

Estimación del consumo energético del transporte en el área metropolitana de Sevilla

Jesús Racero Moreno, Ricardo Galán de Vega, Marcos Calle Suárez, Fernando Jiménez Canelada

Departamento de Organización, Universidad de Sevilla, España. jrm@esi.us.es, rgalandevega@esi.us.es, mcs@esi.us.es, canelada@esi.us.es

Resumen

El siguiente trabajo presenta el diseño, desarrollo y aplicación de una metodología para la estimación del consumo energético (medido en litros de combustible) originado por el tráfico en las ciudades a partir de los procedimientos de asignación. El método de estimación se resume en 3 puntos, recogida y análisis de información, modelado de curvas de consumo y de la aplicación de un modelo de asignación y agregación de resultados. En la elaboración del proyecto se ha empleado la aplicación TRAMOS (Traffic and Transport Analysis, Modelling and Optimization System). TRAMOS es una herramienta para la planificación y el estudio de problemas de tráfico y transporte en el ámbito urbano y metropolitano.

Comparte algunas funcionalidades con otros paquetes comerciales como Emme2, TRIPS y Transcad en el campo de la planificación del transporte, TRAF-NETSIM, AIMSUM2 y SIMTRAFFIC en el campo de la simulación o SYNCRHO, CORSIM y CONTRAM en el campo de la regulación de señales semafóricas.

Finalmente la metodología ha sido aplicada a Sevilla y área metropolitana permitiendo comparar los resultados obtenidos con modelos existentes en el campo de consumo energético y ensayar soluciones de transporte para reducir el consumo.

Palabras clave: Consumo energético, Planificación del transporte, Asignación de tráfico

1. Introducción

Una tarea desafiante para la gestión y la planificación del transporte es desarrollar las soluciones para conseguir un sistema eficiente de transporte y que sea respetuoso con el medioambiente. La vida moderna exige una movilidad cada vez mayor. A menudo ésta se consigue mediante una creciente utilización de vehículos particulares. Esto implica la multiplicación de la demanda de tráfico sobre las ya sobrecargadas infraestructuras de transporte. A pesar de los ingentes gastos en nuevas infraestructuras viales, la congestión del tráfico sigue aumentando.

Es poco probable que estos problemas puedan resolverse simplemente construyendo más carreteras y partiendo únicamente de los enfoques del pasado. Parece evidente que se hace necesaria, entre otras opciones, la puesta en práctica de los sistemas inteligentes de transporte o ITS. Los sistemas inteligentes de transporte (ITS) abarcan un gran abanico de nuevas herramientas para la gestión de redes de transporte que prometen nuevas vías para conseguir una movilidad duradera en nuestra sociedad de la comunicación y de la información.

El consumo de combustible y las emisiones de motor de un vehículo son dos aspectos importantes que debieran considerarse a la hora de desarrollar la planificación del transporte urbano y por carretera. Estudios recientes realizados en Estados Unidos indicaban que el 45% de los agentes contaminantes lanzados al medioambiente eran consecuencia directa de las emisiones de los vehículos. Los vehículos de motor eran la fuente del 75% de las emisiones de CO que se producían en Estados Unidos y suponía cerca del 35% de las emisiones de HC y de NOx.

2. Revisión de la literatura

Los primeros modelos de estimación de consumo de combustible surgen a mediados de los años 80 donde Herman y Ardekani clasifican los modelos de estimación en tres categorías:

- a) **Modelos instantáneos**, también llamados modelos microscópicos, que relacionan el consumo de combustible, a distintos patrones de conducción y a las características de la carretera.
- b) **Modelos modales** que estiman a lo largo de un viaje, la porción de consumo de combustible asociado a cada condición de funcionamiento;
- c) **Modelos de velocidad media** que estiman el consumo de combustible en función de la velocidad media del viaje.

