



Cátedra de Investigación sobre Movilidad Sostenible



MEMORIA DE ACTIVIDADES

AÑO 2014



1. CONSTITUCIÓN Y COMITÉ DE SEGUIMIENTO

En Octubre de 2004 se firmó el convenio para la creación de la “CÁTEDRA DE INVESTIGACIÓN SOBRE MOVILIDAD SOSTENIBLE” (CIMS), entre el Consorcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM) y el Centro de Investigación del Transporte TRANSyT, de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tal y como se menciona en el Convenio, esta Cátedra servirá de nexo activo entre las actividades de investigación de dicho centro y la experiencia en la planificación, financiación y gestión del transporte metropolitano del Consorcio Regional de Transportes de Madrid.

Para el desarrollo del Convenio y definición de las actividades de la Cátedra se designaron responsables por ambas partes:

Responsables:

CRTM – Carlos Cristóbal Pinto
TRANSyT – Andrés Monzón de Cáceres

Además, se constituyó un Comité Supervisor, compuesto por 2 miembros de TRANSyT y 2 del CRTM:

Comité de Seguimiento actual:

TRANSyT - María Eugenia López Lambas
Rocío Cascajo Jiménez
CRTM - Antonio García Pastor
Domingo Martín Duque

Actúa como coordinadora y secretaria de este Comité, María Eugenia López Lambas, designada al efecto en la primera reunión que tuvo lugar.



2. OBJETIVOS Y REUNIONES

La segunda cláusula del Convenio de creación de la CIMS recoge las actividades a desarrollar al amparo de esta Cátedra, clasificándolas en permanentes y ocasionales.

Dentro de las **actividades permanentes** se encuentra el desarrollo de una línea de investigación relacionada con el estudio de la movilidad sostenible en transporte público en áreas metropolitanas. Además, se incluye también la realización de Jornadas o Seminarios bianuales sobre temas relacionados con la Cátedra de Investigación sobre Movilidad Sostenible, en principio, ligados a las actividades de investigación del punto anterior.

A parte de estas actividades permanentes, se pueden llevar a cabo otras **actividades ocasionales** de naturaleza científica en la materia: publicaciones, congresos, debates, etc., en la medida en que se cuente con financiación para ello.



3. ACTIVIDADES DEL AÑO 2014

Las actividades de investigación de la Cátedra sobre Movilidad Sostenible, han obtenido, hasta ahora, los resultados que a continuación se detallan:

3.1) *Actividades permanentes*

3.1.1) Desarrollo de una línea de investigación relacionada con el estudio de la movilidad sostenible

- Lectura y defensa de la tesis doctoral de Wang Yang titulada *Optimization of transport demand management measures (TDMs) scenarios for strategic urban planning: the case of Madrid* (30 de abril de 2014). Sus directores fueron Andrés Monzón, de la UPM, y la investigadora de TRANSyT Floridea di Ciommo. La tesis trata sobre optimización de medidas de gestión de la demanda de transporte, y su aplicación al caso de Madrid.
- Inicio de la investigación para la realización de la tesis doctoral de la doctoranda Andrea Alonso, quien va a continuar la línea de investigación de Luis A. Guzmán y Yang Wang, tratando de modelizar la movilidad en la Comunidad de Madrid mediante la incorporación de datos más actuales en el modelo de usos del suelo y transporte, no necesariamente provenientes de las Encuestas Domiciliarias de Movilidad. En este sentido, durante 2014 se ha actualizado el modelo de vehículo privado de 2004 a 2012, para 4 periodos: punta de la mañana (7-9 h), punta mediodía (14-15 h), punta tarde (18-20 h) y hora valle (de 6 a 23 h, excepto las 5 horas punta). Para ello se han utilizado datos de aforos del Ayuntamiento de Madrid, Comunidad de Madrid, DGT y Ministerio de Fomento (en total unos 300 puntos de aforo; dependiendo del periodo hay más o menos datos).
- Informe realizado sobre la futura implantación del sistema de bicicleta pública BiciMAD. Los resultados de la encuesta ex ante y propuestas para su implantación se facilitaron al Ayuntamiento de Madrid. Autores: Andrés Munkácsy, Andrés Monzón.

3.1.2) Realización de Jornadas o Seminarios

- Seminario de Economía del Transporte, dirigido por la investigadora Natalia Sobrino: *"Evolución de la huella de carbono de la movilidad urbana: una comparación regional"*. Mayo, 2014.
- Seminario de Economía del Transporte, dirigido por la profesora López Lambas: *"La crisis económica y las autoridades de transporte público"*, mayo 2014.



- Seminario de Economía del Transporte, dirigido por la investigadora Floridea Di Ciommo: *"Smart Cards y Tarifas sociales: efectos sobre la equidad"*, mayo 2014. Este trabajo fue merecedor del Premio CRTM 2014.

3.2) Actividades ocasionales

3.2.1) Presentación de ponencias en Congresos:

- TRA (Transport Research Arena), 14-17 April 2014, París. *"ICT measures to reduce CO₂ emissions in metropolitan areas. The case study of Madrid"*. Autores: Álvaro García-Castro, Andrés Monzón, Cristina Valdés.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. *"A vueltas con la última milla"*. Autores: Andrea Alonso Ramos, Andrés Monzón de Cáceres, María Eugenia López-Lambas.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. *"Análisis de la relación entre el índice de congestión y el consumo de combustible basado en datos empíricos"* Autor: Álvaro García-Castro.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. *Efectos de la monitorización individual del consumo de combustible en trayectos cotidianos*. Andrés García Martínez, Andrés Monzón de Cáceres, Álvaro García-Castro.
- XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte (PANAM XVIII), 11-13 de junio 2014, Santander. *"WIN-WIN transport strategies: searching for synergies"*. Autores: Cristina Valdés Serrano, Andrés Monzón, Francisco García Benítez
- Joint event CITTA 7th Annual Conference, dentro de la Acción COST TU1002 Final Conference, octubre 2014. *"Public transport accessibility: measuring negative synergies of urban sprawl and economic crisis"*. Se analiza el caso de Madrid. Autores: Andrea Alonso y Andrés Monzón.

3.2.2) Elaboración de artículos de interés científico:

- Alvaro Garcia-Castro, Andrés Monzón (2014), *Homogenization effects of variable speed limits*, Transport and Telecommunication volume 15, no. 2, 130–143 (se analiza el caso de la M-30).
- Fiamma Pérez-Prada y Andrés Monzón (2014), *Operation and environmental impacts of reduced speed limits in an urban highway*, (pendiente de aceptación en Transportation Research part D).



3.2.3) Actividades de formación:

- Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Alumno: Fernando Herrero Ruiz. Título: Zona de Intercambio Modal en Alonso Martínez asociada a la creación de la línea circular de buses de la M-10. Tutor: Andrés Monzón.
- Proyecto de Fin de Grado Ingeniería Civil. Alumna: Carlota Maestro Cuartero. "Estudio de viabilidad de un sistema de préstamo de bicicleta integrado con BiciMAD en la Ciudad Universitaria de Madrid". Tutora: María Eugenia López Lambas.
- Proyecto de Fin de Grado Ingeniería Civil. Alumna: Sonia Alonso Junquera. "Estudio de viabilidad de un servicio de transporte público en el parque Conde de Orgaz". Tutor: Óscar Martín Álvaro.
- Doctorate Programme on Civil Engineering Systems. Researcher training work. Alumno: András Munkácsy. Título: Towards a new generation of bike-sharing Ex-ante analysis of BiciMAD (Madrid public bike system). Tutor: Andrés Monzón.
- Tesina fin de Master. Alumno: Andrés García Martínez. Título: Improving consumption models based on average speed by incorporating urban driving patterns. Tutores: Andrés Monzón y Cristina Valdés.





4. CONCLUSIONES

En el décimo año de existencia de la "CÁTEDRA DE INVESTIGACIÓN SOBRE MOVILIDAD SOSTENIBLE", se siguen cumpliendo los objetivos previstos, desarrollándose tanto la actividad investigadora como de divulgación dentro de las líneas fijadas y en el marco establecido.

Durante estos últimos años, esta cátedra ha financiado diversas investigaciones relacionadas con la movilidad en áreas urbanas, que han originado **4 tesis doctorales**:

- Luis Ángel Guzmán, *Optimización dinámica de estrategias de movilidad sostenible en áreas metropolitanas* (2011)
- Pablo Jordá, *Evaluación de la eficiencia técnica de los servicios de autobús urbano. Aplicación a las grandes ciudades españolas en el periodo 2004-2009* (30 de noviembre de 2012)
- Cristina Valdés, *Optimization of urban mobility. Measures to achieve Win-Win strategies* (19 de diciembre de 2012)
- Wang Yang, *Optimization of transport demand management measures (TDMs) scenarios for strategic urban planning: the case of Madrid* (30 de abril de 2014).

Una vez desarrollado y ajustado el modelo dinámico de usos de suelo y transporte estratégico aplicado a la Comunidad de Madrid, es el momento continuar trabajando en esta línea de investigación mejorando y actualizando el modelo para adecuarlo a los problemas más recientes, como la crisis económica, y para abordar de manera apropiada procesos complejos como la dispersión urbana.

Madrid, 9 de marzo de 2015



5. ANEXOS

I) Ponencias presentadas en Congresos.

- TRA (Transport Research Arena), 14-17 April 2014, París. "*ICT measures to reduce CO₂ emissions in metropolitan areas. The case study of Madrid*". Autores: Álvaro García-Castro, Andrés Monzón, Cristina Valdés.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. "*A vueltas con la última milla*". Autores: Andrea Alonso Ramos, Andrés Monzón de Cáceres, María Eugenia López-Lambas.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. "*Análisis de la relación entre el índice de congestión y el consumo de combustible basado en datos empíricos*" Autor: Álvaro García-Castro.
- XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT-2014), junio 2014, Santander. "*Efectos de la monitorización individual del consumo de combustible en trayectos cotidianos*". Andrés García Martínez, Andrés Monzón de Cáceres, Álvaro García-Castro.
- XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte (PANAM XVIII), 11-13 de junio 2014, Santander. "*WIN-WIN transport strategies: searching for synergies*". Autores: Cristina Valdés Serrano, Andrés Monzón, Francisco García Benítez
- Joint event CITTA 7th Annual Conference, dentro de la Acción COST TU1002 Final Conference, octubre 2014. "Public transport accessibility: measuring negative synergies of urban sprawl and economic crisis". Se analiza el caso de Madrid. Autores: Andrea Alonso y Andrés Monzón.

II) Artículos.

- Alvaro Garcia-Castro, Andrés Monzón (2014), *Homogenization effects of variable speed limits*, Transport and Telecommunication volume 15, no. 2, 130–143 (se analiza el caso de la M-30).
- Fiamma Pérez-Prada y Andrés Monzón (2014), *Operation and environmental impacts of reduced speed limits in an urban highway*, (pendiente de aceptación en Transportation Research part D).



ANEXO I - Ponencias presentadas en Congresos

ICT measures to reduce CO₂ emissions in metropolitan areas. The case study of Madrid

Alvaro Garcia-Castro^{a*}, Andres Monzon^{a,b}, Cristina Valdes^a

^aResearcher, Transport Research Centre, TRANSyT, Universidad Politecnica de Madrid, Spain

^bProfessor, Universidad Politecnica de Madrid, Spain

Abstract

The road transport sector is responsible for around 20% of Greenhouse Gas (GHG) emissions in Europe, being this share increased year after year. In this framework, Information and Communications Technologies (ICT) have been identified as potential instruments to achieve a reduction in energy consumption and emissions of road vehicles, but significant results and quantitative data are still missing. Within the Research and Development project "ICT-Emissions" (7th European Framework Programme) some ICT measures affecting speed management and driving profiles are being tested in the city of Madrid.

The aim of this test case is to evaluate the reduction in fuel consumption -and therefore in CO₂ emissions- by comparing the base scenario (no ICT measure applies) with different application scenarios. The methodology is based on the collation of data using equipped floating cars (FCD), which performed a representative number of trips (more than 2,000) producing positive results (from 2% to 17%) in terms of CO₂ emissions savings.

Keywords: ICT; fuel consumption; CO₂ emissions; eco driving; variable speed limits.

