,28	16,52	6,48	0,91
103	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
104	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
105	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
106	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
107	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
108	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
109	1,83	3,39	29,15	8,22	3,50
110	3,68	6,24	53,40	18,16	2,28
111	0,30	2,04	7,99	1,31	0,00
112	0,30	2,04	7,99	1,31	0,00
113	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
114	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
115	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
116	1,02	2,71	16,40	5,08	1,20
117	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
118	2,95	7,18	23,58	4,59	4,26
119	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
120	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
121	1,48	1,80	14,60	5,05	0,78
122	0,15	0,09	4,79	0,35	0,23
123	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65
124	0,15	0,09	4,79	0,35	0,23
125	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65
126	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65
127	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65
128	2,46	3,96	33,62	10,74	3,65
129	0,91	1,66	6,72	1,90	0,65

Tabla 2: Número total de viajes con destino en cada zona de la ciudad.

ZONE	SECTOR				
	1	2	3	4	5
1	2,75	0,15	3,66	9,23	0
2	2,75	0,15	3,66	9,23	0
3	2,75	0,15	3,66	9,23	0
4	2,90	0,12	2,53	7,81	0
5	0,00	0,09	2,82	11,54	0
6	0,00	0,09	2,82	11,54	0
7	2,75	0,15	3,66	9,23	0
8	0,00	0,09	2,82	11,54	0
9	3,05	1,54	19,71	15,66	0
10	3,05	1,54	19,71	15,66	0
11	2,90	0,12	2,53	7,81	0
12	2,90	0,12	2,53	7,81	0
13	2,90	0,12	2,53	7,81	0
14	2,90	0,12	2,53	7,81	0
15	3,51	1,14	12,11	2,97	0
16	3,66	1,17	12,39	3,02	0
17	3,81	1,20	12,67	3,06	0
18	3,97	1,23	12,95	3,11	0
19	4,12	1,26	13,23	3,15	0
20	19,84	5,86	68,99	12,87	0
21	4,43	1,33	13,80	3,24	0
22	21,36	6,16	71,80	13,31	0
23	4,73	1,39	14,36	3,33	0
24	5,34	2,40	13,23	4,53	0
25	5,34	2,40	13,23	4,53	0
26	5,34	2,40	13,23	4,53	0
27	5,34	2,40	13,23	4,53	0
28	5,34	2,40	13,23	4,53	0
29	5,34	2,40	13,23	4,53	0
30	5,80	1,60	16,33	3,64	0
31	5,95	1,63	16,61	3,68	0
32	5,34	2,40	13,23	4,53	0
33	5,34	2,40	13,23	4,53	0
34	5,34	2,40	13,23	4,53	0
35	5,34	2,40	13,23	4,53	0
36	5,34	2,40	13,23	4,53	0
37	5,34	2,40	13,23	4,53	0
38	5,34	2,40	13,23	4,53	0
39	5,34	2,40	13,23	4,53	0
40	2,90	0,12	2,53	7,81	0
41	2,90	0,12	2,53	7,81	0
42	5,34	2,40	13,23	4,53	0
43	5,34	2,40	13,23	4,53	0

ZONE	SECTOR				
	1	2	3	4	5
44	5,34	2,40	13,23	4,53	0
45	20,90	7,80	47,59	8,34	0
46	20,90	7,80	47,59	8,34	0
47	20,90	7,80	47,59	8,34	0
48	20,90	7,80	47,59	8,34	0
49	20,90	7,80	47,59	8,34	0
50	20,90	7,80	47,59	8,34	0
51	20,90	7,80	47,59	8,34	0
52	20,90	7,80	47,59	8,34	0
53	0,00	0,09	2,82	11,54	0
54	8,01	2,23	18,30	5,77	0
55	8,01	2,23	18,30	5,77	0
56	8,01	2,23	18,30	5,77	0
57	8,01	2,23	18,30	5,77	0
58	8,01	2,23	18,30	5,77	0
59	8,01	2,23	18,30	5,77	0
60	8,01	2,23	18,30	5,77	0
61	8,01	2,23	18,30	5,77	0
62	8,01	2,23	18,30	5,77	0
63	8,01	2,23	18,30	5,77	0
64	12,05	3,51	20,27	6,48	0
65	12,05	3,51	20,27	6,48	0
66	12,05	3,51	20,27	6,48	0
67	12,05	3,51	20,27	6,48	0
68	12,05	3,51	20,27	6,48	0
69	12,05	3,51	20,27	6,48	0
70	12,05	3,51	20,27	6,48	0
71	12,05	3,51	20,27	6,48	0
72	12,05	3,51	20,27	6,48	0
73	12,05	3,51	20,27	6,48	0
74	12,05	3,51	20,27	6,48	0
75	3,36	0,83	4,79	1,20	0
76	3,36	0,83	4,79	1,20	0
77	3,36	0,83	4,79	1,20	0
78	3,36	0,83	4,79	1,20	0
79	3,36	0,83	4,79	1,20	0
80	3,36	0,83	4,79	1,20	0
81	3,36	0,83	4,79	1,20	0
82	8,01	2,23	18,30	5,77	0
83	3,36	0,83	4,79	1,20	0
84	3,36	0,83	4,79	1,20	0
85	8,01	2,23	18,30	5,77	0
86	3,36	0,83	4,79	1,20	0

