



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Diagnóstico energética y medioambiental debida al transporte

Autor: **Jesús Racero Moreno**

Institución: **Universidad de Sevilla**
E-mail: **jrm@esi.us.es**

Otros autores: **Jesús Escámez, ;Manuel Bada, Cristina Martín**



RESUMEN:

En pleno comienzo del siglo XXI el Cambio Climático es uno de los mayores retos a los que se enfrenta el mundo. A partir del Protocolo de Kyoto (1997) se ha comenzado a tomar plena conciencia de la situación. Actualmente el sector del transporte es responsable del 41% de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, siendo el transporte por carretera responsable de hasta un 80% de las emisiones debidas al transporte. Así mismo, el consumo de energía final en el transporte está relacionado con las emisiones de CO₂ a la atmósfera, fruto de la combustión de carburantes en los vehículos. En la Unión Europea, las emisiones de CO₂ aumentaron un 21% entre los años 1985 y 1996, y según los modelos de evolución de emisiones, se estima que para 2010 éstas habrán crecido un 39% con respecto a 1990, muy lejos de la reducción del 8% en las emisiones de CO₂ respecto a los niveles de 1990 que exige el protocolo de Kyoto. Esta problemática es afrontada desde tres frentes: el punto de vista local a través de tratados como la Agenda 21; a nivel nacional mediante el IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía) con programas de movilidad sostenible; y a nivel europeo con documentos como el Libro Blanco “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”. En todos los casos se plantea la necesidad de adoptar medidas eficaces de manera decidida y urgente. La movilidad sostenible engloba un conjunto de procesos y acciones orientados para conseguir como objetivo un uso racional de los medios de transporte por parte tanto de los particulares como de los profesionales. Es decir reducir el número de vehículos que circulan para disminuir las emisiones y consumo energético. Tanto en el marco del IDAE como de la agenda 21 local se está fomentado programas de movilidad sostenible denominándose según el marco de actuación en Planes de movilidad para trabajadores (PMT) y Planes de movilidad urbana sostenibles (PMUS). Los PMUS actúan a nivel local o metropolitano para garantizar la accesibilidad y las necesidades de movilidad de municipios, cubren todo los modos de transporte y están relacionados con planes y estrategias locales, regionales y nacionales. En general, las fases para elaborar un Plan de Movilidad Sostenible en un municipio o área metropolitana son: consenso de los agentes implicados; Preparación y asignación de responsabilidades a través de grupos de trabajo y del coordinador del plan. Elaboración del diagnóstico de movilidad del municipio para posteriormente definir los objetivos y los escenarios futuros y finalmente elaborar el plan de movilidad acorde a los objetivos, puesta en funcionamiento y seguimiento. Las fases de diagnóstico y seguimiento definen y utilizan indicadores para analizar el cumplimiento de objetivos y evaluar las estrategias diseñadas. La disponibilidad de herramientas de evaluación de estrategias y escenarios futuros se hace necesaria para analizar y aumentar la calidad de las actuaciones previo a la implantación. Las principales herramientas empleadas en el análisis de la movilidad se basan en modelos de planificación del tráfico o bien desde un enfoque más localizado, la simulación microscópica. El siguiente trabajo se enmarca en el análisis, adecuación y aplicación de herramientas de evaluación de planes de movilidad sostenible. El trabajo describe los modelos de estimación de emisiones atmosférica, ruido y consumo energético para su integración en herramientas asociadas al análisis de la movilidad. Finalmente se describe una aplicación.



1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la contaminación atmosférica es un serio problema para la gestión y planificación de áreas urbanas. A nivel Europeo, el transporte por carretera es uno de los principales sectores emisores de contaminantes, suponiendo el 23% de gases con efecto invernadero (CO₂), 66% de las emisiones de NO_x, 87% de óxidos de carbono (CO), 2,5% de dióxido de azufre (SO₂) y fuente de emisiones compuestos volátiles (VOC) (Covile, 2001).

Con relación al transporte, las autoridades tienen la capacidad de influir sobre la reducción de emisiones y la eficiencia del consumo mediante la aplicación de estrategias, como es la imposición de normativas que limiten las emisiones a los nuevos vehículos fabricados, actuaciones que no incentiven el uso del vehículo privado o fomentar modos de transporte más sostenible.

Actualmente, la no disponibilidad de herramientas que permitan evaluar a priori estrategias de mejora de la eficiencia energética y reducción de emisiones es un handicap que imposibilita el buen funcionamiento de las autoridades en temas medioambientales y tráfico.

El siguiente trabajo presenta una herramienta para la realización de inventarios de emisiones atmosférica y consumo energético debida al tráfico urbano con capacidad para analizar y evaluar estrategias de mejora de la calidad medioambiental.

2. METODOLOGÍA

2.1 Métodos de inventario de emisiones contaminantes

Los métodos de estimación de inventario de emisiones atmosférica debida al tráfico están compuestos por dos fases (Bailey, 1995), (Journard, 1998). La primera fase se centra en determinar la intensidad de tráfico y velocidad media de circulación. Esta información puede ser obtenida bien mediante modelos de transporte (Cardelina, 1998) o contadores/detectores de tráfico (Baldasano, 1998). La segunda fase tiene como objetivo la clasificación del parque automotor para posteriormente definir las expresiones y factores de emisión (por contaminante) en función de la distancia recorrida, velocidad y tipo de vehículos.

Los métodos para la realización de inventario de emisiones pueden ser de dos tipos (COST, Journardm 1998):

a) **Métodos Bottom-up o microescala**, donde las estimaciones son realizadas a nivel de calle en todo el área de estudio para posteriormente ser agregados y agrupados por categorías, zonas, horarios....(Negrete, 1995)

b) **Métodos Top-Down o macroescala**, caracterizado por que las estimaciones son realizados de forma agregada en tiempo y zona. (Zachariadis, 1995)

Los métodos Top-Down son empleados cuando la información existente está desfasada o anticuada o bien es muy difícil obtener información desagregada. En muchos casos este tipo de métodos se emplean en ciudades de tamaño mediano/pequeño donde la



información sobre movilidad, y composición del parque automotor es complicada de obtener.