Résumé

L'industrie du transport routier est responsable d'environ 20% des gaz à effet de serre (GES) en Europe, en étant cette part a augmenté année après année. Dans ce cadre, Technologies de l'information et de communication (TIC) ont été identifiés comme des instruments potentiels pour obtenir une réduction de la consommation d'énergie et les émissions des véhicules routiers, mais des résultats significatifs et les données quantitatives sont toujours portés disparus. Dans le cadre du projet de recherche et développement "ICT-Emissions» les mesures affectant, une certaine gestion des TIC et la conduite des profils de vitesse sont à l'essai dans la ville de Madrid. Le but de ce test est d'évaluer, la réduction de la consommation de carburant, et donc en émissions de CO₂ par comparaison au scénario de référence (TIC mesure s'applique pas) avec des scénarios d'application différents. La méthodologie est basée sur la collecte de données à l'aide de voitures équipées flottants (FCD), au Québec représentant effectué un certain nombre de trajets (plus de 2.000) produisant des résultats positifs (de 2% à 17%) en termes de réduction des émissions de CO₂.

Mots-clé: TIC, consommation de carburant, CO₂ émissions, éco-conduite; limites de vitesse variables.

* Corresponding author: TRANSyT-UPM, E.T.S.I Caminos, Canales y Puertos. Avda del Profesor Aranguren, 28040, Madrid, Spain

Tel.: +34 91 336 5234; fax: +34 91 336 5362

E-mail address: alvaro.garcia.castro@upm.es



1. Introduction. Greenhouse gases emissions

The emission of greenhouse gases (GHG) is a global problem, both in its causes and its consequences (Ramanathan & Feng, 2009), being the transport sector one of the largest emitters despite the advances in the field of engine technologies.

According to statistics provided by the European Environment Agency (EEA, 2013) road transport has begun to reduce their emissions of greenhouse gases, but still produces about 93% of the emissions attributable to the transport sector, which represents approximately 20.4% of the total. These figures are slightly higher in the European Union than other developed areas like Japan where road transport accounts for 17.3% of the total GHG emissions (Greenhouse Gas Inventory Office of Japan, 2013). However, in the U.S., the percentage of the contribution of road transport to total GHG emissions is even higher than in E.U., reaching as much as 22% (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).

In the case of Spain, the transport sector is the source of GHG emissions which has had the largest growth, in particular road transport (Perez & Monzón, 2006). Transportation in Spain accounts for 41% of the total CO₂ emissions (ITF/OECD, 2010) and is among Europe's highest ratios of transport energy consumption per capita, 34 t/M€ over 26 t/M€ of average European OECD countries.

In this context, many efforts focus on road transport sector in order to reduce GHG emissions (Mendiluce et al., 2010). The European Commission (2009) proposes an integrated policy from several points of view, including demand management, shift to cleaner or green modes, improved vehicle technologies and the use of Information and Communication Technologies (ICT).

ICT applied to transport (Intelligent Transportation Systems, or ITS) is a broad field that has the potential of producing positive effects from the point of view of efficiency, safety, comfort and the environment. (Commission of the European Communities, 2008).

A variety of these applications may be useful to achieve the objective of reducing CO₂ emissions. Based on the study of Klunder et al. (2008), these may be grouped into four basic categories:

- Eco-driving support systems and recommendations
- Real time demand management systems (navigators, variable message signs, etc.)
- ADAS: Advanced driver assistance systems (cruise control, vehicle to infrastructure communication, etc.)
- Traffic management systems (traffic light control, variable speed limits, speed control, etc.)

2. The ICT-Emissions project

The aim of the "ICT-Emissions" project (7th R&D Framework Programme) is to find a methodology to simulate in detail the effects on CO₂ emissions of a number of ICT measures applied to transport, commonly known as Intelligent Transportation Systems (ITS). Each of the considered ICT measures affects CO₂ emissions differently. From a macroscopic point of view it can be considered that demand, fleet composition and average speed determine the level of emissions (Ntziachristos & Samaras, 2000). However, taking a detailed look at each vehicle, the processes of acceleration and deceleration and the engine performance are also proved to be critical. Moreover, the areas of application are highly variable and the effects in certain environments may produce undesirable results, causing the need of using models to simulate these effects before investing the large amounts of capitals that in some cases require these measures.



All this complexity which determines the measures effectiveness also causes that the simulation is not a straightforward process. The methodology proposed in the "ICT-Emissions" project is mainly based on the interaction of various simulation models on micro and macro levels. Therefore, the idea is not to create a new simulation software tool, but to join the already existing by developing the necessary links and interfaces. These models include a vehicle control model, traffic model and emissions model (micro and macro levels). The project focuses on the field of passenger cars, also analysing the effects of the ICT measures under different fleet compositions.

As an added value of this project, it is also intended to validate the methodology with case studies in the partner cities of Rome, Turin and Madrid. In each of these cases, data collection campaigns (induction loops, cameras, floating cars, etc.) were conducted with the aim of evaluating the evolution of traffic and other vehicle parameters before and after the implementation of the ICT measures. These results are used to calibrate the vehicle and traffic models and afterwards to validate the results obtained by applying the simulation methodology to these case studies.

3. The case study of Madrid

Madrid is a city of about 3.5 million inhabitants and its metropolitan area reaches 6 million. The city is surrounded by three ring motorways: M-30, M-40 and M-50, being the last one not a complete ring.

The renovation works of the inner ring M-30 (also known as Calle30), were completed in 2007 with the objectives of improving traffic performance, reducing pollutant levels and creating new public spaces (Monzon et al., 2006). Now it is a 3+3 lanes (depending on sections) urban motorway with 38 km. long, including 12 km. of tunnels. The road is equipped with the most advanced ICT-based solutions such as variable message signs, traffic sensors or vision cameras which allow stakeholders to collect real time information. All these equipment is managed from a Control Centre operating 24 hours a day.

The speed limitation is 90 km/h in surface sections except for about 3km of the north section which is a signalized urban avenue where the speed limitation is settled at 50 km/h. The speed limitation at the tunnel sections is 70 km/h. The average daily traffic ranges from 65,000 to 265,000 vehicles/day, depending on the section.

Being Madrid Calle30 one of the partners of the ICT-Emissions Consortium, it was decided to focus the case study of Madrid on ICT measures applicable to motorway sections. Based also on the availability of the necessary equipment the final decision was to test section speed control, variable speed limits, cruise control and eco-driving, the latter also tested in some urban sections.

3.1 Tested ICT measures

Section speed control

The section speed control (point to point speed control or average speed control) is a measure designed primarily to improve road safety. The licence plates of each vehicle entering on a section (usually a section without intersections) are read and stored at the beginning and the end of the section. By measuring the time elapsed, average speed is calculated for each vehicle, proceeding to punish those that exceed the legal speed limit.

Apart from road safety, these systems also have an impact on emissions of GHG because speeding is avoided and the traffic flow becomes more homogenous. In this regard, Soole et al. (2013) collected some studies in



which CO₂ emissions are reduced by 11% to 29% in the case of some motorway sections in the UK, while in the Naples area (Italy), savings are estimated much more discretely, about 5% (Cascetta et al., 2010).

Variable speed limits

Variable speed limits (in this case also called dynamic speed limits) use real-time data (intensity, speed, environmental conditions, etc.) to dynamically change the speed limit, adapting it to the circumstances of the road and its environment. Through a control centre and variable message signs drivers are informed of speed limits, whether they are recommended or mandatory. This system is often used on highways with high traffic levels and /or highly variable weather conditions. Under various scenarios based on simulation, Zegeye et al. (2009) showed that the potential of fuel savings and CO₂ emissions ranges between 3% and 20%.

Eco-driving

Eco-driving is a driving style which aims to lower fuel consumption, thereby to produce a proportional decrease in CO₂ emissions. Eco-driving characteristics are generally well defined and easily characterized and according to Barkenbus (2010) are based on moderating acceleration processes, shifting up between 1,500 and 2,500 rpm (depending on engine technology), maintaining uniform speed as much as possible, anticipating traffic flow and traffic lights, reducing acceleration and deceleration and avoiding engine idling.

The learning and use of these techniques by the driver can be enhanced with information systems on board which recommend the instant to shift gear or recommendations (feedback) after performing an analysis of the speed profiles, such as Eco:Drive (FIAT, 2010). Eco-driving are most applicable in urban areas with high traffic densities and/or traffic signals, where the fuel savings can be achieved without reducing average speeds or increasing average travel times.

Many studies encrypt individual fuel savings between 5% and 10%, in some cases up to 20% (Wilbers, 1999, Onoda, 2009; FIAT, 2010). The variability of these data depends largely on the characteristics of the traffic and roads of each case study. Moreover, the driver's ability to take these techniques or vehicle sensitivity to small changes in the style driving may also have much influence. It is important to remember that this potential is individual, and therefore cannot be extrapolated these values as the total potential of eco-driving.

Cruise control

All driver assistance systems which influence the speed control -or acceleration and deceleration processes- have effects on fuel consumption and CO₂ emissions. Cruise control is a speed control system which can be activated by the driver and keeps a constant vehicle speed, avoiding unnecessary speed changes which cause additional fuel consumption. It is therefore a measure applicable only in urban high-capacity roads when the traffic intensity is relatively low. According to the review of Klunder et al. (2009), the potential reduction in CO₂ emissions vary between 5% and 10% .

3.2 Methodology

In March and April 2013, and in coordination with the Department of Traffic Technologies of Madrid, the surveys campaign was conducted. The main aim was to collect data in order to obtain speed profiles and fuel consumption at various sections of the M30 and some urban sections.

The analysis is based on the comparison of consumption (CO₂ emissions) before and after implementing the measures under study in the test sections. This data collection campaign consists on conducting a representative number of trips though the selected sections using floating cars (FCD). With this procedure, it is possible to obtain the speed and consumption profiles. Three FIAT passenger cars were involved in this study, a Punto 1.2 l. gasoline and two diesels, Punto and Bravo, with engines of 1.3 l. and 1.6 l. respectively. The number of drivers



was 9 and the total amount of recorded trips reaches approximately 2,200. Both FIAT Punto were exclusively used to test section speed control and variable speed limits, while Bravo driver was trained to use eco-driving techniques and the cruise control system.

The vehicles were equipped with a mobile device with GPS connection to collect data of distance travelled, instantaneous position and speed at a frequency of 1 Hz., being so able to obtain speed and acceleration profiles. To record the instantaneous fuel consumption (l/h.) and the revolutions per minute (rpm) an OBDKey device was employed, also transmitting with frequency of 1Hz. This device is easily installed by the user in the vehicle diagnostic port and sends the data to a mobile device via Bluetooth. Finally, the data are extracted in .csv format using an application developed by CRF FIAT, one of the partners in the ICT-Emissions project.

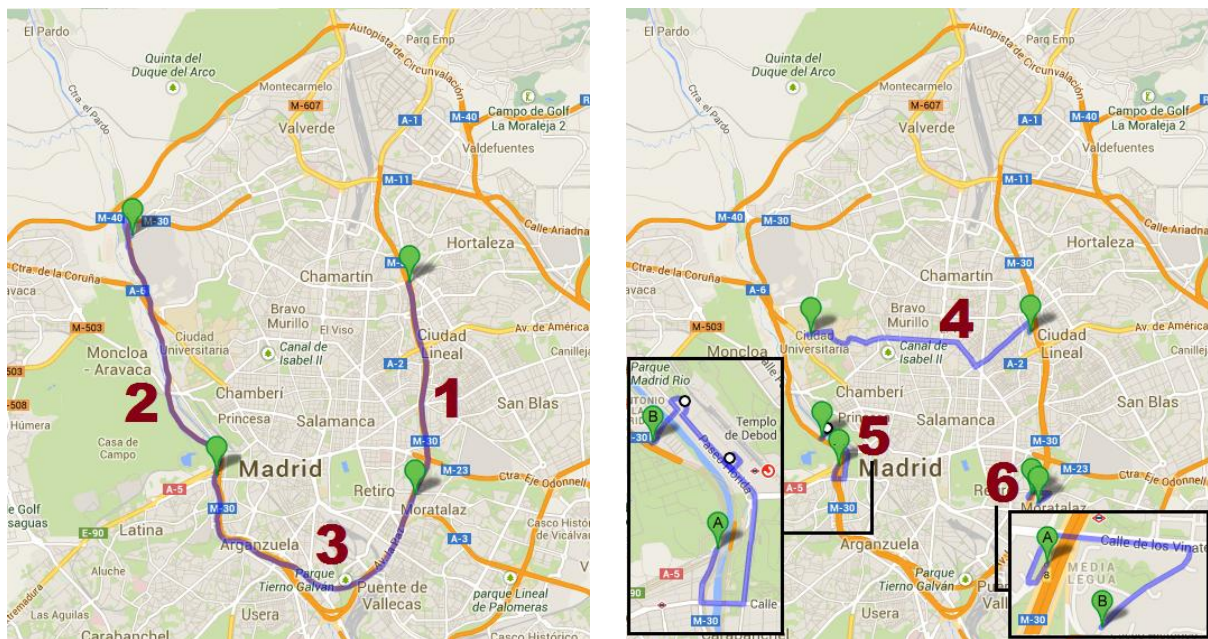


Fig. 1 – Application areas of ICT measures in Madrid. Motorway (1, 2 & 3) and urban sections (4, 5 & 6).