ZONE	SECTOR				
	1	2	3	4	5
87	3,36	0,83	4,79	1,20	0
88	3,36	0,83	4,79	1,20	0
89	3,36	0,83	4,79	1,20	0
90	3,36	0,83	4,79	1,20	0
91	15,72	1,60	27,59	5,90	0
92	17,24	2,37	18,87	2,66	0
93	17,24	2,37	18,87	2,66	0
94	17,24	2,37	18,87	2,66	0
95	8,54	3,05	15,49	5,46	0
96	8,54	3,05	15,49	5,46	0
97	8,54	3,05	15,49	5,46	0
98	8,54	3,05	15,49	5,46	0
99	8,54	3,05	15,49	5,46	0
100	8,54	3,05	15,49	5,46	0
101	8,54	3,05	15,49	5,46	0
102	8,54	3,05	15,49	5,46	0
103	10,22	2,37	16,05	6,52	0
104	10,22	2,37	16,05	6,52	0
105	10,22	2,37	16,05	6,52	0
106	10,22	2,37	16,05	6,52	0
107	10,22	2,37	16,05	6,52	0
108	10,22	2,37	16,05	6,52	0
109	10,22	2,37	16,05	6,52	0
110	6,10	4,01	118,2	22,63	0
111	3,05	1,23	0,00	1,77	0
112	3,05	1,23	0,00	1,77	0
113	13,28	1,54	18,02	9,45	0
114	13,28	1,54	18,02	9,45	0
115	13,28	1,54	18,02	9,45	0
116	20,90	7,80	47,59	8,34	206
117	13,28	1,54	18,02	9,45	0
118	3,05	0,62	19,71	3,11	0
119	13,28	1,54	18,02	9,45	0
120	13,28	1,54	18,02	9,45	0
121	13,28	1,54	18,02	9,45	0
122	0,00	0,00	2,82	0,00	0
123	15,72	1,60	27,59	5,90	0
124	0,00	0,00	2,82	0,00	0
125	15,72	1,60	27,59	5,90	0
126	15,72	1,60	27,59	5,90	0
127	15,72	1,60	27,59	5,90	0
128	6,10	1,54	25,34	4,88	0
129	15,72	1,60	27,59	5,90	0

Tabla 3: Número total de viajes con origen en cada zona de la ciudad.

6. Resultados y validación del modelo

Una vez que las seis matrices O-D, una para repartos a domicilio y cinco más para los diferentes sectores minoristas, fueron estimadas, se introdujeron en el simulador comercial EMME/2, con el objeto de efectuar una asignación conjunta de transporte privado y de mercancías. La matriz O-D para la movilidad privada en Sevilla ya había sido previamente introducida en el simulador.

Los resultados obtenidos de la simulación fueron los flujos de vehículos privados y de mercancías para todos los arcos en la red viaria de Sevilla. La figura 1 muestra un detalle de los mismos correspondiente al entorno del Centro Histórico de la ciudad, con los flujos de vehículos privados y de mercancías representados en él.