Fundamentalmente, ambos métodos se diferencian en los datos de entrada y en la presentación de los resultados obtenidos. Independiente de la metodología empleada, la estimación de las emisiones contaminantes debida al tráfico utiliza expresiones diseñadas, validadas y recomendadas por entidades gubernamentales. En Europa, las expresiones de estimación de emisiones debida al tráfico urbano están recogidas en el capítulo 7 de la guía EMEP/CORINAIR (EMEP/CORINAIR, 1999), donde se provee de un software, COPERT (Ntziachristos, 2000), para la automatización del proceso. El modelo matemático recogido en COPERT (Ntziachristos, 2000) está basado en la descripción de la flota de vehículos y una serie de parámetros genéricos como son el consumo de combustible, función de emisión por tipo de contaminante, dependiente de la velocidad, la velocidad media, la distancia media recorrida por vehículo y la tipología de conducción.

En los Estados Unidos, la EPA (Environmental Protection Agency) propone la metodología MOBILE (EPA, 2002). Finalmente, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) recomienda la utilización de métodos de inventarios muy similares a los seguidos en Europa y EEUU pero con menor grado de detalle (IPCC, 1997).

En la literatura, el análisis de resultados es realizado en tres niveles de agregación (espacial, temporal o por categoría de vehículo). El nivel de detalle depende de los objetivos fijados en el estudio, regional frente a control de tráfico y contaminación local, y de la disponibilidad de información y tiempo necesario para obtener resultados.

La mayoría de los inventarios de emisiones realizados en la literatura se basan en metodologías Top-down (Journard, 1998, Negrenti, 1995) donde el nivel de precisión es bajo o solo analizan un número pequeño de calles. El enfoque seguido en este trabajo está basado en un enfoque Bottom-Up donde se estima las emisiones contaminantes en una hora del día para toda una ciudad (hora punta). La intensidad del tráfico en cada calle de la ciudad se obtiene mediante la resolución óptima de un modelo de asignación cuyos resultados han sido calibrados mediante contadores de vehículos.

2.2 Métodos de inventario del consumo energético

Los modelos de estimación del consumo de combustible pueden agruparse en tres categorías principales:

1. Modelos instantáneos, también llamados modelos microscópicos
2. Modelos modales
3. Modelos de velocidad media.

Los modelos de consumo instantáneos relacionan el consumo de combustible, los datos históricos asociados a distintos patrones de conducción y las características de la carretera. Es decir, calculan el consumo de combustible basándose en medidas instantáneas de las variables explicativas. En estos modelos, el consumo de combustible proviene de una relación entre las tasas de consumo de combustible y la energía instantánea del vehículo. Como ejemplos de variables explicativas se pueden incluir la velocidad del vehículo, las condiciones de tráfico, la potencia del vehículo y las



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 análisis de cruces, puntos de peaje, secciones de la carretera, etc.

El primer modelo desarrollado en 1994, establece una relación lineal entre el consumo de combustible y la energía (Post et al, 1994). Posteriormente este modelo fue extendido por Australian Road Research Board donde se incorpora factores de conducción basados en la velocidad de los vehículos (Alcelik, 1989). Estos trabajos se han complementado desarrollando métodos donde el consumo de combustible se expresa en función de las características del vehículo y del viaje que se está realizando (Anh and Ross, 1993).

Los modelos de consumo modal expresan el consumo del combustible en función de las condiciones de funcionamiento, este tipo de modelo muy similar a los instantáneos se caracteriza por su simplicidad, generalidad y claridad conceptual (Richardson et al 1981). Estos modelos no permiten especificar el comportamiento del conductor, por ello Baker (Baker, 1994) introdujo relaciones de aceleración y velocidad para expresar la diversidad en la conducción.

Los modelos de consumo basado en velocidad media han sido los más extendidos, donde relacionan el tiempo de viaje y el consumo de combustible (Evans and Herman, 1978). Estos modelos son los recomendados para estimar el consumo en grandes áreas urbanas. En este ámbito, se han desarrollado modelos estadísticos como el de Lam (Lam, 1995) que permite la estimación del consumo de combustible a altas velocidades.

2.3 Diseño de la metodología de estimación del consumo de combustible

La metodología empleada está dividida en dos fases (figura 1). La primera fase está orientada a la estimación de la intensidad de tráfico y la velocidad media en cada calle del viario. La segunda fase consiste en la estimación del consumo y emisiones por tramo o calle y categoría de vehículo. Los datos de entradas del modelo de asignación son:

1. Descripción detallada del viario (Oferta). Especificación de longitud, número de carriles y función volumen-retraso. Las funciones volumen retraso permiten estimar el tiempo de viaje en cada calle en función del tráfico que circula por ella. Existen diferentes funciones volumen-retraso (Figura 1) clasificadas según características del viario (nº carriles, ancho, localización de la calle, etc)

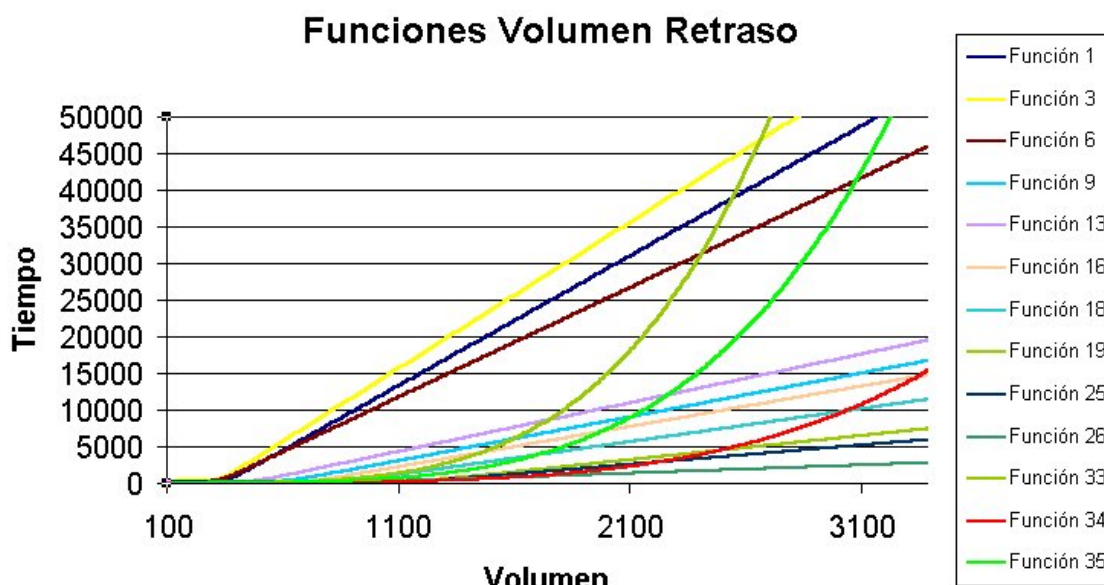


Fig. 1. Funciones volumen retraso

2. Demanda de viajes expresada en forma de matriz Origen-Destino. Esta matriz sintetiza la movilidad horaria entre zonas. La matriz de demanda es actualizada a partir de los datos de contadores mediante procesos de calibración y extrapolación.