Figure 1 shows the areas in which the ICT measures have been implemented. Section speed control, variable speed limits (recommended) and cruise control have been tested in different sections of the inner ring motorway M-30, while eco-driving techniques were also conducted in three different urban routes. Table 1 provides details about the ICT measures tested in each section, the number of analysed trips and their average lengths.

Table 1 – Areas of implementation, number of valid trips and average length by tested ICT measure

Areas	ICT measure	Type of section	Floating cars	Trips number	Average length
1	Section speed control	Motorway	Punto 1.2G, Punto 1.3D, Bravo 1.6D	528	5.8
2	Variable Speed Limits	Motorway	Punto 1.2G, Punto 1.3D, Bravo 1.6D	350	6.7
1, 2	Eco-driving	Motorway	Bravo 1.6D	472	5.8
4	Eco-driving	Urban	Bravo 1.6D	60	7.0
5	Eco-driving	Urban	Bravo 1.6D	168	2.8
6	Eco-driving	Urban	Bravo 1.6D	128	1.2
1+2+3	Cruise control	Motorway	Bravo 1.6D	27	21.3



Subsequent treatment of these data, taking also into account traffic intensity, incidents and weather conditions data, makes possible to obtain the results of fuel and CO₂ savings, presented within the next section.

4. Results

After analysing the data collected according to the methodology presented above, it appears that all measures have a certain effect on fuel and CO₂ emissions. Figure 2 shows the percentages of fuel and CO₂ emissions savings per vehicle when variable speed limits and section speed control are activated, compared to the trips conducted in the base case scenario (no measure applied). The averages are weighted taking into account the number of trips per vehicle.

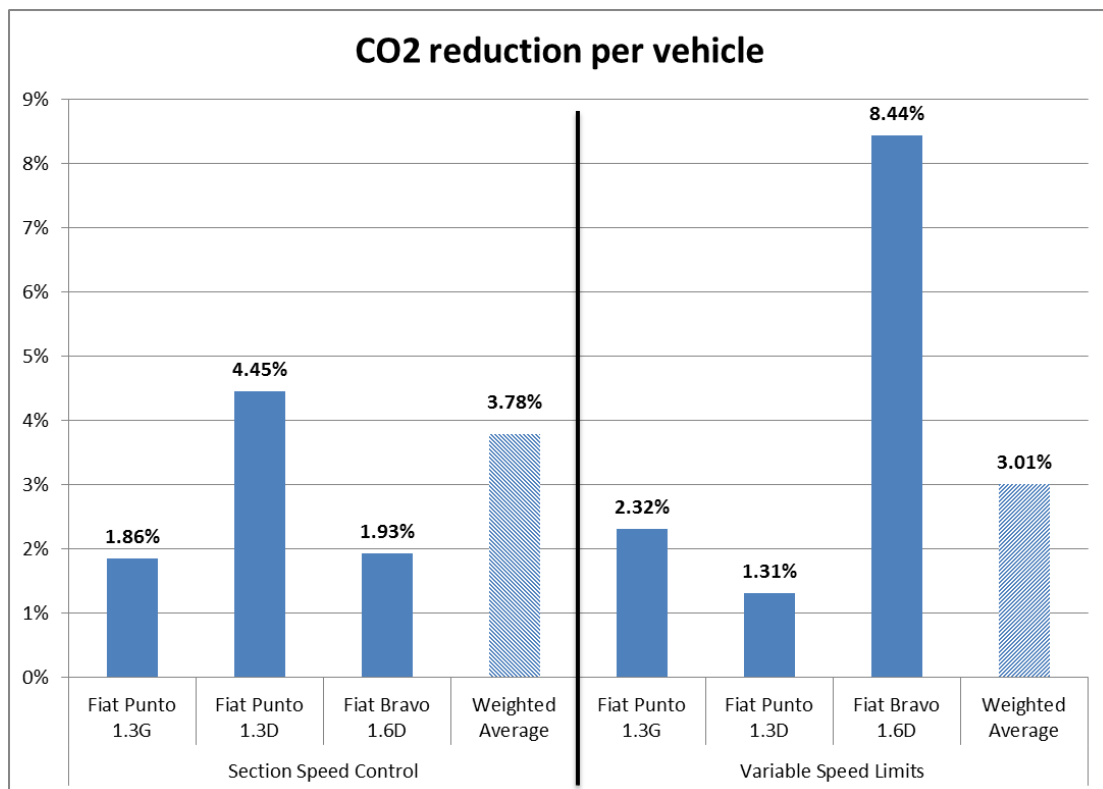


Fig. 2 – Fuel consumption and CO₂ emissions savings per vehicle under section speed control and variable speed limits

As already mentioned in the methodology, FIAT Bravo driver was trained to apply eco-driving techniques and cruise control in some of the analysed sections. Figure 3 presents the disaggregated data for FIAT Bravo 1.6D, including the combined effect of eco-driving with variable speed limits, which shows adding saving effects.

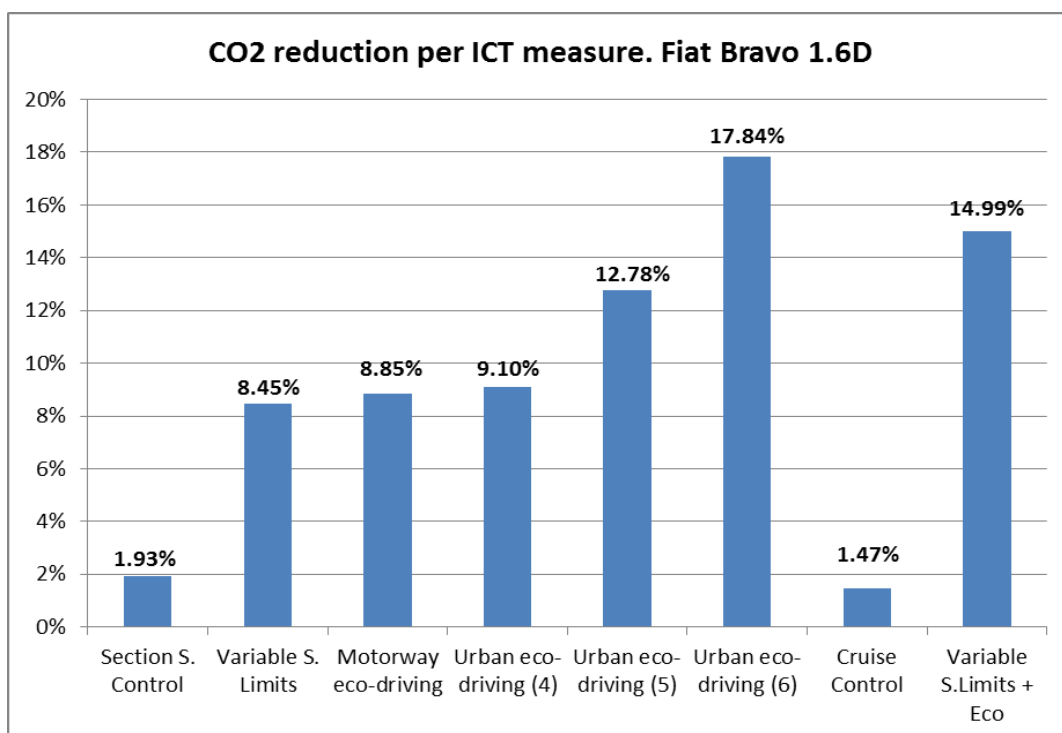


Fig. 3 – Fuel consumption and CO₂ emissions savings (%). Fiat Bravo 1.6D

In all these measurements, most of the emission reduction is produced by a homogenization of driving speeds, thus reducing the number of braking and acceleration processes and boosting a better flow behaviour. However, the average speed and, therefore, travel times vary slightly and in most cases the application of the measure even produces decreasing travel times. These results are reported in Table 2.

Table 2 – Fuel consumption and travel time variation (%) by section

Areas	ICT measure	Type of section	CO ₂ Savings	Travel Time Variation
1	Section speed control	Motorway	3.78%	-3.26%
2	Variable Speed Limits	Motorway	3.01%	-6.94%
1, 2	Eco-driving	Motorway	8.85%	-5.17%
4	Eco-driving	Urban	9.10%	1.88%
5	Eco-driving	Urban	12.78%	-1.60%
6	Eco-driving	Urban	17.84%	-0.62%
1+2+3	Cruise control	Motorway	1.47%	-1.25%

5. Conclusions

This study provides specific data on the potential of certain ICT solutions to reduce fuel consumption and CO₂ emissions. They have been tested with a significant number of trips, achieving positive results in all of them in terms of CO₂ savings and in most of them also in travel time reduction.

The measures related to traffic and speed management (section speed control and variable speed limits) at a particular section have impact in the traffic flow behaviour, avoiding acceleration and braking processes and reducing the impact of congestion due to high traffic intensities. Thus, in addition to its primary and main



purpose -road safety-, the tested measures show a considerable potential for reducing CO₂ emissions (about 3%) and also for increasing average speeds.

On the other hand, measures that affect the individual driving profile, such as eco-driving, have even a greater potential, especially in urban areas, where it is possible to anticipate the acceleration and braking processes optimizing consumption. Fuel and CO₂ savings from 8% to 17% are recorded without compromising travel times. Eco-driving has also been tested while variable speed limits were activated, achieving CO₂ reductions close to 15% and showing how some measures may present synergies.

However, eco-driving effectiveness depends largely on the driver bias to adopt these less aggressive and more efficient driving attitudes. It is also important to mention that these figures are related to individual savings and it is unknown how the traffic flow behaviour would vary according to the eco-driving penetration rate.

In the case of cruise control, this technology has limited application in metropolitan areas, as it is restricted to sections and time frames in which traffic intensity is low. However, more advanced cruise control technologies (known as intelligent or adaptive) can achieve more widespread use in high-capacity roads in metropolitan areas.

It can be concluded that the analysed measures present a real potential to reduce fuel consumption and CO₂ emissions, being these empirical results in line with other studies and experiences. However, their effectiveness depends largely on the particular characteristics of each area and the drivers' compliance with speed limits and other recommendations. This fact emphasizes the need of an integrated modelling process in order to assess as accurately as possible their overall impact on emissions.

Acknowledgements

This work was supported in part by the European Commission under the ICT-Emissions project, "Development of a methodology and tools for assessing the impact of ICT measures in road transport emissions," Grant Agreement No. 288568. The authors also acknowledge the collaboration of the City of Madrid, Calle-30 and CRF FIAT in the process of data collection.

References

Barkenbus, J.N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 762-769.

Cascetta, E., Punzo, V., & Sorvillo, R. (2010). Impact on vehicle speeds and pollutant emissions of a fully automated section speed control scheme on the Naples urban motorway. In *Proceedings of 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2008). Action plan for the deployment of Intelligent Transport Systems in Europe. Tech. Report. COM (2008) 886, 2008.