Los **modelos de consumo instantáneo** de combustible calculan el consumo de combustible basándose en medidas instantáneas de las variables explicativas (velocidad, condiciones de tráfico, energía y características del arcén). Debido a la desagregación de los datos de consumo, estos modelos suelen implementarse para evaluar el impacto energético en proyectos individuales de transporte, tales como en cruces, puntos de peaje, secciones de la carretera, etc. El primer modelo basado en consumo instantáneo fue desarrollado por Post (1994) donde el consumo de combustible depende de la tasa de consumo del vehículo pasivo más la potencia de eficiencia instantánea y un factor de eficiencia de consumo. Posteriormente el modelo original fue extendido por Alcelik (1989) basándose en la energía para la realización de estimaciones más exactas del consumo en diferentes modos de conducción dependiente de la velocidad del vehículo y datos geométricos de la carretera. Posteriormente y basado en la energía An y Ross (1993) desarrollan un modelo expresando el consumo de combustible de un vehículo en función de algunos parámetros del vehículo y de características del viaje.

Los **modelos de consumo modal** estudian las diversas condiciones de funcionamiento que experimenta un vehículo en un viaje típico. Este tipo de modelo considera que los elementos asociados al modo de conducción, son independientes frente a los de otros modos, siendo la suma del consumo de todos ellos igual al consumo total de combustible. La ventaja de este modelo es su simplicidad, generalidad y claridad conceptual, así como la relación directa con las técnicas existentes de modelado del tráfico (Richardson, 1991).

El principal problema que presenta estos modelos es indicar las diferencias en el comportamiento de los conductores, tales como las maniobras de aceleración y frenadas, o los distintos comportamientos de un mismo conductor bajo diversas situaciones. Baker (1994) intenta superar estas limitaciones empleando una simple relación entre aceleración/frenada y la velocidad permitiendo mostrar las diferencias en los comportamientos de los conductores.

Posteriormente Dion (1999, 2000) desarrolla un modelo mesoscópico que estima el consumo medio de un vehículo basándose en la velocidad media, el número medio de paradas de los vehículos por unidad de distancia, y la duración media de la parada para ocho vehículos de baja potencia.

Los **modelos de consumo basados en la velocidad media** relacionan el consumo de combustible con el tiempo de viaje, o recíprocamente con la velocidad media. Estos modelos son convenientes para estimar el consumo total de combustible del tráfico en sistemas urbanos grandes y para asesorar a los centros de gestión de tráfico, ya que éstos influyen sobre las velocidades medias.

Los primeros modelos están basados en procedimientos estadísticos de segundo grado para estimar el consumo de combustible de un vehículo, los modelos están desarrollados para alta velocidad y ciclos de conducción con velocidad uniforme, proponiéndose dos modelos. El primero de estos modelos relaciona el consumo de combustible de un vehículo con la velocidad media de viaje, el tamaño del motor y el peso del vehículo para una conducción urbana. El segundo modelo estima el consumo de combustible usando las mismas variables con la diferencia que es válido para condiciones de conducción rural. Por último destacar los trabajos desarrollados por Herman y Ardekani (1995) donde se establecen dos tramos de velocidades para estimar el consumo.

3. Metodología para la obtención del consumo energético

La mayoría de los métodos aplicados en la estimación del consumo están basados en modelos de simulación microscópica donde a partir del comportamiento individual de cada vehículo se estima el consumo energético. El procedimiento empleado en este trabajo se centra en la aplicación de modelos de consumo basados en velocidades medias obtenidas a partir de procedimientos de asignación de tráfico.

La metodología está compuesta por un conjunto de actividades que se subdividen en una serie de tareas donde se especifican las herramientas necesarias y resultados obtenidos en cada actividad. Las actividades definidas son:

Actividad 1. Recogida y análisis de la información. El objeto de esta actividad es la clasificación del parque automovilístico para obtener un árbol de probabilidades, donde cada categoría a la que pueda pertenecer un vehículo tenga asignada una probabilidad o porcentaje.