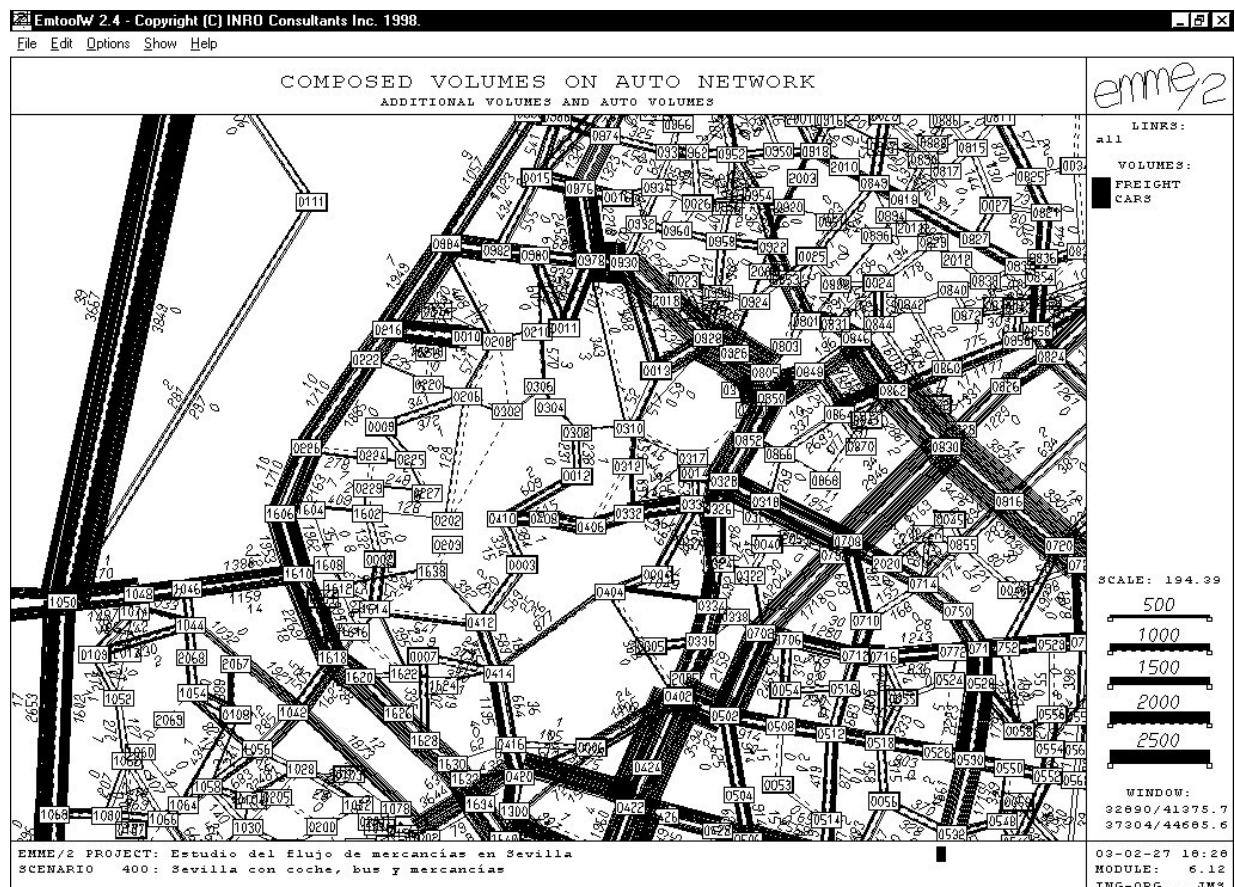


Figura 1: Flujos de tráfico para vehículos privados y de mercancías obtenidos por EMME/2 para el entorno del Centro Histórico de Sevilla.

La validación de los resultados obtenidos se llevó a cabo mediante la comparación con flujos de vehículos de mercancías medidos sobre el terreno en diferentes puntos de la ciudad. Los puntos elegidos corresponden a tramos del viario principal de Sevilla, y su distribución se muestra en la figura 2. La tabla 4, por su parte, contiene la comparación en tre los valores estimados y reales de los flujos de vehículos de mercancías en las localizaciones de la figura 2.

La comparación presentada en la tabla 4 muestra diferencias significativas entre los flujos reales de vehículos de mercancías y los estimados mediante el modelo, pero estas diferencias pueden ser debidas a varias razones:

- Los valores tomados de la realidad pretendieron incluir sólo los vehículos de mercancías con licencia, pero también podrían haberse incluido vehículos sin licencia, que representan una cantidad significativa, de acuerdo con FATRANS. Los vehículos con licencia llevan un distintivo especial, pero a veces un vehículo que ya no tiene licencia no retira el distintivo.
- Algunos de los vehículos contados podría no corresponder a desplazamientos hacia la zona destino, sino a desplazamientos dentro de esa zona para efectuar la ruta de reparto.
- En los puntos de conteo 1, 6 y 7, los valores estimados son significativamente inferiores al 50% de los valores reales. Pero estos puntos son los accesos principales a la ciudad desde el Oeste, Sur y Norte, respectivamente, lo que quiere decir que los flujos medidos incluyen una cantidad significativa de vehículos que acceden a la ciudad desde el exterior, es decir, de tráfico interurbano, no considerado en el análisis. Para disminuir este error, sería necesario extender el modelo al total de la región metropolitana de Sevilla, ya que varias de las terminales logísticas que sirven a la ciudad están ubicadas en las poblaciones adyacentes.