EUROPEAN COMMISSION (2009). Mobilising Information and Communication Technologies to Facilitate the Transition to an Energy Efficient, Low-carbon Economy, COM (2009) 111, 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2013). Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2011 and inventory report 2013, European Environment Agency, Copenhagen, 2013.

FIAT (2010). Eco-Driving Uncovered- The benefit and challenges of eco-driving, based on the first study using real journey data. Downloaded on September 3rd, 2013:



http://www.fiat.co.uk/uploadedFiles/Fiatcouk/Stand_Alone_Sites/EcoDrive2010/ECO-DRIVING_UNCOVERED_full_report_2010_UK.pdf

GREENHOUSE GAS INVENTORY OFFICE OF JAPAN (2013). National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, Ministry of the Environment, Japan, 2013.

ITF/OECD (2010). Transport greenhouse gas emissions: Country data 2010. International Transport Forum, 2010.

Klunder, G.A., Malone, K., Mak, J., Iwilmink, I.R., Schirokoff, A., Sihvola, N., Holmén, C., Berger, A., De Lange, R., Roeterdink, W. & Kosmatopoulos, E. (2009). Impact of Information and Communication Technologies on Energy Efficiency in Road Transport, TNO report for the European Commission, 2009.

Mendiluce, M., Perez-Arriaga, I., & Ocaña, C. (2010). Comparison of the evolution of energy intensity in Spain and in the EU15. Why is Spain different? *Energy Policy*, 38(1), 639-645.

Monzon, A., Vega, L.A. & Pardeiro, A.M. (2006). Reducing car trips and pollutant emissions through strategic transport planning in Madrid. *8th Highway and Urban Environment Symposium*. Nicosia, CIPRUS. 2006

Ntziachristos, L. & Samaras, Z., (2000). Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters. *Atmospheric Environment*, 4611–4619.

Onoda, T. (2009). IEA policies – G8 recommendations and an afterwards. *Energy Policy* (10), pp. 3823-3831.

Pérez, P. J., & Monzón, A. (2006). Informe sobre transporte y medio ambiente. Trama 2006. *Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente*.

Ramanathan, V. & Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 1, pp. 37-50.

Soole, D.W., Watson, B.C. & Fleiter, J.J. (2013). Effects of average speed enforcement on speed compliance and crashes: A review of the literature. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 54, no. 0, pp. 46-56.

Wilbers, P. (1999). The new driving force: A new approach to promote energy-efficient purchasing and driving behaviour. In *EcoDrive Conference proceedings*, Graz, Austria, 44-47.

Zegeye S. K., De Schutter B., Hellendoorn J., & Breunese E. A. (2009). Model-based traffic control for balanced reduction of fuel consumption, emissions, and travel time. In *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Transportation Systems*, pages 149–154, Redondo Beach, California, USA, September 2009.

A vueltas con la última milla

Andrea Alonso Ramos

Investigadora de TRANSyT UPM, España

Andrés Monzón de Cáceres

Catedrático de Transportes, España

María Eugenia López-Iambas

Prof. Transportes UPM, España

RESUMEN

De acuerdo con el Libro Blanco (CE, 2011), la calidad es clave para fomentar el uso del transporte público: horarios convenientes, información adecuada, comodidad, facilidad de acceso, fiabilidad e integración intermodal (todos ellos relacionados con la movilidad puerta a puerta sin discontinuidad) son fundamentales para dicho fin. Los nodos intermodales, como intercambiadores y estaciones son, por tanto, elementos esenciales de las redes de transporte. Sin embargo, no alcanzan en su mayoría la máxima eficiencia en términos de coordinación de la información y modelos de gestión, especialmente cuando en ellos convergen modos de corta y larga distancia.

La satisfacción de los clientes es una buena medida del éxito de cualquier servicio, directamente relacionada con el cumplimiento de sus expectativas. Por tanto, los gestores podrían beneficiarse de técnicas de benchmarking basadas en evaluaciones cuantitativas de la calidad realizadas por los propios usuarios, ya que permiten valorar el funcionamiento de los servicios en términos relativos. Sin embargo, comparar directamente el grado de satisfacción del servicio de estaciones, que se encuentran en distintas ciudades e incluso distintos países, puede dar lugar a sesgos y conclusiones erróneas, debido a posibles diferencias culturales

Por otro lado, ningún viaje de largo recorrido consta de una sola etapa cuando no se realiza en coche: sea “última” o “primera” milla, su recorrido puede comportar en ocasiones más que el viaje principal. El Proyecto HERMES (VII PM) ha abordado este problema mediante el análisis de nodos concretos, cuyo estudio ha permitido advertir las deficiencias y barreras que encuentran los viajeros a la hora de realizar un viaje intermodal, en el que además intervienen modos de corta y larga distancia.

Entre los casos de estudio se encuentran el intercambiador de Avenida de América en Madrid, las estaciones de tren de Zaragoza y Lleida, Part-Dieu en Lyon y Gotemburgo en Suecia. En todos ellos se producen diariamente intercambios entre modos terrestres de corta y larga distancia.

En cada una de las estaciones, se realizaron más de 300 encuestas a viajeros, que permitieron, por una parte, conocer su perfil (características personales), los factores que se tienen en cuenta a la hora de viajar y el motivo y modo de efectuar el viaje y por otra, determinar su grado de satisfacción con la calidad del servicio. Las preguntas sobre calidad abarcaron múltiples aspectos, entre los que se encuentran aquellos identificados en el Libro Blanco como fundamentales (horarios, información, comodidad, facilidad de acceso, fiabilidad e integración).

En este artículo, se presenta una metodología para elaborar índices de satisfacción normalizados, que tengan en cuenta estas diferencias y permitan determinar el grado de cumplimiento de las expectativas de los viajeros en distintos aspectos de la calidad.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte, factor clave para el desarrollo económico y social en Europa, debe ser optimizado para suplir las necesidades de la población de manera sostenible. En el White Paper aprobado en 2001 por la Comisión Europea (CE, 2001), se identificaba el desequilibrio modal como uno de los principales obstáculos para lograr un desarrollo sostenible, concretándose en el ámbito del transporte terrestre de pasajeros, en un absoluto predominio del vehículo privado. En ese momento, el coche absorbía un 83% de los desplazamientos en la UE-27, el autobús un 10% y el tren un 7% (EUROSTAT¹). Este desequilibrio modal generalizado, ponía el acento en ciertos problemas derivados del transporte como la congestión, la dependencia energética del petróleo, las emisiones de GEI, la contaminación atmosférica o los accidentes. En el White Paper 2001, se proponían una serie de medidas de gestión de carácter general para mitigar estos efectos, entre las medidas contempladas, figuraban la revitalización de la red ferroviaria, revisión de los sistemas tarifarios de manera que se tengan en cuenta las externalidades, una mejora del transporte público urbano, el desarrollo de vehículos más limpios o fomento de la intermodalidad.

Diez años después, la CE vuelve a hacer balance de la situación europea en el White Paper 2011 (CE, 2011). Durante esos años, se han conseguido grandes progresos en temas de seguridad y protección, ha aumentado la cohesión del territorio mediante la mejora y ampliación de las redes de infraestructuras, especialmente de la red ferroviaria, y gracias al progreso técnico, se ha conseguido aumentar la eficiencia energética de los medios de transporte. Sin embargo, a pesar de estos avances, el sistema de transporte no ha cambiado de forma esencial, se ha hecho más eficiente y menos contaminante, pero ha crecido en volumen, y el reparto modal en Europa en 2011 (84 % en coche, 9 % en autobús y 7% en tren, EUROSTAT), es básicamente igual al de 2001. La evolución del transporte terrestre de pasajeros por la persistencia de los problemas identificados anteriormente es una de las grandes preocupaciones para la CE, como se muestra en el White Paper 2011. El reto que se plantea es romper la dependencia del petróleo sin sacrificar la accesibilidad. Han de surgir nuevos modelos de transporte, capaces de trasladar conjuntamente desde su origen hasta su destino a un mayor número de pasajeros, utilizando la combinación de modos más eficiente. Para ello se ha de optimizar el rendimiento de las cadenas multimodales, algo que sigue siendo una asignatura pendiente en Europa, únicamente la integración de las redes dará lugar a mayores opciones, haciendo de los modos colectivos una opción competitiva frente al vehículo privado. En este objetivo, las infraestructuras juegan un papel clave, no es posible ningún cambio fundamental en el transporte si no está respaldado por una red adecuada y más inteligencia en su uso.

Parte de la solución a los problemas identificados en sucesivos documentos aprobados por la CE, se encuentra en gestionar la movilidad de larga distancia considerando las múltiples etapas que componen los viajes cuando se realizan en modos colectivos: los pasajeros han de ir desde su punto de origen hasta el nodo de interconexión donde comienza el trayecto de largo recorrido y desde donde éste acaba hasta su destino final. En la valoración de todas las etapas, es donde entra en juego el transporte urbano. “La movilidad urbana es un componente central del transporte a larga distancia. La mayor parte del transporte tanto de pasajeros como de mercancías empieza y termina en zonas urbanas, y atraviesa varias de ellas en su recorrido. Las zonas urbanas deberían proporcionar puntos de interconexión eficaces para la red transeuropea de transporte y ofrecer un transporte de último kilómetro eficiente para viajeros y mercancías” (CE, 2009). Por lo tanto, los intercambiadores de

¹ El reparto modal se refiere a viajes de larga distancia y está calculado en vehículos-km.

transporte son una pieza clave en la movilidad, donde se combinan viajes de larga distancia con los de acceso y dispersión. La buena conexión entre ambas partes de un viaje de larga distancia pueden hacer más o menos competitivas las alternativas de transporte público (Monzón et al., 2012).

En el proyecto HERMES (High Efficient and Reliable ArrangeMEnts for CrossModal Transport, 2010-2012) del 7^o PM de la UE, se ha analizado la eficiencia de los intercambiadores de transporte, en parte mediante el análisis de casos concretos, cuyo estudio ha permitido reparar en las barreras que encuentran los viajeros a la hora de realizar un viaje intermodal, a través de encuestas realizadas a stakeholders y a los propios usuarios de las estaciones. En el trabajo que se presenta, se examinan cinco intercambiadores, con la intención de determinar sus deficiencias y sus ventajas, mediante técnicas de benchmarking basadas en los resultados de satisfacción de los viajeros con diversos aspectos de las terminales.

2 PROYECTO HERMES

El proyecto HERMES, se llevó a cabo con el objetivo último de mejorar la interconectividad en las terminales de pasajeros donde confluyen modos de corta y larga distancia. La teoría que subyace es que es posible obtener una mayor cuota de mercado para los modos colectivos en los viajes de larga distancia, mejorando las conexiones entre las redes de transporte urbano e interurbano, cuya interacción se da en los nodos intermodales (HERMES, 2010).

Un consorcio internacional, compuesto por 11 centros de investigación de distintos países de Europa llevó a cabo el proyecto. Por una parte, se definieron los requisitos regulatorios y legales, así como las barreras a la interoperabilidad mediante un exhaustivo estudio de la situación en Europa y entrevistas a 148 stakeholders involucrados. Por otra parte, se escogieron 11 casos de estudio en 9 de los países participantes: 4 aeropuertos, 2 puertos, y 5 estaciones o intercambiadores de transporte terrestre. Para cada uno de estos nodos, se analizaron los servicios ofrecidos, modos de larga distancia, conexiones con la red de transporte urbano, conexiones físicas dentro de la estación, y otros aspectos relacionados con la calidad. Además, se realizaron más de 200² cuestionarios en cada caso de estudio a sus usuarios, para conocer por un lado su perfil, preferencias, modo de efectuar el viaje o factores que consideran a la hora de planificarlo y por otro su grado de satisfacción con distintos aspectos de la terminal. Para la investigación que se presenta, solo se han tenido en cuenta los casos de estudio que corresponden a estaciones o intercambiadores donde confluyen modos de transporte terrestre: el Intercambiador de Avenida de América (Madrid- España), Part-Dieu Station (Lyon-Francia), Gothenburg Central Station (Gotemburgo- Suecia), Estación de Zaragoza- Delicias (Zaragoza- España) y Estación de Lérida- Pirineos (Lérida- España).