El modelo de asignación empleado para la estimación del flujo de tráfico es una extensión del modelo propuesto por Beckman (Beckman, 1956)). El modelo se caracteriza por que contempla las dos condiciones de Wardrop (Wardrop, 1952) y puede ser resuelto de forma óptima mediante la aplicación del algoritmo de Frank-Wolfe (Frank, 1956).

La segunda fase estima las emisiones contaminantes e inventario energético en todos los tramos en base a las velocidades medias y las expresiones matemáticas propuestas en COPERT (Ntziachristos, 2000) y en función de la adaptación de las expresiones de consumo lineal. Las ecuaciones para la estimación de emisiones están clasificadas por categoría de vehículo y tipo de contaminante. Cada categoría está caracterizada por diversos factores como legislación vigente en la matriculación (antigüedad), tipo de vehículo (cilindrada, combustible) y clase (camión, coche, furgoneta).

Finalmente, los resultados obtenidos en la fase 2 pueden ser agregados para describir la contribución de cada tipo de contaminante por tramos o realizar estudios zonales.

3. INVENTARIO DE EMISIONES EN LA ZONA METROPOLITANA DE SEVILLA

El proceso descrito en el apartado anterior ha sido empleado para la obtención de un inventario de emisiones contaminantes y consumo energético debida al tráfico urbano. En concreto se ha utilizado como escenario la zona urbana y metropolitana de Sevilla. La zona presenta una población superior al millón de habitantes donde el vehículo privado es el principal medio de transporte.

La primera fase aplicada a Sevilla ha sido dividida en tres tareas: Actualización del viario, obtención de los flujos o intensidad de tráfico y estimación de la velocidad media. Para la

obtención de flujos se ha utilizado una herramienta de planificación de transporte (Racero,2003) donde se han actualizado los datos del viario (modo de transporte, longitud, números de carriles), se han definido las funciones volumen-retraso (35 funciones) por tipología de calles y se ha utilizado una matriz de demanda (actualizada con datos de contadores) de movilidad de 8 a 9h de la mañana.

Modelado el viario (Oferta) y la demanda de viajes se procede a la resolución del modelo de asignación que ofrece, por cada tramo, el volumen o intensidad de vehículos. La herramienta desarrollada, contiene un módulo de resolución del algoritmo de asignación que completamente integrado con el sistema de información geográfica ofrece resultados gráficos y no gráficos sobre intensidades, tiempos de viaje y velocidades por tramo.