La clasificación jerárquica del parque automovilístico viene determinada por los siguientes parámetros: Antigüedad del parque, el tipo de vehículo, la cilindrada y el tipo de combustible.

Actividad 2. Diseño y calibración de las funciones de consumo. El modelo de consumo de combustible empleado relaciona la velocidad media del vehículo en un tramo con el consumo de combustible en la vía, proporcionando el consumo por unidad de distancia y vehículo.

Las expresiones de consumo empleadas son las proporcionadas por Herman y Ardekani (1985) con la salvedad de las constantes que serán propias de la zona en estudio (1) (2).

$$\phi^1 = k_1 + k_2 / v \quad \text{para } v \leq 56 \text{ km/h} \quad (1)$$

$$\phi^2 = k_3 + k_4 / v \quad \text{para } v > 56 \text{ km/h} \quad (2)$$

donde :

ϕ = Consumo por unidad de distancia y por vehículo. (l / Km·Veh)

k_1, k_2 = Constantes

k_3, k_4 = Constantes

v = Velocidad media del tramo

En función de la clasificación realizada mediante el análisis del parque automovilístico, se ajustan las funciones de consumo para cada categoría. El proceso comprende las siguientes tareas

Tarea 1. Establecimiento de los rangos de consumo para cada categoría. Por cada tipo de vehículo y según la antigüedad se establecen los rangos de consumo de cada categoría, en función de los datos proporcionados por los fabricantes.

Tarea 2. Calibración de las funciones de consumo. Para cada categoría, se ajusta la función de consumo a los rangos establecidos en el paso anterior.

Actividad 3. Estimación de consumo energético de vehículos privados. Para estimar el consumo de combustible es necesario estimar la velocidad media mediante la aplicación de un modelo de asignación tráfico. Antes de proceder a la asignación de tráfico es necesario realizar una serie de tareas que permita validar y calibrar los resultados. Las tareas realizadas previas a la asignación son:

- a) Revisión de datos: Se debe comprobar si la red o grafo empleado en la asignación se ajusta al viario real, para ello se comprueban los sentido de circulación, número de carriles, giros permitidos en las intersecciones y las funciones de coste (funciones volumen retraso) asignadas a cada tramo.
- b) Calibración de la matriz O/D. El modelo de asignación emplea una matriz de viajes para la obtención de las intensidades de tráfico. Los resultados obtenidos (intensidad de circulación o flujo) de la aplicación de la matriz al modelo de asignación no tienen por que coincidir con los datos reales observados mediante mediciones de campo. Para ajustar los datos reales a los resultados del modelo de asignación es a veces necesario emplear procedimientos de calibración previos a la asignación. TRAMOS dispone de herramientas para calibrar estas matrices.
- c) Proceso de asignación con la nueva matriz calibrada y con el viario revisado obteniendo las intensidades de tráfico en cada calle.
- d) Estimación de la velocidad media y consumo a partir de la intensidad de tráfico, la longitud del tramo y la función volumen retraso asignada a la calle. Finalmente se agregan los datos por categorías de vehículos y viario proporcionando el consumo total del área de estudio.

4. Aplicación de la metodología de estimación de combustible a la ciudad de Sevilla y área metropolitana

La metodología descrita ha sido aplicada al cálculo del consumo energético a la ciudad de Sevilla.

La primera actividad consiste en el análisis del parque automovilístico. Para ello se clasifican los vehículos en diferentes categorías, obteniendo una tabla de probabilidades.

La clasificación jerárquica del parque automovilístico tiene en cuenta: Antigüedad del parque, el tipo de vehículo, la cilindrada y el tipo de combustible.

Antigüedad del parque. Los vehículos se clasifican en tres categorías, anteriores al año 1982, entre el año 1982 y 1992 o posterior al 1992.

Tipo de Vehículo. Autobús, camión o furgoneta, tractor, turismo, motocicleta o por el contrario otro tipo de vehículo.