3 ENCUESTA Y METODOLOGÍA

3.1 Diseño de la encuesta

Las encuestas realizadas en HERMES para averiguar los perfiles de los usuarios de los casos de estudio y conocer su satisfacción sobre diferentes aspectos de los intercambiadores, fueron diseñadas en el marco del proyecto en base a una revisión exhaustiva de la literatura existente. Para una buena gestión de los servicios intermodales, es necesario obtener información sobre las necesidades del viajero, y su percepción (Müller et al. 2004). Sin embargo, las preferencias o necesidades de los usuarios, dependen de varios factores, como por ejemplo el propósito de viaje, el género, la edad o la

² En todos los casos se realizaron más de 300 encuestas salvo en el caso de Lérida.

frecuencia con la que viajan (HERMES, 2010).

Las primeras preguntas de la encuesta, se realizaron para caracterizar los viajes, se obtuvieron los orígenes y destinos, los rangos de tiempo y distancia que suponían para los viajeros las dos etapas principales del viaje- el trayecto de larga distancia y el trayecto de acceso o dispersión desde o hasta la terminal- y por último los modos usados en cada etapa.

El siguiente grupo de preguntas iban encaminadas a conocer el perfil del viajero, ya sean características personales que tengan influencia en su movilidad, como el género y la edad (Müller et al., 2004), o características relacionadas con la motivación de los viajeros como el propósito de viaje, o los principales factores que determinan sus decisiones, que suelen ser fundamentalmente el tiempo, el precio y la comodidad (SWITCH, 2001). Los estudios revisados en el diseño de las encuestas, mencionan también otros aspectos que finalmente no se tuvieron en cuenta en el cuestionario, como la regularidad con que se usan los servicios de transporte o condicionantes físicos que puedan restringir la movilidad (Müller et al., 2004; SWITCH, 2001), por considerarse más alejados del enfoque del proyecto.

Por último, se incluyeron preguntas sobre el grado de satisfacción de los usuarios con distintos aspectos de los intercambiadores, que según varios estudios (Hine y Scott, 2000; PIRATE, 2001) al respecto son:

- Calidad de las conexiones intermodales, en dos sentidos, modos y servicios ofrecidos en las terminales y facilidad física de acceso dentro de las mismas.
- Comodidad y confort, este concepto es muy amplio dado que se refiere a estaciones donde confluyen varios servicios de transporte, las preguntas incluidas en los cuestionarios sobre estos aspectos estuvieron relacionadas con el uso, disponibilidad y grado de saturación del espacio y asientos, la limpieza, y la accesibilidad a los servicios existentes.
- Equipamiento y prestaciones adicionales, como tiendas, servicios al equipaje, o conexiones a internet.
- Seguridad.

Un aspecto considerado también importante para los servicios de transporte en general es la información, en HERMES no se incluyeron preguntas relativas a la información en todos los casos de estudio y por tanto no se ha podido introducir este elemento en el análisis comparativo que se presenta.

Con la metodología que se ha desarrollado, se pretende determinar a partir del grado de satisfacción declarado por los encuestados y utilizando técnicas de benchmarking, qué aspectos debían ser mejorados en cada caso, y por el contrario, qué aspectos funcionaban considerablemente bien. El planteamiento del que parten estos procedimientos es que la clave para mejorar los servicios prestados es considerar la percepción del pasajero como primer paso para proporcionar un transporte intermodal de calidad (Müller et al., 2004).

3.2 Características de la encuesta

Las encuestas se llevaron a cabo en las propias estaciones o intercambiadores, donde los encuestadores se dirigían aleatoriamente a los usuarios. Sin embargo, gran parte de los encuestados se encontraban en andenes, paradas u otras zonas de espera, donde aguardaban a que llegase su tren o autobús, esto resultó ser una forma efectiva de identificar a los viajeros de corta-larga distancia, que además disponían de tiempo para contestar a las preguntas de manera coherente. Todas las encuestas se realizaron en el año 2011, entre los meses de abril y mayo, siempre en días de diario y desde primera hora de la mañana hasta última hora de la tarde.

La Tabla 1 muestra las principales características de las encuestas. Se puede observar que se están comparando terminales muy diferentes considerando su flujo de pasajeros, por un

lado, se están analizando grandes intercambiadores como Avenida de América o Part-Dieu Station, donde conmutan más de 20 millones de pasajeros anuales, y por otro, estaciones como Lérida-Pirineos, con una afluencia de medio millón de pasajeros anuales. En todos los casos de estudio, se realizaron más de 200 encuestas salvo en la estación de Lérida, donde a pesar de que la campaña duró tres días- como en el resto de casos españoles- no se pudo llegar a esta cifra, precisamente porque la circulación de viajeros es mucho menor.

Tabla 1. Características de la muestra en cada caso de estudio

Características	Casos de estudio				
	Avenida de América	Part-Dieu Station	Gothenburg Central Station	Zaragoza-Delicias	Lérida-Pirineos
Viajeros al año (millones)	27,9	22,8	16,8	4,7	0,5
Tamaño de la muestra (nº de encuestas)	383	745	603	230	122

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

4 CASOS DE ESTUDIO

A continuación se presenta una breve descripción de los casos de estudio y las ciudades donde se ubican. El trabajo realizado se basa en la comparación de cinco terminales, ubicadas en ciudades diferentes de tres países distintos. El tamaño de las ciudades afecta enormemente al transporte, aquí se analizan grandes ciudades como Madrid, capital de España, con una población de 3,3 millones de habitantes; ciudades intermedias como Zaragoza, Gotemburgo o Lyon, cuya población oscila entre medio millón y un millón de habitantes; y ciudades más pequeñas, como Lérida con 140.000 habitantes.

Los casos de estudio, se exponen ordenados de mayor a menor tráfico de viajeros, existiendo entre ellos grandes diferencias, tanto en oferta de servicios y modos (Tabla 2), como en flujo de pasajeros (Tabla 1). En algunos casos se trata de importantes intercambiadores como el de Avenida de América (Madrid), que recoge los flujos de autobuses del norte de España, y que cuenta con excelentes conexiones a la red de transporte público urbano, permitiendo el tránsito de 28 millones de pasajeros al año. Por otro lado están grandes estaciones, como la Estación de Part-Dieu (Lyon) o la estación de Gotemburgo, donde confluyen servicios ferroviarios y de autobús para trayectos de larga distancia, además de estar dotados de una oferta intermodal de servicios de transporte de corta distancia. Ambas estaciones son puntos clave en sus ciudades, dando servicio a 23 y 17 millones de pasajeros al año respectivamente. Por último, se presentan también estaciones relativamente recientes, como la estación de Zaragoza-Delicias o la de Lérida-Pirineos, ambas inauguradas para dar cabida a los servicios ferroviarios de Alta Velocidad, además de los convencionales. En la estación de Zaragoza, donde se ofrecen también servicios de autobús de larga distancia, transitan 5 millones de pasajeros al año, en Lérida-Pirineos el tráfico de viajeros es mucho menor (0,5 millones), guardando cierta lógica con los tamaños de ambas ciudades.

Además, para cada caso se hace una breve descripción del perfil de los viajeros según los resultados de las encuestas, que se exponen en las Tablas 3, 4 y 5.

Tabla 2. Oferta de servicios de larga y corta distancia en los casos de estudio

Modos		Oferta de servicios en los casos de estudio				
		Avenida de América	Part-Dieu	Gothenburg Central	Zaragoza-Delicias	Lérida-Pirineos
Larga distancia (> 100km)	Ferrocarril		Servicios de Alta Velocidad internacionales /interregionales Servicios Convencionales interregionales	Servicios Convencionales internacionales/ interregionales	Servicios de Alta Velocidad interregionales Servicios Convencionales internacionales /interregionales	Servicios de Alta Velocidad interregionales Servicios Convencionales interregionales
	Bus	Servicios internacionales /interregionales	Servicios interregionales	Servicios internacionales/ interregionales		
Corta distancia (<100 km)	Autobús	14 líneas metropolitanas	1 línea metropolitana	14 líneas metropolitanas	2 líneas metropolitanas	4 líneas de autobús urbano
		10 líneas urbanas	14 líneas urbanas	9 líneas urbanas	4 líneas urbanas	
		6 líneas urbanas nocturnas				
	Metro	4 líneas de metro	1 línea de metro 2 líneas de tranvía	1 línea de tranvía		
	Coche	Parking (253 plazas)	Parking (5.500 plazas) Servicio de alquiler	Parking Kiss & Ride Servicio de alquiler	Parking (1.800 plazas)	Kiss & Ride
	Taxi	Parada de taxis	Parada de taxis	Parada de taxis (cercana)	Parada de taxi	Parada de taxi
	ffcc		2 líneas regionales	2 líneas de cercanías	1 línea de cercanías	1 línea regional
Otros	Autobús 24 h al aeropuerto	Aparcamiento para bicicletas y motos	Servicio de taxi colectivo	Aparcamiento para bicicletas Bus turístico		

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

4.1 Avenida de América, Madrid

La ciudad de Madrid, con 3,3 millones de habitantes, se encuentra en el centro de la Península y de la Comunidad de Madrid, que se expande sobre una superficie de 8.000 km², donde viven 6 millones de personas. Debido a las grandes dimensiones de la región, los intercambiadores de transporte juegan un papel muy importante, ya que permiten la intermodalidad corta/ larga distancia. Uno de los objetivos del Consorcio Regional de Transportes de Madrid es disponer de una red de puntos de intercambio entre modos, localizados en la confluencia de la almendra central de los grandes corredores de las carreteras radiales.

El intercambiador de Avenida de América está localizado en el centro-oeste de Madrid, en

una de las principales vías de acceso a la ciudad, que recoge los flujos provenientes del corredor de la zona nordeste de España. Ofrece muy buenas conexiones con el transporte público urbano, especialmente con la red de metro. El edificio se estructura en cuatro plantas bajo rasante. Las dos primeras plantas están dedicadas a los autobuses de largo recorrido, autobuses urbanos e interurbanos, en el resto se encuentran las conexiones con la red de metro, parking, taquillas, y tiendas.

Según los resultados de las encuestas, los viajeros en Avenida de América son por lo general gente joven (51% de 21 a 35 años). El motivo de viaje mayoritario resulta ser con diferencia el ocio (64%), y el factor de influencia más recurrente, el precio del billete (47%). Además, el modo más demandado de acceso al intercambiador es el metro (74%).

4.2 Part-Dieu Station, Lyon

Lyon es una ciudad situada en el centro-este de Francia, en la región Ródano-Alpes, entre París (470 km) y Marsella (320 km), con una población de 480.000 habitantes.

La Estación intermodal de Part-Dieu entró en servicio en 1983 como parte de una nueva política de planeamiento urbano, creada con el objetivo de construir un segundo centro en la ciudad. Actualmente, la estación forma parte del importante centro administrativo, comercial y financiero en que se ha convertido la zona. Part-Dieu es la principal estación ferroviaria de Lyon y una de las siete que posee la ciudad. Pasan por ella 22,8 millones de viajeros al año, cantidad que supera ampliamente las expectativas iniciales. La estación está caracterizada por una extensa oferta de servicios de Alta Velocidad.

El análisis de las encuestas indica que la mayor parte de los viajeros en Part-Dieu viaja por ocio (57%), si bien existe también una alta proporción de viajes por trabajo (33%). En congruencia con el éxito de los servicios de Alta Velocidad en la estación, el factor más relevante en las decisiones de un 32% de los usuarios resulta ser el tiempo, aunque para otra parte importante (25%) el precio del billete es más determinante que el tiempo. Los modos más habituales de acceso a la estación son el autobús urbano (48%), y el tranvía (30%).

4.3 Gothenburg Central Station

Gotemburgo es la segunda ciudad más grande de Suecia, con una población de 510.000 habitantes, caracterizada por un alto porcentaje de estudiantes universitarios. Tanto la ciudad como la región presentan altas tasas de aumento de población, y esto se traduce en una demanda elevada y creciente de transporte desde y hasta la ciudad.