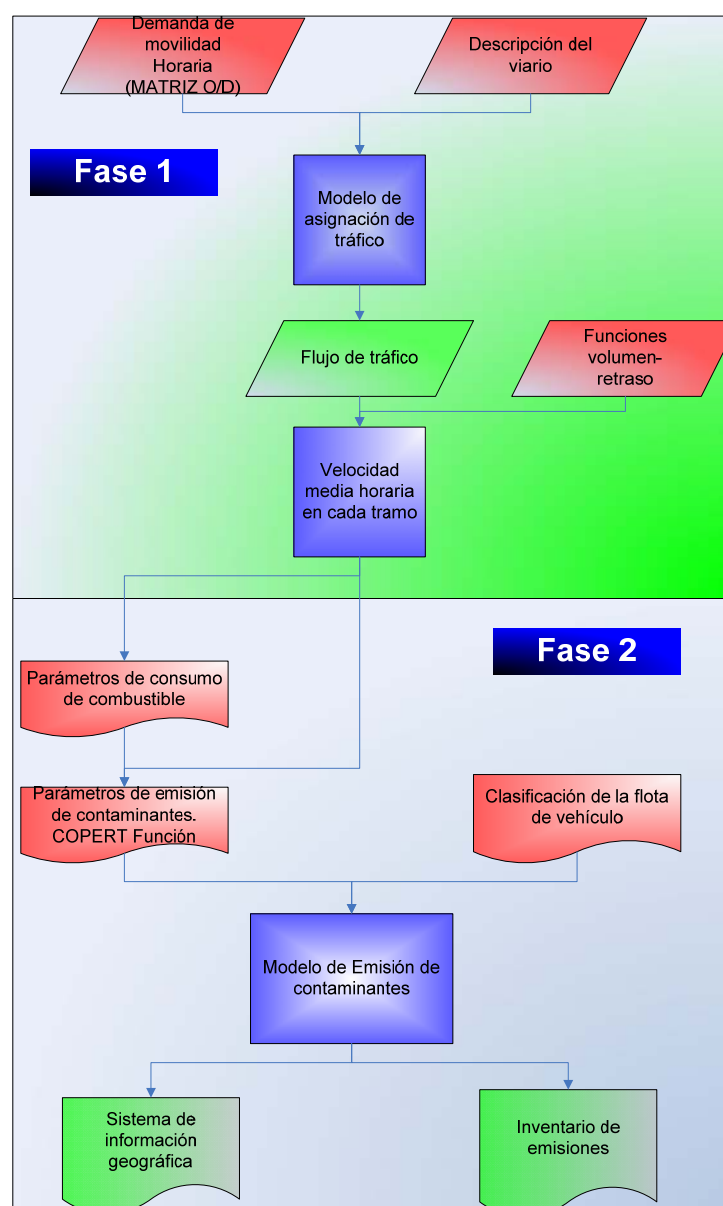


Fig. 2. Metodología para el inventario de emisiones

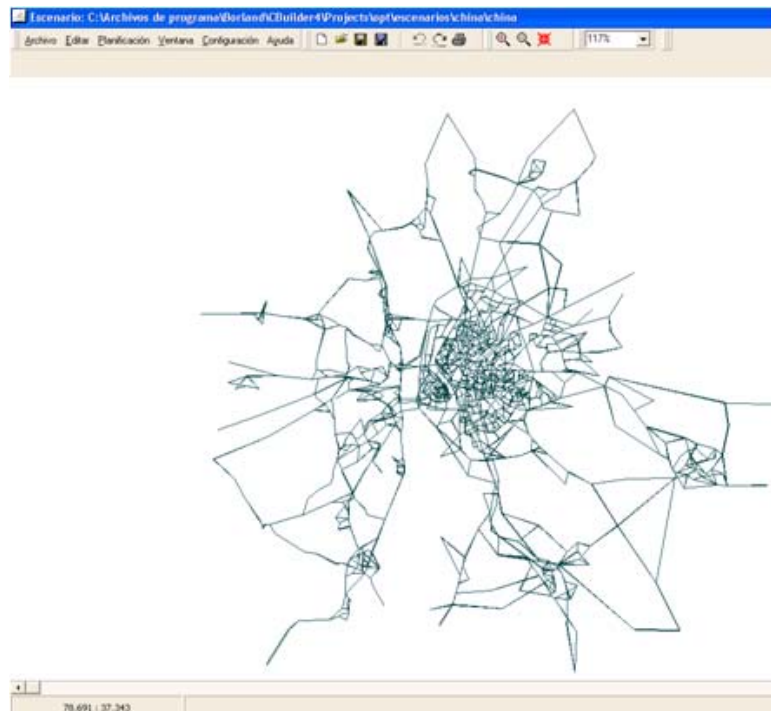


Fig. 3. Herramienta de sistema de información geográfica del viario de Sevilla

La velocidad media de desplazamiento en cada tramo es obtenida mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad}_i = \text{Longitud}_i / F_i(a) \quad (1)$$

Donde, Velocidad_i es la velocidad media en el tramo i , Longitud_i es la longitud del tramo y $F_i(a)$ es la función volumen-retraso asignada al tramo con a representando los atributos del tramo.

La estimación del tiempo de viaje en cada tramo (porción de calle) se realiza mediante la resolución del problema de asignación. Los datos de entrada son la matriz de viajes que indica el número de viajes entre cada zona de la ciudad y las funciones volumen-retraso.

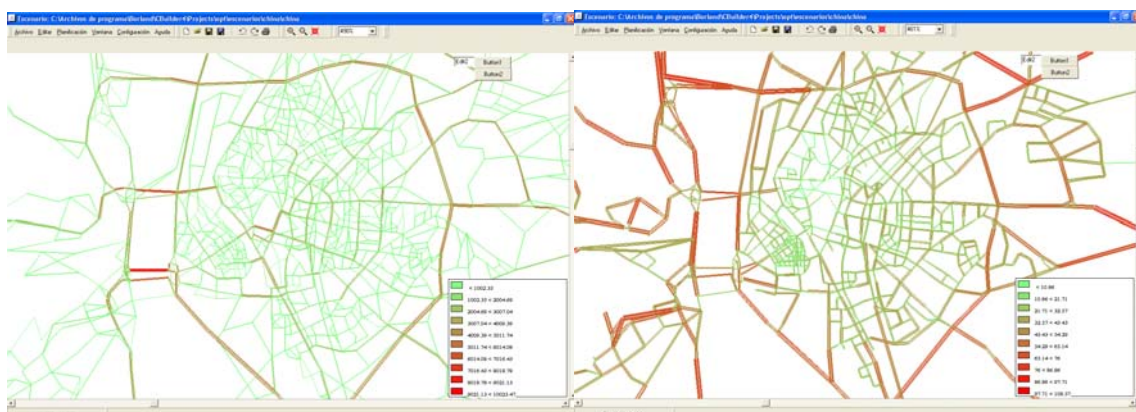


Fig. 4. Resultados de Intensidad de tráfico y velocidad entre las 8-9h

La siguiente fase esta centrada en la clasificación y categorización del parque automovilístico. La flota de vehículos asociada al área de estudio es obtenida de la

información sobre matriculación disponible en la DGT y ayuntamiento (Dirección General de Tráfico (DGT, 2006). Estos datos son procesados para obtener como resultado el porcentaje de vehículos por categoría. Las categorías definidas están estructuradas en función de la cilindrada del motor, tipo combustible, tipo de vehículo, año de matriculación y legislación existente en el año de matriculación. El resultado al final de la tarea es un árbol de porcentajes donde las hojas muestran el porcentaje de vehículos asociado a una categoría y los nodos intermedios representan el porcentaje relativo. En Sevilla se han definido un total de 79 categorías.