Cilindrada. Se ha realizado la clasificación por cilindrada para turismos y motocicletas. En motocicletas se distingue entre las menores de 75 c.c., de 76 a 125 c.c., de 126 a 250 c.c., de 251 a 500 c.c. y las mayores de 500 c.c. En turismos, las cilindradas menores de 1199 c.c., de 1200 a 1599 c.c., de 1600 a 1999 c.c. y los mayores de 1999 c.c.

Tipo de combustible. Si el combustible que utiliza el vehículo es gasolina o gasoil.

Los datos a partir de los cuales se ha construido la tabla de probabilidades, han sido extraídos del anuario estadístico general del 2002 publicado por la Dirección General de Tráfico y se refieren al parque automovilístico nacional.

El árbol de probabilidades obtenido a partir de los datos del parque automovilístico (Tabla 1) corresponde a los vehículos matriculados entre el año 1993 y el 2002. Los valores que aparecen en la columna de la derecha son probabilidades totales.

Tabla 1. Probabilidades totales para vehículos privados posteriores a 1992

1993 - 2002	Camiones	Gasolina		0,0093
		Gas - oil		0,0840
	Turismos	Hasta 1199 c.c.	Gasolina	0,0247
			Gas - oil	0,0205
		1200 - 1599 c.c.	Gasolina	0,0792
			Gas - oil	0,0655
		1600 - 1999 c.c.	Gasolina	0,1200
			Gas - oil	0,0992
		Más de 1999 c.c.	Gasolina	0,0225
			Gas - oil	0,0186
	Motocicletas	Hasta 75 c.c.	Gasolina	0,0011
			Gas - oil	0,0000
		76 - 125 c.c.	Gasolina	0,0055
			Gas - oil	0,0000
		126 - 250 c.c.	Gasolina	0,0052
			Gas - oil	0,0000
		251 - 500 c.c.	Gasolina	0,0013
			Gas - oil	0,0000
	Más de 500 c.c.	Gasolina	0,0070	
		Gas - oil	0,0000	
Otros Vehículos	Gasolina		0,0078	
	Gas - oil		0,0046	

La siguiente actividad es el diseño y la calibración de las funciones de consumo El proceso consta de dos pasos:

En el primero, para cada tipo de vehículo, cilindrada y tipo de combustible, se determinan los rangos de consumo de combustible. Están basados en los datos de consumo en ciudad proporcionados por los fabricantes de vehículos y hacen referencia a cada categoría.(Tabla 2).

Para establecer los rangos de consumo de combustibles de los turismos posteriores al año 1993 se ha utilizado los datos extraídos de la “*Guía de Vehículos Turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO2. Directiva Europea 1999/94CE. Real Decreto 837/2002*” del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía.

Tabla 2. Rangos de consumo de combustible en vehículos posteriores a 1992

Rangos de consumo (l / 100 km)				
			Mínimo	Máximo
Camiones	Gasolina		21,800	46,540
	Gas - oil		13,720	28,710
Turismos	Hasta 1199 c.c.	Gasolina	6,470	9,640
		Gas - oil	3,330	4,770
	1200 - 1599 c.c.	Gasolina	6,890	12,150
		Gas - oil	5,330	6,990
	1600 - 1999 c.c.	Gasolina	7,650	14,730
		Gas - oil	5,810	11,480
	Más de 1999 c.c.	Gasolina	11,300	22,740
		Gas - oil	8,140	14,900
Motocicletas	Hasta 75 c.c.	Gasolina	2,000	2,000
		Gas - oil	-	-
	76 - 125 c.c.	Gasolina	2,520	3,500
		Gas - oil	-	-
	126 - 250 c.c.	Gasolina	2,530	4,000
		Gas - oil	-	-
	251 - 500 c.c.	Gasolina	4,520	7,500
		Gas - oil	-	-
	Más de 500 c.c.	Gasolina	6,360	8,500
		Gas - oil	-	-

Los datos de consumo de combustible en ciudad y carretera proporcionados por los fabricantes corresponden a 1423 turismos de gasolina y 774 de gasoil. Se han agrupado por cilindrada y se ha realizado un tratamiento estadístico para establecer los rangos de consumo de la cilindrada en función de los rangos de consumo de la gama de vehículos (Tabla 3).