Gothenburg Central Station, está situada en el centro de la ciudad, es el intercambiador de transporte con mayor tráfico de pasajeros en el sur-este de Suecia. Proporciona buenas conexiones con la capital del Suecia- Estocolmo- así como con las capitales de Noruega y Dinamarca- Copenhague y Oslo. La estación se compone de tres edificios, la antigua pero reformada estación de tren, la nueva estación de autobuses y el edificio donde se sitúa el punto de encuentro. Los tres edificios, constituyen conjuntamente una zona de tránsito de viajeros donde se dan también otras actividades, gracias a la oferta de servicios como tiendas, restaurantes, oficinas y un hotel.

Los datos de las encuestas muestran que en la estación existe un porcentaje excepcionalmente alto de gente joven (32% de 15 a 20 años), acorde con la alta proporción de universitarios en la ciudad. Además, aunque el motivo de viaje más habitual es el ocio (57%) seguido del trabajo (23%), el peso de los viajes por motivo estudios es más alto que en el resto de los casos de estudio (13%). El factor más determinante para los usuarios de Gotemburgo es el precio del billete (34%), y en su mayoría acceden a la estación en transporte público urbano (autobús 36% y tranvía 29%).

4.4 Estación de Zaragoza- Delicias, Zaragoza

Tanto Zaragoza como Lérida son dos ciudades situadas en el nordeste de España, estratégicamente ubicadas en medio del corredor Madrid-Barcelona, ambas ciudades están separadas por una distancia de 160 km.

En Zaragoza, ciudad con una población de 680.000 habitantes, se inauguró la nueva estación de tren Zaragoza-Delicias en 2003, para albergar la llegada de los servicios de Alta Velocidad. La estación se encuentra alejada del centro de la ciudad, y esto generó numerosas críticas en su momento. La estación de autobuses está emplazada dentro de la estación de tren, posibilitando las conexiones entre ambos modos. La estación ocupa una amplia superficie de 190.000 m², y cabe destacar el característico diseño de su cubierta, de gran altura y que dota de luz natural a toda la estación. El vestíbulo para llegadas es independiente del vestíbulo de salidas, donde se encuentran también otras prestaciones como servicios de atención al cliente, equipaje o cafetería.

De las encuestas realizadas en Zaragoza, se deduce que el motivo más común de viaje es el ocio (50%) igual que en los casos de estudio anteriores, si bien los viajes por motivo trabajo tienen también cierta importancia (25%). El tiempo de viaje y el precio son ambos bastante influyentes en las decisiones de viaje de los usuarios de Zaragoza (28% y 26% respectivamente).

4.5 Estación de Lérida- Pirineos, Lérida

Lérida, con 140.000 habitantes, es la ciudad más pequeña dentro de los casos de estudio.

La estación de Lérida está situada en el norte de la ciudad. El edificio para viajeros, que data de los años 20, está catalogado como Bien Cultural de Interés Local. Sin embargo, en los años 1999-2001 se llevaron a cabo importantes obras de renovación y expansión necesarias para cumplir los requerimientos de los servicios de Alta Velocidad.

La estación no es propiamente intermodal- únicamente se ofrecen servicios ferroviarios de Alta Velocidad, Convencionales y Cercanías- sin embargo, algunas líneas de autobús urbano paran en frente de la estación, y dispone de parada de taxi a la salida. El edificio de viajeros está dotado de servicio de cafetería y hotel.

Las encuestas muestran que en la estación de Lérida, los viajeros son fundamentalmente de mediana edad (42% de 36 a 55 años), y viajan principalmente por trabajo (40%) y ocio (39%). El factor de influencia mayoritario es el tiempo de viaje (42%), seguido por el confort (26%), siendo el único caso de estudio donde el precio no es uno de los factores más valorados. Por último, la mayoría de usuarios accede en coche (43%), dato singular, ya que solo en esta terminal el modo principal de acceso es privado.

Tabla 3. Perfil de los usuarios

Caso de estudio	Motivo de viaje (%)				Edad (%)				Género (%)
	Trabajo	Estudios	Ocio	Otros	15-20 años	21-35 años	36-55 años	>64 años	Mujer
Avenida de América	17,8	3,7	64,3	14,2	13,9	51,2	24,1	6,0	56,3
Part-Dieu	33,2	8,8	57,3	0,8	12,9	50,2	26,2	7,3	52,8
Gothenburg Central	22,9	13,1	57,1	6,8	32,4	29,9	18,4	10,1	65,3
Zaragoza-Delicias	25,2	10,0	50,0	14,8	16,1	44,3	23,5	7,0	58,7
Lérida- Pirineos	40,2	10,7	39,3	9,8	10,7	37,7	41,8	3,3	55,7

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

Tabla 4. Factores de influencia en las decisiones de viaje

Caso de estudio	Principal factor de influencia (%)								
	Precio	Tiempo total de viaje	Confort	Puntualidad	Simplicidad de intercambio	Seguridad	Motivos medioambientales	Calidad del servicio	Otros
Avenida de América	47,4	5,8	16,3	9,6	4,7	1,4	0,8	2,2	11,8
Part-Dieu	25,2	32,2	7,9	7,1	5,4	5,0	5,4	1,1	10,9
Göteborg Central	33,6	16,2	17,6	6,4	3,0	8,9	8,9	1,4	3,9
Zaragoza-Delicias	26,0	27,9	12,1	9,3	4,7	1,9	0,0	2,8	15,3
Lérida- Pirineos	5,4	42,0	25,9	4,5	0,9	0,0	0,0	0,0	21,4

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

Tabla 5. Modos de acceso y dispersión- corta distancia- a las terminales

Caso de estudio	Modo de acceso (%)							
	Autobús	Metro o tranvía	Coche	Taxi	Cercanías	Andando	Moto o bicicleta	Otros
Avenida de América	9,8	73,7	8,4	7,9	-	-	-	0,3
Part-Dieu	47,6	30,2	3,7	1,5	4,1	10,9	1,1	0,9
Göteborg Central	35,7	28,9	11,2	2,8	15,1	-	0,8	5,4
Zaragoza-Delicias	55,0	-	24,3	18,3	1,0	-	1,0	0,5
Lérida- Pirineos	20,7	-	43,0	19,0	15,7	-	0,8	0,8

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

5 ÍNDICES DE CALIDAD EN BASE A LOS NIVELES DE SATISFACCIÓN

Tras haber caracterizado los casos de estudio y el perfil de sus usuarios, se analiza en los siguientes apartados, la calidad de distintos aspectos en las terminales, a partir del grado de satisfacción declarado en las encuestas. En el análisis se han utilizado las nueve preguntas sobre satisfacción comunes a todos los casos de estudio³:

- Calidad de las conexiones intermodales
 - 1. Oferta de servicios de transporte intermodales
 - 2. Comodidad y facilidad física de realizar el intercambio dentro de la terminal
- Confort
 - 3. Disponibilidad del espacio en el interior de la terminal, uso y dimensionamiento de su capacidad para acoger viajeros
 - 4. Acondicionamiento de las zonas de espera y disponibilidad de asientos

³ A excepción de la pregunta 6 que no se hizo en el caso de Lérida-Pirineos.

- Equipamiento y prestaciones adicionales
 - 5. Comercios, entretenimiento y otras prestaciones
 - 6. Servicios extra al viajero como gestión del equipaje o conexiones a internet
- Comodidad
 - 7. Accesibilidad a los servicios existentes dentro de la terminal
 - 8. Limpieza
- Seguridad
 - 9. Sensación de seguridad

En la Tabla 6 se expone el grado de satisfacción medio obtenido para cada aspecto en cada caso de estudio. Los resultados corresponden a una simple fórmula de promedio, mediante la cual se obtiene lo que se denominará a partir de ahora el **Nivel de Satisfacción (NS)**.

$$NS_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} x_{ijk}}{n_{ij}} \quad (1)$$

Siendo i cada uno de los aspectos evaluados (de 1 a 9); j cada uno de los casos de estudio (de 1 a 5); k el individuo encuestado; n_{ij} el número de individuos que evalúan su grado de satisfacción sobre el aspecto i para el caso de estudio j ; x_{ijk} el grado de satisfacción evaluado por el individuo k para el aspecto i y en el caso de estudio j (que varía de 1, muy insatisfecho, a 5, muy satisfecho)

Tabla 6. Niveles de Satisfacción. Ecuación (1)

Aspectos de calidad (i)		Niveles de Satisfacción (1-5). Promedios (NS_{ij})					NS_j
		Casos de estudio (j)					
		1	2	3	4	5	
		Avenida de América	Part-Dieu	Gothenburg Central	Zaragoza-Delicias	Lérida-Pirineos	
1	Oferta intermodal	3,42	3,71	3,78	2,38	2,37	3,13
2	Facilidad de realizar el intercambio	5,00	3,76	4,36	4,16	4,12	4,28
3	Uso y disponibilidad del espacio en el interior	3,07	3,42	3,38	4,25	4,12	3,65
4	Acondicionamiento de zonas de espera	2,88	2,59	3,36	4,06	3,53	3,28
5	Comercios y otras prestaciones	3,13	3,18	4,25	3,19	2,93	3,34
6	Servicios extra al viajero	2,77	3,30	4,05	3,07	-	3,30
7	Accesibilidad a los servicios existentes	3,64	2,91	3,21	3,85	3,79	3,48
8	Limpieza	3,46	3,53	3,62	4,11	4,13	3,77
9	Seguridad	3,49	3,13	3,54	3,92	4,08	3,63
NS_i		3,43	3,28	3,73	3,67	3,63	-

Fuente: Elaboración propia a partir de HERMES (2011)

Partiendo de estos resultados, se podría hacer un análisis para determinar qué casos de estudio gestionan mejor cada uno de los aspectos y qué casos lo hacen peor. Se observa que en este sentido, Avenida de América y Part-Dieu Station obtienen las calificaciones más bajas en muchos ámbitos. Avenida de América posee la peor calificación en las preguntas relacionadas con comodidad y confort, servicios extra al viajero y limpieza. Part-Dieu Station, resulta el caso peor evaluado en facilidad de intercambio, accesibilidad a los servicios existentes y seguridad.

Sin embargo, la satisfacción de los usuarios está muy relacionada con sus expectativas, es

decir, no depende tan solo de la calidad de los servicios sino también del nivel de exigencia. Por eso, comparar directamente las calificaciones en cada aspecto, puede dar lugar a conclusiones erróneas (Ölander, 1998). Por ejemplo, el hecho de que Part-Dieu Station sea la peor evaluada en la pregunta 2- facilidad de realizar el intercambio- con una nota media de 3,76 sobre 5 (el resto de estaciones superan el 4- Tabla 6, fila $i=2$), no significa necesariamente que la estación debería mejorar ese aspecto en concreto. De hecho, si únicamente se examinan las calificaciones para Part-Dieu (Tabla 6, columna $j=2$), se observa que los usuarios muestran un nivel de satisfacción mayor con la facilidad de intercambio que con el resto de aspectos, y por tanto consideran que hay otros ámbitos donde es más prioritaria la actuación.

En Avenida de América y en Part-Dieu Station, las calificaciones medias son más bajas que en el resto de casos (3,43 y 3,28), quizá por las elevadas expectativas de los usuarios, y no necesariamente debido a un servicio deficiente. Por el contrario, Gotemburgo, obtiene la nota media más alta (3,73), superando de forma evidente al resto de estaciones en los aspectos relativos a equipamiento y prestaciones adicionales (4,25 y 4,05), y siendo también la mejor evaluada en oferta intermodal (3,78), algo cuestionable si se compara la oferta de servicios de transporte de Gotemburgo con la de Part-Dieu (Tabla 2).