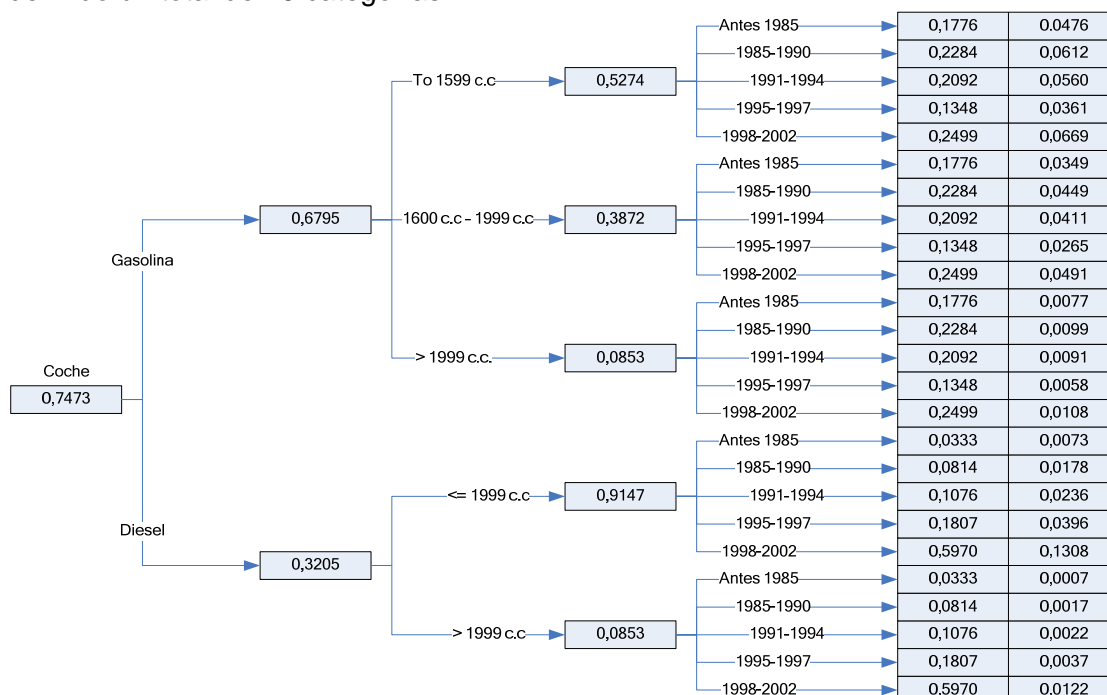


Fig. 5. Clasificación parcial del parque automovilístico. Árbol de probabilidad

La siguiente tarea, en esta fase, consiste en aplicar el modelo de emisión. El modelo de emisión (integrado en la herramienta TRAMOS) contiene todas las expresiones/ecuaciones, según categoría de vehículo y contaminante, recomendadas por la guía EMEP/CORINAIR (Eggleston, 1992). El proceso de estimación obtiene, en base a la longitud del tramo, la velocidad media e intensidad de tráfico, las emisiones.

$$E_{lp} = \sum_{i=1}^N L_i \times P_i \times \delta_{il} \times T_l \times F_{pi}(v_l) \quad \forall l, p \quad (2)$$

E_{lp} : Emisión del contaminante p en una hora en el tramo l (gramos/hora).

L_i : Longitud del tramo i (Kilómetros)

P_i : Porcentaje de vehículos de la categoría i.

N : Numero de categorías

T_l : Intensidad de tráfico en el tramo l (vehículos/hora)

δ_{il} : Parámetro del tramo. 1 si la categoría i puede circular por el tramo l ó 0 en caso contrario.

v_l : Velocidad media en el tramo l (kilómetro/hora).

F_{pi} : Ecuación de emisión del contaminante p en la categoría i (gramos/kilómetro).

La principal característica del método empleado es la posibilidad de analizar de forma desagregada las emisiones y el consumo. Por ejemplo, es posible analizar las emisiones

por categorías de vehículos y según tramos (Figura 7). Posteriormente, estos resultados pueden ser agregados para mostrar resultados globales de la zona en estudio. También se puede realizar análisis según grupo de contaminantes (figura 6), como por ejemplo mostrar emisiones de gases de efecto invernadero según categorías de vehículos (Tabla 1, Tabla 2). En resumen, los resultados desagregados pueden ser analizados y tratados con el objetivo de comparar y evaluar estrategias.

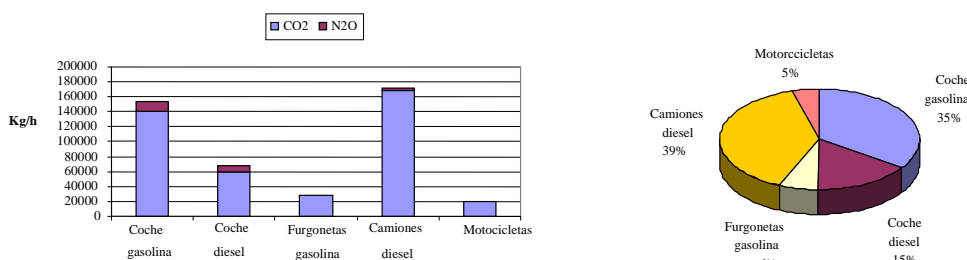


Fig. 6. Emisiones totales del GEI (Gases de efecto invernadero según categoría)

Categoría	Clase	Legislación	NOx	CO	COV	SO2	CO2	N2O
Coche	Gasolina<1,6l	Antes 1985	3,5	130,4	12,7	0,102	1084,7	15,3
		1985-1990	7,2	91,5	11,9	0,09	1049,5	19,7
		1991-1994	3,08	43,3	6,15	0,06	730,70	18,1
		1995-1997	1,00	14,435	1,04	0,054	576,261	123,515
		1998-2002	0,67	18,206	0,407	0,101	1068,846	229,096
	Gasolina 1,6l-2,0	Antes 1985	5,080	99,548	9,755	0,096	1024,814	11,716
		1985-1990	5,068	69,635	9,075	0,093	985,095	15,036
		1991-1994	4,708	17,757	2,950	0,070	748,075	13,791
		1995-1997	0,749	11,475	0,731	0,056	595,796	94,075
		1998-2002	0,500	14,484	0,285	0,104	1105,865	174,614
	Gasolina>2,0l	Antes 1985	0,993	21,971	2,153	0,026	280,141	2,586
		1985-1990	1,654	15,376	2,004	0,028	297,066	3,320
		1991-1994	0,162	1,138	0,085	0,019	207,077	3,033
1995-1997		0,215	3,490	0,215	0,016	170,754	20,642	
1998-2002		0,145	4,435	0,097	0,030	319,115	38,577	

Tabla 1. Emisiones en un tramo según categoría (g/h).

Categorías	NOx [Kg NO2/h]	CO [Kg/h]	COV [Kg CH1.85/h]	SO2 [Kg/h]	CO2 [Kg/h]	N2O [Kg/h]
Coche gasolina < 1.6 l Antes 1985	65,657	1364,829	138,587	1,220	12971,420	291,911
Coche gasolina < 1.6 l 1985-1990	199,203	864,923	129,516	1,222	12990,800	375,661
Coche gasolina < 1.6 l 1991-1994	99,534	557,399	84,524	0,621	6596,998	344,103
Coche gasolina < 1.6 l 1995-1997	18,178	161,989	13,672	0,931	9896,378	1912,620
Coche gasolina < 1.6 l 1998-2002	12,140	204,310	5,325	1,727	18355,730	3547,516
Coche gasolina 1.6 l - 2.0 l Antes 1985	125,882	1041,356	105,741	1,103	11722,904	222,726
Coche gasolina 1.6 l - 2.0 l 1985-1990	122,525	658,124	98,549	1,159	12320,561	285,842