Tabla 3. Datos de consumo por cilindradas posteriores a 1992

Cilindrada		Consumo (l/100km)			
		Gasolina		Gasoil	
		Carretera	Ciudad	Carretera	Ciudad
Hasta 1199 c.c.	Mínimo	4,90	6,47	3,00	3,33
	Máximo	7,30	9,64	4,30	4,77
	Media	6,14	8,10	3,50	3,89
	Cuartil (75%)	6,30	8,32	3,75	4,16
1200-1599 c.c.	Mínimo	5,10	6,89	4,20	5,33
	Máximo	9,00	12,15	5,50	6,99
	Media	7,11	9,60	4,50	5,72
	Cuartil (75%)	7,70	10,40	5,20	6,60
1600-1999 c.c.	Mínimo	5,50	7,65	4,40	5,81
	Máximo	10,60	14,73	8,70	11,48
	Media	8,61	11,96	5,80	7,66
	Cuartil (75%)	9,20	12,79	6,50	8,58
Des de 1999 c.c.	Mínimo	7,90	11,30	5,90	8,14
	Máximo	15,90	22,74	10,80	14,90
	Media	11,18	15,99	8,30	11,45
	Cuartil (75%)	12,10	17,30	9,40	12,97

A continuación se calibran las funciones de consumo siendo necesario la obtención de las constantes a partir de los datos recogidos en el paso anterior, para ello disponemos de los

datos de consumo de combustible en ciudad proporcionados por los fabricantes (“*Guía de Vehículos Turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO2. Directiva Europea 1999/94CE. Real Decreto 837/2002*” del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía).

La calibración de las constantes esta basada en los rangos de consumo que caracterizan a los vehículos que forman parte de cada categoría.

El significado de las constantes utilizadas en las funciones de consumo son:

k_1 : Es la media de consumo de combustible en ciudad.

k_2 : Es el valor que hace máximo el consumo en ciudad a 10 km/h

k_3 : Es el consumo medio de combustible en carretera.

k_4 : Constante que hace máximo el consumo a una velocidad de 10 km/h

La velocidad de 10 km/h es el umbral por debajo de la cual se considera situación de congestión, por lo que se ha tomado como velocidad de máximo consumo.

Para obtener la constante k_4 también se ha tomado la velocidad de máximo consumo de 10 km/h. De esta forma la curva se adapta mejor al modelo de Herman y Ardekani, ya que con velocidades mayores no se acentúa la discontinuidad existente a 56 km/h. Hay que tener en cuenta que el modelo está basado en velocidades medias y que cuando son superiores a 56 km/h se emplean menos paradas y las marchas largas actúan durante más tiempo. Aún así, no es un comportamiento puro de conducción en carretera, por lo que se ha considerado el consumo máximo a la misma velocidad. A velocidades medias menores el consumo será mayor, pero a estas velocidades la pendiente de la curva de consumo será muy pequeña (Figura 1).

Finalmente se procede a la última actividad que comprende la revisión del viario y calibración de la matriz Origen-Destino. La revisión del viario engloba definición del viario nodos y tramos, zonificación para la construcción (220 zonas) y posterior calibración de la matriz O/D y asignación de funciones volumen retraso a los tramos.