Debido a estas deficiencias de la comparación directa, se ha decidido realizar previamente un análisis comparativo vertical (distintos aspectos para un mismo caso de estudio), aplicando la fórmula de la Ecuación (2), que consiste en dividir el Nivel de Satisfacción en un aspecto i para un caso de estudio j , entre el grado de satisfacción medio de todos los individuos en todos los aspectos de ese caso de estudio. Se obtiene así un Índice de Satisfacción - IS_{ij} - normalizado, que tiene un valor cercano a la unidad e indica qué aspectos están relativamente peor o mejor valorados con respecto al resto para un mismo caso de estudio. Un Índice de Satisfacción mayor que 1 ($IS_{ij} > 1$), indica que los viajeros del caso de estudio j se consideran más satisfechos con la calidad del servicio en el aspecto i , que como media en todos los aspectos del caso j , un índice menor que 1 indica todo lo contrario. La Tabla 7 muestra los **Índices de Satisfacción** IS_{ij} .

$$IS_{ij} = \frac{\frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} x_{ijk}}{\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^9 \sum_{k=1}^{n_{ij}} x_{ijk}} \quad (2) \text{ (Trompet et al., 2013)}$$

Habiéndose definido $i; j; k; n_{ij}; x_{ijk}$ para la Ecuación (1); y siendo $N_j = \sum_{i=1}^9 n_{ij}$ el número total de respuestas de todos los individuos sobre todos los aspectos para el caso de estudio j

En la Tabla 7, se observa que la facilidad de intercambio obtiene la mejor calificación relativa en Avenida de América, Part-Dieu, y Gotemburgo. El aspecto peor considerado con respecto a los demás en Avenida de América son los servicios extra al viajero, en Part-Dieu el acondicionamiento de las salas de espera, y en Gothenburg Central Station la accesibilidad a los servicios existentes. En Zaragoza, la disponibilidad y uso del espacio interior es lo más apreciado, al contrario que los servicios extra al viajero que resultan ser lo menos apreciado. Por último, en Lérida, la oferta intermodal es la pregunta con la nota más baja, estando en este caso bastante alejada de la media ($IS_{15} = 0,65$), mientras que la limpieza obtiene la calificación relativa más alta.

Aunque estos índices (IS_{ij} - Tabla 7), elaborados mediante comparación vertical, son más apropiados que las calificaciones medias (NS_{ij} -Tabla 6) para determinar qué elementos habría que mejorar en cada terminal, un procedimiento que permita además un análisis horizontal (entre casos de estudio) puede dar resultados más adecuados (Ölander, 1998; Trompet et al., 2013)

Tabla 7. Índices de Satisfacción. Fórmula de Trompet et al. (2013). Ecuación (2)

Aspectos de calidad (<i>i</i>)		Índices de Satisfacción(IS_{ij})					IS_i
		Casos de estudio (<i>j</i>)					
		1	2	3	4	5	
		Avenida de América	Part-Dieu	Gothenburg Central	Zaragoza-Delicias	Lérida-Pirineos	
1	Oferta intermodal	0,99	1,13	1,01	0,91	0,65	0,94
2	Facilidad de realizar el intercambio	1,45	1,15	1,17	1,09	1,13	1,20
3	Uso y disponibilidad del espacio en el interior	0,89	1,04	0,91	1,11	1,13	1,02
4	Acondicionamiento de zonas de espera	0,83	0,79	0,90	1,06	0,97	0,91
5	Comercios y otras prestaciones	0,91	0,97	1,14	0,84	0,81	0,93
6	Servicios extra al viajero	0,80	1,01	1,08	0,80	-	0,92
7	Accesibilidad a los servicios existentes	1,05	0,89	0,86	1,01	1,04	0,97
8	Limpieza	1,00	1,08	0,97	1,08	1,14	1,05
9	Seguridad	1,01	0,95	0,95	1,03	1,12	1,01

Se observa que ciertos aspectos por norma suelen generar mayor descontento en los encuestados que otros (Tabla 7, última columna- IS_i), como es el nº 4- acondicionamiento y disponibilidad de asientos en las salas de espera- cuyo Índice de Satisfacción medio entre los casos de estudio es <1 ($IS_4 = 0,91$)- o como son los relacionados con el equipamiento y prestaciones adicionales (nº 5 y 6). Mientras que por el contrario, otros aspectos suelen estar siempre mejor percibidos que el resto, como es el aspecto nº2- comodidad y facilidad física de realizar el intercambio dentro de la terminal- cuyo Nivel de Satisfacción está en todos los casos de estudio por encima de la media ($IS_{2j} > 1$). Esto hace que el aspecto nº2 aparezca en varias terminales como el elemento que funciona mejor relativamente según los índices de la Tabla 7, algo no necesariamente cierto. De hecho su alto Índice de Satisfacción medio ($IS_2 = 1,20$) indica que el aspecto nº 2 es menos polémico que el resto y difícilmente generará descontento entre los viajeros. Por ejemplo, en el caso de Part-Dieu, parece ser mejor resultado el Índice de Satisfacción obtenido para el aspecto nº1- oferta intermodal ($IS_{12} = 1,15$), si se compara con el resto de IS_1 , y en el caso de Gotemburgo, también son más destacables los Índices de Satisfacción obtenidos para los aspectos nº 5 y 6- equipamiento y prestaciones adicionales (1,14 y 1,08 respectivamente), teniendo en cuenta que los Índices de Satisfacción medios para todos los casos de estudio en ambos aspectos son <1 (0,93 y 0,92).

Por este motivo, es necesario añadir en la metodología un segundo procedimiento comparativo, en este caso horizontal (entre distintos casos de estudio, para un mismo aspecto), que permita distinguir los elementos mejor y peor gestionados dentro de cada estación, y establecer un esquema de prioridades de actuación.

La fórmula expuesta en la Ecuación (3) se considera apropiada al objetivo, en documentos oficiales de la CE (Saisana y Tarantola, 2002), se aconseja su uso para procedimientos de benchmarking donde se pretenda comparar la actuación de distintos agentes en un mismo ámbito, otros autores han utilizado la misma fórmula para clasificar ciudades (Haghshenas y Vaziri, 2012) o países (Joumard y Gudmundsson, 2010), mediante indicadores de

gestión. En este caso, se quieren evaluar terminales intermodales en función de cómo están cumpliendo las expectativas de los viajeros en distintos aspectos. El resultado es una clasificación, basada en los Índices de Satisfacción (IS_{ij}), y más elaborada que un simple ranking, ya que tiene en cuenta las diferencias con la media y la desviación típica de los cinco casos de estudio en cada uno de los aspectos. Se consigue así un **Índice de Calidad**, que mide la calidad del servicio en cada aspecto y caso concreto de manera más objetiva que los índices anteriores.

$$IC_{ij} = \frac{IS_{ij} - \frac{1}{5}(\sum_{j=1}^5 IS_{ij})}{\sigma_{IS_i}} \quad (3)$$

Siendo IS_{ij} los Índices de Satisfacción calculados con la Ecuación (2); $\frac{1}{5}(\sum_{j=1}^5 IS_{ij})$ la media de los índices IS_{ij} en j ; y σ_{IS_i} la desviación típica de los índices IS_{ij} en i .

Por tanto, los IC_{ij} (Tabla 8) se consideran adecuados para determinar qué casos de estudio están ejecutando mejor y peor cada uno de los ámbitos, y por tanto, para cada caso de estudio qué aspectos tienen un potencial de mejora mayor, y debería dárseles prioridad en caso de actuación.

Tabla 8. Índices de Calidad

Aspectos de calidad (i)		Índices de Calidad(IC_{ij})				
		Casos de estudio (j)				
		1	2	3	4	5
		Avenida de América	Part-Dieu	Gothenburg Central	Zaragoza-Delicias	Lérida-Pirineos
1	Oferta intermodal	0,29	1,07	0,42	-0,18	-1,60
2	Facilidad de realizar el intercambio	1,75	-0,35	-0,21	-0,76	-0,44
3	Uso y disponibilidad del espacio en el interior	-1,12	0,22	-0,97	0,84	1,02
4	Acondicionamiento de zonas de espera	-0,72	-1,12	-0,10	1,38	0,55
5	Comercios y otras prestaciones	-0,20	0,29	1,57	-0,72	-0,94
6	Servicios extra al viajero	-0,85	0,58	1,11	-0,84	-
7	Accesibilidad a los servicios existentes	0,92	-0,92	-1,22	0,42	0,80
8	Limpieza	-0,78	0,35	-1,22	0,37	1,28
9	Seguridad	-0,04	-0,82	-0,91	0,20	1,57

Según estos resultados comparativos finales (Tabla 8), la oferta intermodal de Part-Dieu Station, parece inmejorable, mientras que es Avenida de América la terminal donde resulta más fácil realizar el intercambio. Lérida y Zaragoza, las dos estaciones más pequeñas del análisis son las peor consideradas en lo que se refiere a calidad de las conexiones intermodales, sin embargo en los aspectos relacionados con el confort, el espacio, y las salas de espera poseen los Índices de Calidad más altos, conclusiones bastante razonables, dado que ambas han sido recientemente renovadas, y tienen un tránsito mucho menor de viajeros. Gothenburg Station, se muestra como la estación con la oferta de servicios y prestaciones extra más amplia, pero la peor en limpieza y seguridad, ámbitos en los cuales Lérida-Pirineos aparece como la mejor.

Los Gráficos del 1 al 5 muestran los índices de calidad- IC_{ij} -en cada caso de estudio y

para cada caso, los aspectos están ordenados de mayor a menor calidad (de arriba abajo). Los aspectos situados más abajo en la escala y en general los aspectos con $IC_{ij} < 0$, tienen Índices de Satisfacción menores que la media de todas las terminales, y por tanto serían ámbitos con mayor potencial de mejora y de actuación prioritaria. Aunque existen matices propios de cada caso de estudio, por lo general, en las estaciones con mayor tráfico de pasajeros, los ámbitos relacionados con la saturación del espacio, la limpieza o la seguridad tienen mayor potencial de mejora, mientras que por el contrario, en las más pequeñas (Zaragoza y Lérida), es la oferta de servicios de transporte lo que habría que ampliar, y prueba de ello es que tienen el mayor porcentaje de acceso en modos privados (Tabla 5).