Coche gasolina 1.6 l - 2.0 l 1991-1994	111,831	220,389	33,487	1,001	10636,689	262,174
Coche gasolina 1.6 l - 2.0 l 1995-1997	13,790	140,700	11,423	0,936	9947,511	1456,736
Coche gasolina 1.6 l - 2.0 l 1998-2002	9,209	177,607	4,453	1,737	18463,704	2703,870
Coche gasolina > 2.0 l Antes 1985	19,361	229,836	23,338	0,293	3112,539	49,158
Coche gasolina > 2.0 l 1985-1990	36,839	145,318	21,760	0,320	3403,995	63,116
Coche gasolina > 2.0 l 1991-1994	4,200	14,289	1,414	0,272	2888,384	57,654
Coche gasolina > 2.0 l 1995-1997	3,888	42,822	3,888	0,256	2718,057	319,644
Coche gasolina > 2.0 l 1998-2002	2,617	54,419	1,744	0,478	5079,652	597,367
Coche gasoil < 2.0 l	152,844	202,209	152,844	12,067	54176,564	7380,179
Coche gasoil > 2.0 l	22,854	19,305	22,854	1,152	5172,273	704,592
Camión gasolina convencional	247,607	2805,172	247,527	2,643	28088,194	235,956
Camión gasoil convencional	2830,126	1024,015	733,827	37,443	168112,272	3417,694
Motocicletas To 74 c.c.	0,402	201,208	120,725	0,101	1069,222	13,414
Motocicletas > 74 c.c.	3,912	194,500	524,086	1,754	18643,038	125,161
Total (T/h)	4,103	10,325	2,479	0,068	416,367	24,367

Tabla 2. Emisiones totales según categoría

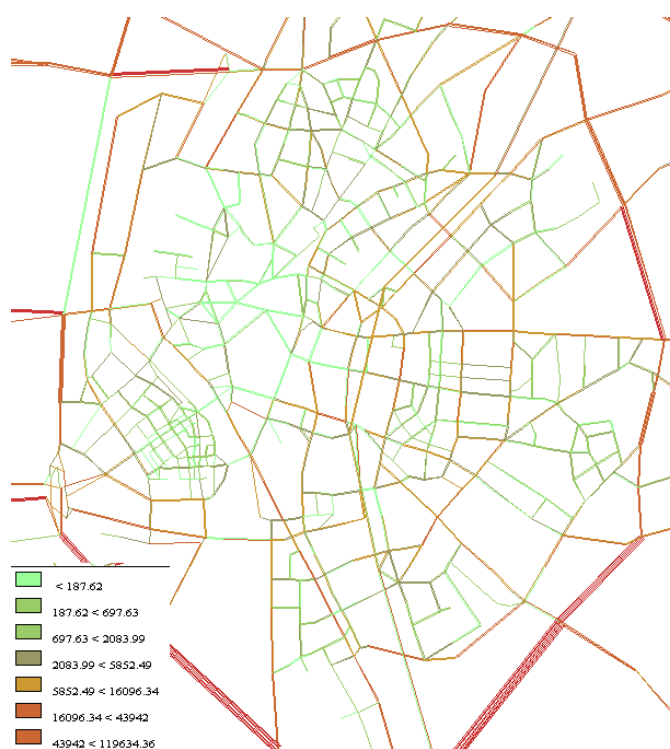


Figura 7. Representación gráfica de Emisiones de CO₂ en calles (g/h)

Los resultados pueden ser agregados para estimar las emisiones totales en una zona (Tabla 3)

NOx	CO [t/h]	COV	SO2	CO2 [t/h]	N2O
-----	----------	-----	-----	-----------	-----

[t NO2/h]	[t Ch1.85/h]	[t/h]	[t/h]	[t/h]
4,103	10,325	2,479	0,068	416,367
				24,367

Tabla 3. Emisiones totales para Sevilla entre 8h-9h

En relación al consumo energético las expresiones empleadas han sido desarrolladas en base al análisis del consumo de combustible para las diferentes categorías descritas anteriormente.



Figura 8. Consumo energético medido en litros de combustible.

Las Áreas Metropolitanas Andaluzas concentran más de cuatro millones de personas, un 56% de la población de Andalucía, siendo el Área de Sevilla la más importante, con más de 1.100.000 personas. Teniendo en cuenta la población de Sevilla y el parque automovilístico de la ciudad (DGT. Anuario estadístico 2006), calculamos el número de vehículos por habitante, resultando ser 0,5220. Considerando en el área metropolitana de Sevilla 1.136.000 habitantes (Fte. Elaboración propia) y aplicando la misma tasa que en la ciudad, estimamos que en el área metropolitana circulan 593.374 vehículos.

A través de la agregación por sectores de la matriz O – D calibrada a partir de la que realizamos la asignación de transporte, podemos intuir algunos resultados interesantes relativos a la movilidad en el área urbana y metropolitana. La primera característica espacial de la movilidad motorizada del área metropolitana de Sevilla es la estructura radial de los desplazamientos. La ciudad de Sevilla es el origen y/o destino del 85,41% de los viajes en vehículo privado que se realizan en el área metropolitana. Solo el 14,59% de los viajes no tienen ninguno de sus extremos en el municipio central. Los viajes que se generan dentro del municipio central suponen un 74,40%, es decir tienen su origen y destino dentro de la ciudad de Sevilla, mientras que el resto de viajes suponen un

25,60%.

La siguiente relación en importancia es la que tiene su origen en el municipio de Sevilla y su destino en el casco histórico (22,53% de los viajes en vehículo privado). La función del casco histórico como espacio relevante dentro de la aglomeración se evidencia no solo por esta cifra sino por el hecho de ser un espacio fundamentalmente, de atracción de viajes: el 19,32% de los viajes del municipio de Sevilla y del área metropolitana, tienen su destino en el casco histórico lo que significa más de 250.000 viajes diarios. El potencial generador es inferior aún siendo relativamente importante, superando ligeramente los 140.000 viajes diarios.

A continuación se muestra los resultados totales de consumo de combustible de la red metropolitana de Sevilla en el intervalo horario de 8 a 9 horas de la mañana.

Tipo de vehículo	Consumo (l)
Autobuses	1.720
Camiones y Furgonetas	33.262
Turismos	54.750
Motocicletas	2.112
Otros vehículos	1.219
Total	93.064

Tabla 4. Consumo de combustible de 8 a 9 horas

De esta forma dividiendo los 93.064 litros de consumo total por el número de vehículos en el área metropolitana, obtenemos el consumo por vehículo en el intervalo horario de 8 a 9 horas, que es de 0,1568 litros/vehículo.

Los turismos aportan cerca del 60% del consumo total de combustible en el intervalo horario considerado, mientras que los camiones y furgonetas llegan a suponer el 36%, como se muestra en la figura 8.