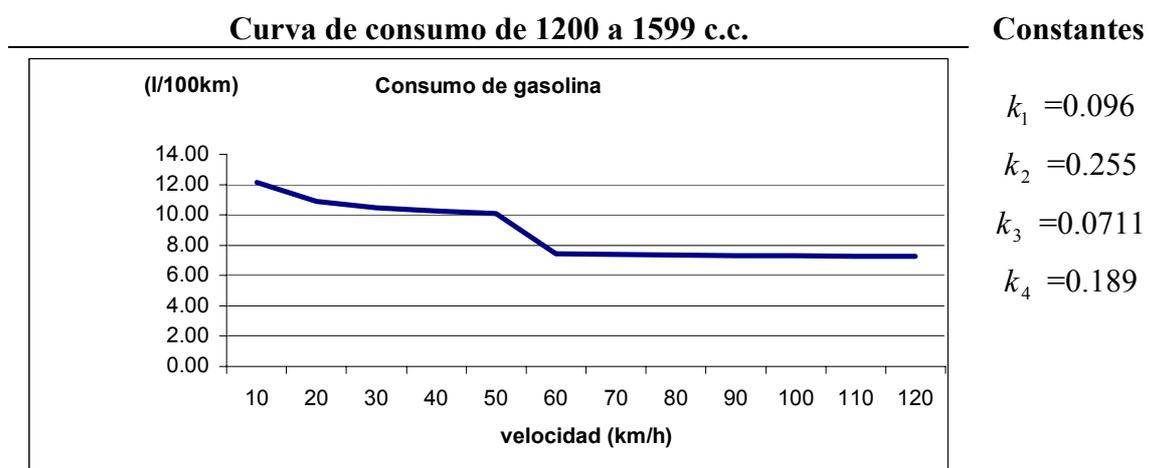


Figura 1. Consumo de gasolina en turismos con cilindrada entre 1200 y 1599 c.c.

La matriz O/D que se dispone para la ciudad de Sevilla corresponde al estudio de movilidad realizado en 1996, siendo necesaria la calibración de la matriz y su extrapolación al año 2003.

La calibración de la matriz es un proceso que se realiza a partir de la información de los detectores magnéticos situados estratégicamente en el viario. En la ciudad de Sevilla existe aproximadamente 700 detectores que agrupados en puntos de medida indican la intensidad de tráfico en diversos puntos del viario (Figura 2).

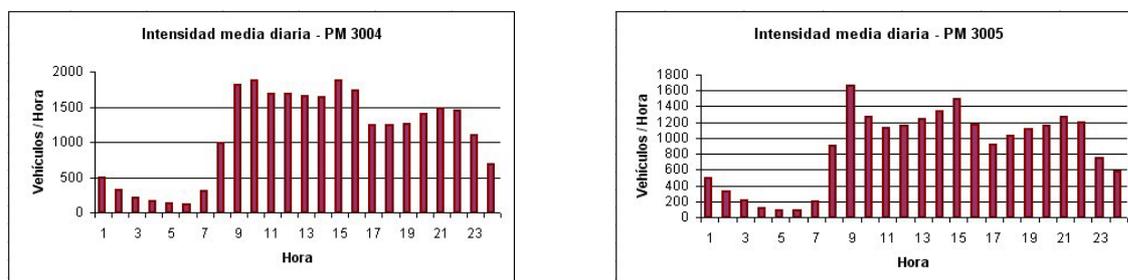


Figura 2. Intensidad horaria según datos de detectores

El procedimiento de calibración está basado en el modelo de asignación donde se actualiza la matriz O/D para ajustar los resultados reales obtenidos mediante observación, a los resultados obtenidos mediante asignación.

Los resultados obtenidos (Tabla 4) muestra que el el consumo por vehículo de 2,1794 litros al día

Tabla 4. Consumo diario de combustible

Tipo de vehículo	Consumo (l)
Autobuses	24.332
Camiones y Furgonetas	473.112
Turismos	749.444
Motocicletas	29.294
Otros vehículos	17.047
Total	1.293.229

Para la calibración y validación del modelo se ha estudiado el número de desplazamientos que realizan los residentes del Área Metropolitana en un día laborable (2.593.949 de los cuales el 55% son viajes mecanizados). El volumen de viajes supone una tasa de generación de 2,28 viajes por habitante. Sabiendo que de los 593.394 vehículos que circulan en el área metropolitana, el 77% son turismos y que el consumo diario de éstos es de 749.444 litros, calculamos el consumo diario de combustible por turismo, que es de 1,6949 litros. Si el consumo medio estimado en ciudad en de 10 litros /100km la distancia media diaria recorrida por un turismo sería de 16,40 km. Esta distancia sería la equivalente a la que recorrería un vehículo sin efectuar paradas y en condiciones de fluidez en la circulación.