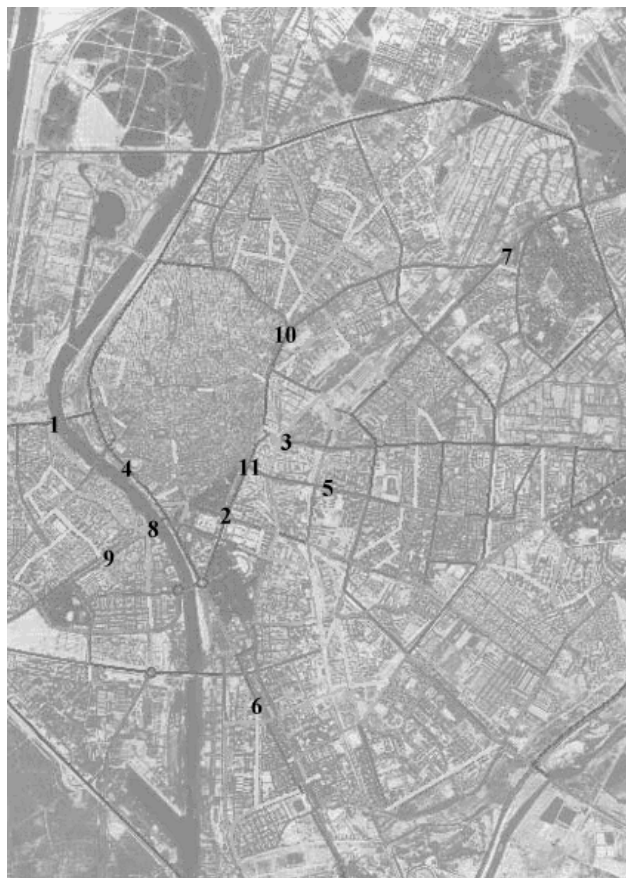


Figura 2: Localización de conteos de vehículos de mercancías distribuidos por la ciudad de Sevilla.

Por tanto, es necesario un refinamiento del modelo para un mayor ajuste a los datos reales. La introducción del tráfico metropolitano, siguiendo los mismos pasos presentados aquí, parece ser posible, necesitando sólo de la recolección de información secundaria para las poblaciones del área metropolitana de Sevilla.

Sin embargo, puede verse que el Segundo refinamiento necesario, la introducción de vehículos de mercancías sin licencia, no es una tarea factible, debido a la ausencia de cualquier valor relativo al número de vehículos implicados. Sería por tanto necesario el empleo de técnicas indirectas, como el ajuste de matrices O-D para cumplir condiciones de contorno (Spiess, 1990), con el objeto de modificar matrices precalculadas de forma que los flujos simulados a partir de ellas se ajusten a los flujos observados en determinados arcos del viario.

Nº	Localización	Dirección	Vehículos por hora (modelo)	Vehículos por hora (real)
1	Puente Cristo Expiración	Hacia el Centro	14	60
2	Ronda Histórica (Pasarela)	Horario	54	60
		Anti-horario	23	18
3	Luis Montoto	Hacia el Centro	30	72
4	Paseo Colón	Norte	29	66
		Sur	17	30
5	Eduardo Dato	Hacia el Centro	31	36
6	Avda. de la Palmera	Hacia el Centro	29	84
7	Kansas City	Hacia el Centro	7	72
8	Puente de San Telmo	Desde el Centro	63	54
9	República Argentina	Desde el Centro	24	36
10	Ronda Histórica (Trinidad)	Horario	34	42
11	Puerta Carmona	Hacia el Centro	29	54

Tabla 4: Comparación entre los resultados del modelo y conteos de vehículos de mercancías en diversos puntos de la ciudad.

Referencias

- [1] Bertsekas, D. (1995). Nonlinear programming. Athena Scientific.
- [2] Cohen, H. (1997). Future directions for freight modeling. Proceedings of the Urban Goods and Freight Forecasting Conference 1995. Federal Highway Administration.
- [3] De la Barra, T. (1989). Integrated land use and transportation modelling. Cambridge University Press.
- [4] Muñuzuri, J. (2003). La logística urbana de mercancías: soluciones, modelado y evaluación. PhD Thesis, University of Seville.
- [5] Spiess, H. (1990). A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem. EMME/2 Support Center.