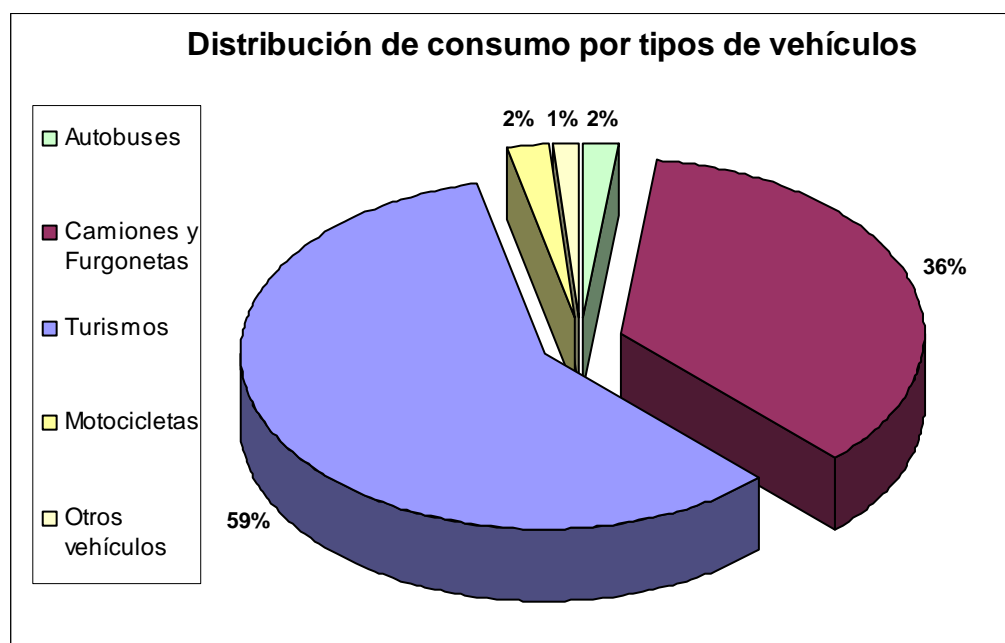


Figura 9. Consumo energético por categoría de vehículo.

Si extrapolamos los resultados de consumo a las 24 horas, a partir de la matriz O –D calibrada, de la cual realizamos la asignación, analizamos la movilidad en el área metropolitana de Sevilla. El número de desplazamientos que realizan los residentes del Área Metropolitana en un día laborable medio es de 2.593.949 de los cuales el 55% son viajes mecanizados, llegando a suponer 1.426.672. El volumen de viajes supone una tasa de generación de 2,28 viajes por habitante

Los resultados de consumo en 24 horas se exponen en la siguiente tabla.

Tipo de vehículo	Consumo (l)
Autobuses	24.332
Camiones y Furgonetas	470.461
Turismos	774.404
Motocicletas	29.872
Otros vehículos	17.247
Total	1.316.316

Tabla 5. Consumo diario de combustible

Si se divide el consumo diario total por el número de vehículos que circulan por el área metropolitana, se obtiene el consumo de combustible por vehículo. Como se expuso anteriormente, el número de vehículos en la zona de estudio es de 593.394. Por tanto, con un consumo total de 1.316.316 litros, el consumo por vehículo es de 2,2183 litros diarios.

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 774.404 litros, el consumo diario de combustible por turismo, que es de 1,6949 litros. Suponiendo que el consumo medio en ciudad es de 10 litros /100km la distancia media diaria recorrida por un turismo sería de

16,94 km. Esta distancia sería la equivalente a la que recorrería un vehículo sin efectuar paradas y en condiciones de fluidez en la circulación. La distancia recorrida real sería menor, ya que la obtenida no considera el consumo en situaciones de arranque y parada ni en situaciones de congestión de tráfico.

Los camiones y furgonetas, representan el 14% del parque automovilístico y tienen un consumo de 470.461 litros, por lo que el consumo diario de combustible por vehículo es de 5,6 litros. Suponiendo un consumo medio de 22 litros / 100 Km., la distancia que recorrerían sería de 25,74 km.

Si estimamos la distancia equivalente que recorren diariamente el resto de tipos de vehículos. En la siguiente gráfica se muestra las distancias equivalentes para todos los tipos de vehículos.

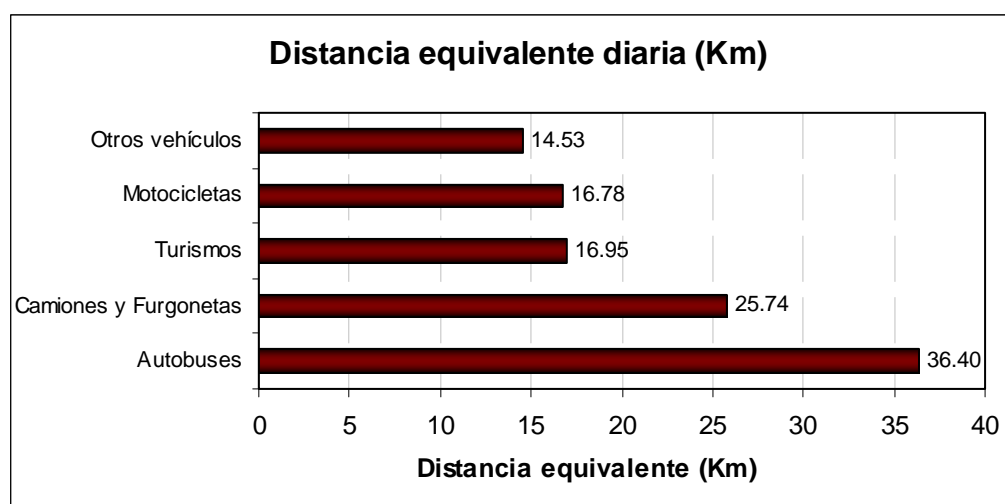


Figura 10. Distancias equivalentes para todos los tipos de vehículos

Estas distancias equivalentes serían en condiciones de flujo libre, no teniendo en cuenta por tanto, la calidad de circulación en ciudad. Se han obtenido a partir de los datos de consumo, y por tanto computa la distancia que recorrería un vehículo cuando éste se encuentra detenido, en arranque / parada o en situaciones de congestión de tráfico, pese a que la distancia real que recorra sea nula o muy pequeña.