Antes de mostrar los resultados obtenidos mediante la metodología expuesta se ha comparado los resultados obtenidos con el modelo de Herman-Ardekani. (Tabla 5)

Tabla 5. Comparativa en litros de los resultados de consumo en ambos modelos

	Modelo HermanArdekani	Modelo diseñado
8 a 9 horas	54.448	91.431
24 horas	912.565	1.293.229

Como puede observarse en la tabla anterior, los resultados correspondientes al modelo de Herman–Ardekani son inferiores a los del modelo diseñado. El consumo estimado mediante el modelo diseñado supone cerca de un 60 % más que el consumo del modelo de Herman–Ardekani. El modelo de Herman–Ardekani únicamente considera una función de consumo, que está basada en las características técnicas de un determinado tipo de turismo, y la aplica a todos los vehículos. Asume por tanto, que el parque automovilístico es homogéneo. Por otra parte, el modelo no realiza ningún tipo de distinción en el tipo de combustible empleado, no pudiéndose realizar un análisis exhaustivo de los resultados de consumo obtenidos.

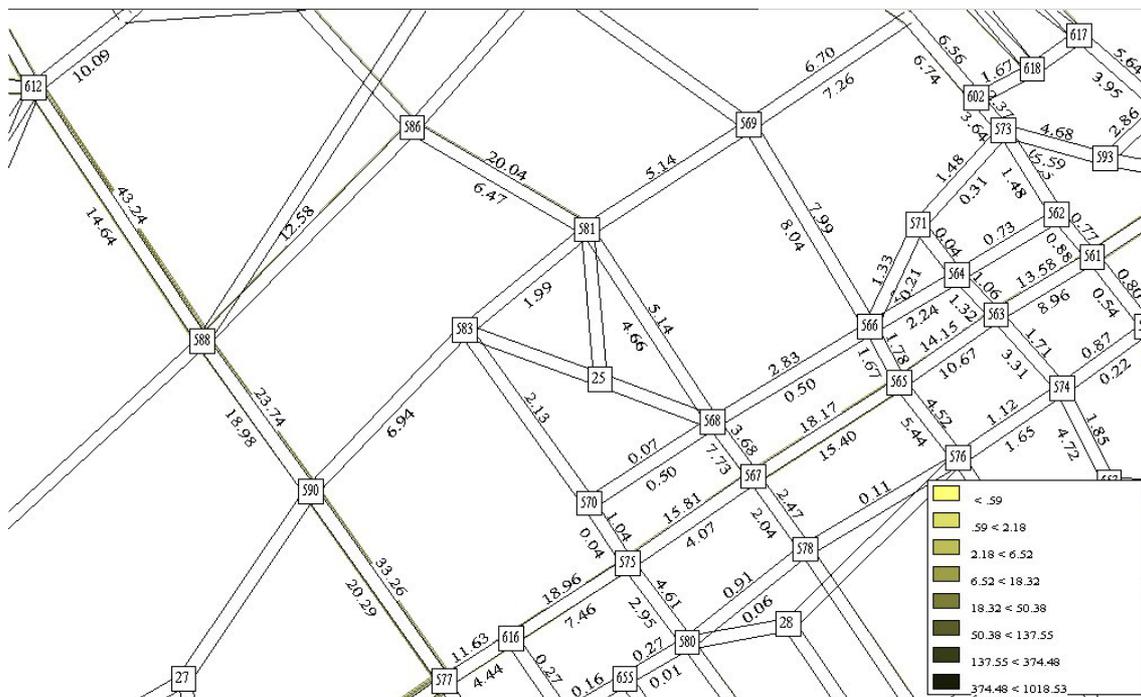


Figura 3. Mapa de consumo

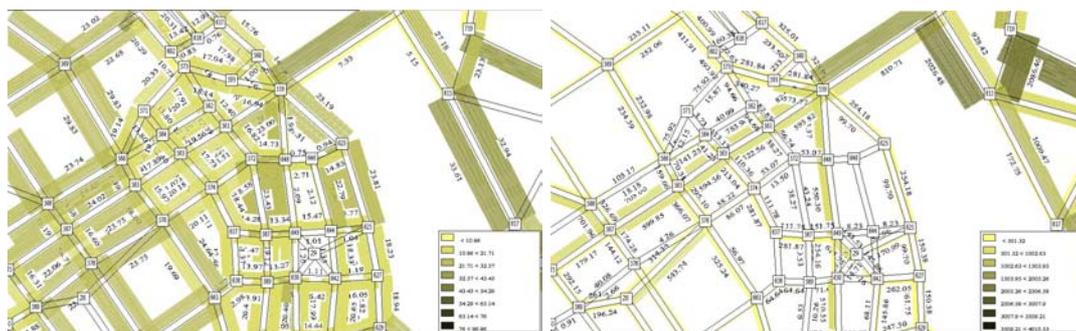


Figura 4. Mapa de velocidades e intensidades

Referencias

- AKCELIK, R. (1985) An Interpretation of the parameters in the Simple Average Travel Speed Model of Fuel Consumption, Australian Road Research No. 15, Melbourne.
- AKCELIK, R. (1989) Efficiency and Drag in the Power-Based Model of Fuel Consumption, *Transportation Research* 23B, 376-385.
- AN, F., y M. ROSS (1993) Model of Fuel Economy with applications to Driving Cycles & Traffic Management, *Transportation Research Record*, Washington, D.C.

AN, F., y M. ROSS (1993) A Model of Fuel Consumption and Driving Patterns, SAE Paper No. 930328.

BAKER, M. (1994) *Fuel Consumption and Emission Models for Evaluating Traffic Control and Route Guidance Strategies*, Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. *Anuario Estadístico general 2002*. I.S.B.N.: 84-8475-010-8