A través de los métodos empleados es posible obtener la distancia que recorren todos los vehículos por los tramos de la red, ya que es conocida la longitud de cada tramo y el número de vehículos que circula por él. Agregando para todos los tramos se puede calcular la distancia total que recorren todos los vehículos, que ha resultado 12.580.962 Kms al día. Teniendo en cuenta el número de vehículos existentes en el área metropolitana y el consumo de combustible total, obtenemos que el consumo diario es de 10,46 l/100Km por vehículo.

4. COMPARACIÓN CON MÉTODO TOP-DOWN COPERT

La imposibilidad de calibración de la estimación de emisiones con medidas de campo, (existencia de otros emisores) obliga a tomar dos medidas alternativas de calibración y validación. La primera es calibrar y validar los resultados del modelo de asignación (intensidad de tráfico) con los datos recopilados por los contadores de tráfico. La

segunda, consiste en comparar los resultados de emisiones obtenidos para la zona metropolitana de Sevilla con los proporcionados con la última versión del software COPERT (Ntziachristos, 2000). La relación entre ambos es analizada para determinar que los cambios son mínimos (tabla 2).

En COPERT IV (Ntziachristos, 2000), la clasificación de vehículos empleada coincide con la utilizada en el estudio y las velocidades utilizadas son en base a medias obtenidas en un periodo de tiempo. La comparación muestra como las diferencia entre ambas metodologías en relación a las emisiones contaminantes son muy similares.

	NOx (t NO ₂ ·h ⁻¹)	CO (t·h ⁻¹)	COV (t Ch _{1,85} ·h ⁻¹)	SO ₂ (t·h ⁻¹)	CO ₂ (t·h ⁻¹)
(A)COPERT	3,95	15,025	2,65	0,075	503.775
(B) Aprox.	4,103	10,325	2,479	0,068	416,367
Relación (A/B)	0,96	1,45	1,06	1.102	1,20

Tabla 4. Comparativa entre COPERT y la metodología desagregada en Sevilla

5. CONCLUSIONES

En la actualidad, muchas ciudades carecen de herramientas para el análisis y realización de inventarios de emisiones debido al tráfico urbano. Esto implica, en la mayoría de las ocasiones, que las medidas o estrategias adoptadas carecen de un análisis de impacto previo a su implantación.

Los nuevos compromisos y futuras leyes ambientales, tanto en España como en Europa, obligaran a las autoridades locales al establecimiento de estrategias para la reducción de emisiones. La necesidad de herramientas de análisis y evaluación de inventarios se hace indispensable tanto como punto de partida previo a la implantación de estrategias, como para evaluar los resultados.

La principal contribución del trabajo reside en la descripción de la metodología a seguir en la realización de inventarios de emisiones en grandes áreas, el diseño de una herramienta integrada que puede ser empleada por las autoridades locales como soporte y ayuda a la evaluación de alternativas y medidas correctoras.

La metodología y herramienta ha sido testeada en la zona metropolitana de Sevilla, para estimar las emisiones debidas al tráfico urbano. El estudio aplicado ha incluido un análisis estadístico de la composición del parque automovilístico y una comparación de resultados con la aplicación de la herramienta COPERT IV, que ha permitido validar los resultados obtenidos y certificar el mayor grado de detalle que ofrece la metodología descrita.

Por último, destacar que el método presentado es muy útil tanto en el contexto de planificación de transporte como en gestión de la calidad ambiental de zonas metropolitanas. Además, puede ser empleado como una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, en el ámbito del tráfico urbano, para la evaluación de las implicaciones de las políticas de gestión del tráfico y reducción de emisiones.



AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto “Diseño y desarrollo de métodos de estimación y mejora de la eficiencia energética y calidad medioambiental en entornos ATMS-ATIS” financiado por el ministerio de Fomento. (T30/2006)

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., and M. Ross (1993a) Model of Fuel Economy with applications to Driving Cycles & Traffic Management, Transportation Research Record, Washington, D.C.

An, F., and Ross, M. (1993b) 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, Mater thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada

Bailey B., Atmospheric process evaluation of mobile source emissions, College of Engineering, Centre for Environmental Research and Technology (CE-CERT), University of California, Riverside, CA (1995).

Baldasano, J. Guidelines and Formulation of an Upgrade Source Emission Model for Atmospheric Pollutants, Air Pollution Emissions Inventory, CMP.1998

Beckman, M. J., C. B. McGuire, and C. B. Wisten (1956). Studies in the Economics of Transportation. New Haven: Yale University Press.

Cardelino C, Daily variability of motor vehicle emissions derived from traffic counter data, J Air Waste Manage Assoc **48** (1998), pp. 637–645.

COST 319 Estimation of pollutant emissions from transport

Covile R.N., Hutchinson E.J. and Warren R.F. The transport sector as a source of air pollution. Atmospheric Environment, 35,1537-1565. 2001

DGT. Dirección general de tráfico. Estadísticas de matriculación. 2006

Eggleston H.S., Gaudioso D., Gorissen N., Jourmard R. Rijkeboer R.C., Samaras Z. and Zierock K.H. CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Volume 1: Methodology and Emission Factors. Contract no. B4-3045(91)10 PH, Bruselas, 1992.

EEA. 2000. Environmental signals 2000. European Environment Agency. Copenhagen

EMEP/CORINAIR, 1999. Atmospheric Emission Inventory GuideBook.



EPA (2002). User's Guide to MOBILE6.0. Mobile Source Emission Factor Model. EPA420-R-02-001. United States Environmental Protection Agency.

Frank, M. and P. Wolfe (1956). An algorithm for quadratic programming. Naval research logistics quarterly 3 (1-2), 95-110.

IPCC/OECD/IEA (1997): Revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change working group 1, Technical Support Unit, Hadley Centre, Bracknell, U.K.

Joumard R, Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network /and scientific state-of-the-art action COST 319, INRETS, 1998.

Negrenti E., 1995, Bottom-up traffic Emission models, COST 319 - Estimation of pollutant emissions from transport, Pre-proceedings of the workshop on 27-28 1995 at ULB - Brussels.

Ntziachristos L. and Z. Samaras (2000). COPERT III Version 2.1: methodology and emission factors. European Topic Centre on Air Emissions, European Environmental Agency.

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

Racero J. 2003. Transportation planning and simulation techniques to analysis traffic problems in urban context, thesis. University of Seville.

Richardson, A.J., and 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

Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, Vol. 1 , 325–378.

ZACHARIADIS, T. and Z. SAMARAS, 1995, Comparison of microscale and macroscale traffic emission estimation tools : DGV, COPERT and KEMIS,