HERMAN R. y ARDEKANI, S. (1985) The Influence of Stops on Vehicle fuel consumption in Urban Traffic, *Transportation Science*, 19, 1-12

EDWARDS H (1999): Traffic Assignment Analysis and O/D-matrix Calibration, KFB & VTI forskning/research (forthcoming).

FISK, C. S. (1989) The Australian Road Research Board instantaneous model of fuel consumption. *Transportation Research*

HOROWITZ, J.L., (1982) *Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning*. MIT Press, Cambridge, Mass., 387 pp.

Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. *Guía de Vehículos Turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO2. Directiva Europea 1999/94CE. Real Decreto 837/2002*.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (1995) *Expanding Metropolitan Highways: Implications for Air Quality and Energy Use*, National Academy Press, Washington, D.C.

NIZICH, S.V., T.C. MCMULLEN, AND D.C. MISENHEIMER (1994). *National Air Pollutant Emissions Trends, 1900-1993*. EPA-454/R-94-027. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N.C., Oct., 314 PP.

POST K (1984) Fuel consumption and emission modeling by power demand and a comparison with other model. *Transportation Research 18A*, 191-213.

RACERO J. (2002) Técnicas de simulación y planificación de transporte para el estudio de problemas de tráfico en entornos urbanos y metropolitanos. Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas.

Revistas de automovilismo en publicación impresa e Internet. *Autopista, A todo motor, Quinta Marcha, en ediciones actuales y antiguas*.

RICHARDSON A.J., y AKCELIK, R. (1981) *Fuel consumption Models and Data Needs for the design and Evaluation of Urban Traffic System*, Australian Road Research Board, Report No.ARR 124, September

Sociedad de Estudios Económicos de Andalucía, S.A. *Anuario Estadístico de la Ciudad de Sevilla 2001*.