Gráfico 1. Índices de Calidad. Avenida de América

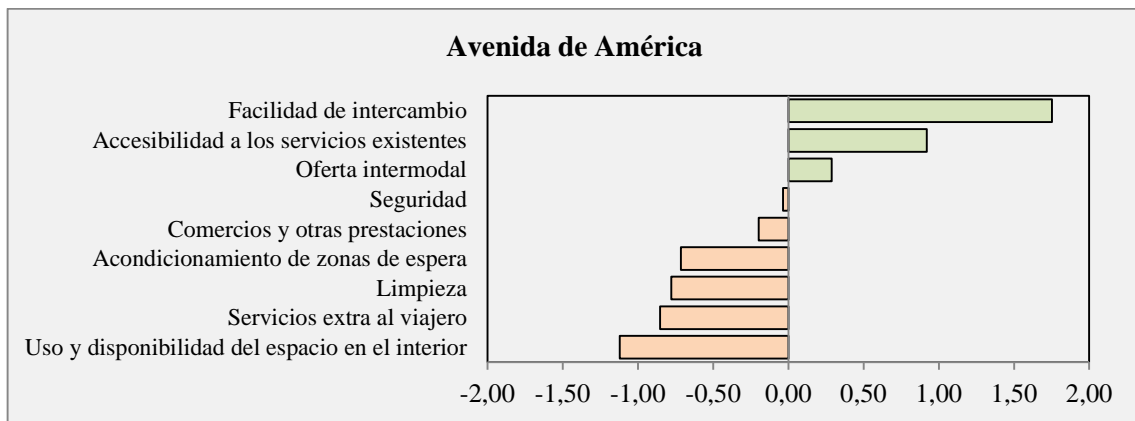


Gráfico 2. Índices de Calidad. Part-Dieu Station

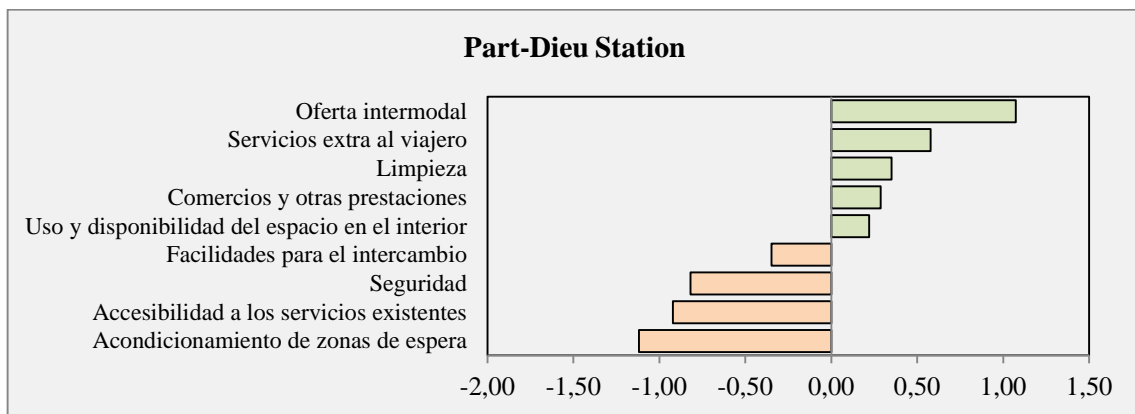


Gráfico 3. Índices de Calidad. Gothenburg Central Station

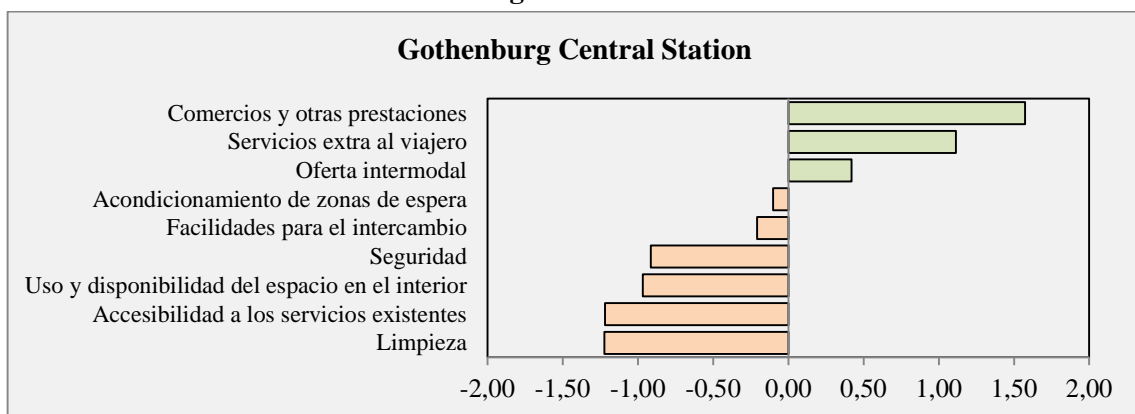


Gráfico 4. Índices de Calidad. Zaragoza- Delicias

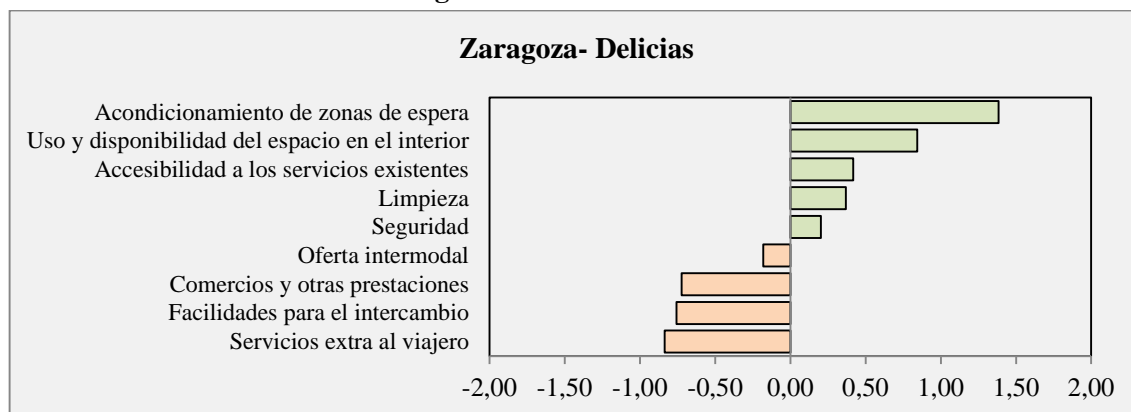
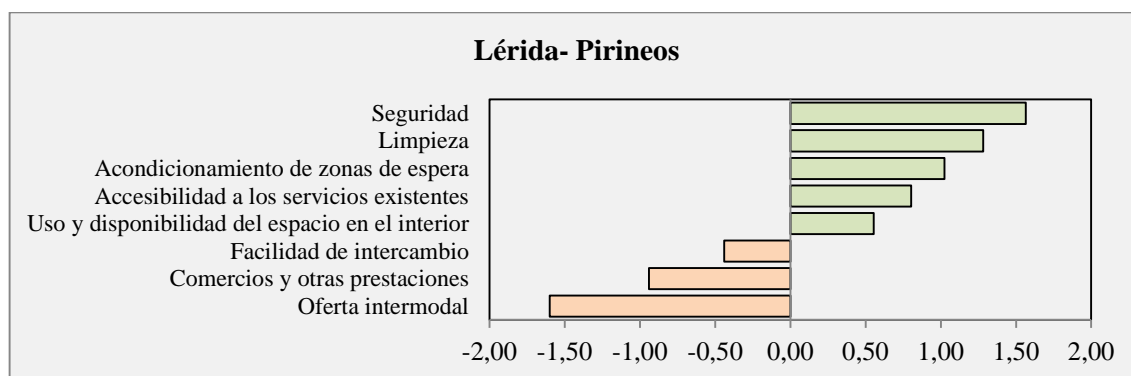


Gráfico 5. Índices de Calidad. Lérida-Pirineos



6 CONCLUSIONES

La intermodalidad como solución a los problemas derivados del transporte, toma cada vez más protagonismo, como destaca la CE en numerosos documentos. Pero para su impulso, es necesario el buen funcionamiento de los puntos de transferencia, eliminando posibles barreras a un viaje sin costuras, y mejorando ciertos aspectos clave.

El grado de satisfacción en distintos aspectos expresado por los propios usuarios de las estaciones, puede ser muy útil para determinar en cada caso qué aspectos concretos deberían mejorarse. Numerosas teorías reiteran en este sentido, la necesidad de evaluar la calidad mediante encuestas. Sin embargo, el nivel de satisfacción no indica directamente calidad, ya que es altamente dependiente de las expectativas de los encuestados, y de su nivel de exigencia. Por lo tanto, determinar las áreas de servicio que requieren mejoras, exige metodologías elaboradas, que permitan comparativas verticales- en una misma estación entre distintos aspectos- a la vez que horizontales –en un mismo aspecto entre distintas estaciones. El proceso analítico aquí descrito, es una metodología de este tipo, que se ha aplicado a cinco terminales intermodales, y mediante la cual se han creado esquemas que definen los aspectos que deberían mejorarse en cada caso de manera prioritaria.

7 REFERENCIAS

CE- COMISIÓN EUROPEA (2011). LIBRO BLANCO- Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible. Bruselas, 28.3.2011, COM(2011) 144 final.

CE- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2009). Plan de Acción de Movilidad Urbana. Bruselas, 8.1.2010, COM (2009) 490 final/2.

CE- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2001). WHITE PAPER-

European transport policy for 2010: time to decide. Brussels, 12.9.2001, COM (2001) 370 final.

EUROSTAT. Statistics [en línea]. [Fecha de consulta: 20 febrero 2014]. Disponible en: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdtr210&language=en>;

HAGHSHENAS, H., VACIRI, M., (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecol. Ind.* 15, 115-121.

HERMES (2010). HERMES Project. Deliverable 2 – Crossmodal Transport Prototypes. Transport RTD Programme of the 7th Framework Programme. Brussels

HERMES (2011). HERMES Project. Deliverable 5 – Case Studies. Transport RTD Programme of the 7th Framework Programme. Brussels

HINE, J. SCOTT, J. (2000). Seamless accessible travel: users' views of the public transport journey and interchange. *Transport Policy.* 7 (2000) 217-226

JOUMARD, R., GUDMUNDSSON, H., (2010). Indicators of Environmental Sustainability in Transport, l'INRETS ed, Bron cedex. France.

MONZÓN, A., LÓPEZ-LAMBAS, M.E., WANG, Y., ALONSO, A. (2012). Factores clave en la eficiencia de intercambiadores de transporte. X CIT. 20-22 de junio 2012. Granada.

MÜLLER, G.; BÜHRMANN, S.; RILEY, P.; ROWLANDS, H. W.; ASPERGES, T.; BEYST, V.; CLAESSENS, G.; REEKMANS, L.; VLEUGELS, I.; PUIG-PEY, P.; HOLLOWAY, P.; (2004). Towards Passenger Intermodality in the EU – Report 2: Analysis of the national inventories on passenger intermodality. European Commission. DG Energy and Transport, Unit G 3. Motorways of the Sea and Intermodality.

ÖLANDER, F. (1988). Consumer satisfaction/dissatisfaction and the consumer interest. In E. S. Maynes (Ed.), *The frontier of research in the consumer interest* (pag. 753-759). Columbia, MO: American Council on Consumer Interests.

PIRATE (2001). PIRATE Project – Final Report for Publication. Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th FP. Brussels.

SAISANA, M., TARANTOLA, S. (2002). State-of-the-Art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development, EUR 20408 EN, European Commission-Joint Research Centre, Italy.

SWITCH (2001). SWITCH Project. Deliverable 8- Final report for publication. Project Part-Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme. Brussels.

TROMPET, M., PARASRAM, R., & ANDERSON, R. (2013). Benchmarking Disaggregate Customer Satisfaction Scores Between Bus Operators in Different Cities and Countries. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting (Nº. 13-3823). Washington.

Análisis de la relación entre el índice de congestión y el consumo de combustible basado en datos empíricos

Álvaro García-Castro

Investigador, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT. Universidad Politécnica

RESUMEN

Entre los principales problemas causados por el incremento del transporte por carretera en las últimas décadas destacan el aumento del gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO₂. No en vano, el transporte por carretera aporta aproximadamente el 22% del total de GEI en los países de la OCDE, superando el 25% en el caso de España.

En áreas metropolitanas, el problema se agrava por el efecto de la congestión. Tanto los modelos de transporte como las últimas versiones de navegadores GPS consideran la variabilidad del tráfico en sus estimaciones de tiempos de viaje. Sin embargo, el efecto de la congestión en el consumo de combustible solo es tenido en cuenta en modelos muy detallados, que necesitan una gran cantidad de datos.

En este estudio se pretende establecer una relación empírica entre un índice de congestión y el consumo. Para ello se han tomado datos reales de vehículos flotantes en diversos tramos del área metropolitana de Madrid. En concreto, se registraron un total de 3.800 viajes bajo distintas situaciones de tráfico y estilos de conducción. El análisis de estos datos refleja para todos los vehículos tendencias similares, llegándose, en algunos tramos, a doblar el consumo por el efecto de la congestión.

Desarrollando estas relaciones para distintas tipologías de vías, resultaría posible introducir esta variable en modelos de transporte, navegadores o planificadores de ruta.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero

La emisión de gases de efecto invernadero y el excesivo consumo de recursos energéticos es un problema global, tanto en sus causas como en sus consecuencias (Ramanathan y Feng, 2009), siendo el sector transporte uno de los mayores emisores a pesar de los avances que se han producido en el ámbito de las tecnologías de motores.

Según las estadísticas que ofrece la Agencia Medioambiental Europea (European Environment Agency, 2013) el transporte por carretera ha comenzado a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pero sigue aportando aproximadamente el 93% de las emisiones atribuibles al sector transporte, lo que supone aproximadamente un 20,4% del total, cifras ligeramente superiores a las que ofrecen otros países desarrollados como Japón (Greenhouse Gas Inventory Office of Japan, 2011). En Estados Unidos, el porcentaje de la contribución del transporte por carretera al total de emisiones de GEI es incluso mayor, llegando casi al 22% (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).

En el caso concreto de España, el sector transportes es la fuente de emisiones de GEI que presenta un mayor crecimiento, destacando también el transporte por carretera (Pérez y Monzón, 2006). El transporte por carretera en España contribuye con el 26% de emisiones de CO₂ sobre el total (ITF/OECD, 2010) y se encuentra entre los ratios más altos de Europa de consumo de energía del transporte per cápita transporte.

Es importante reseñar que una gran parte del consumo y las emisiones de GEI del transporte por carretera se concentran en áreas metropolitanas, según la Agencia Medioambiental Europea, alrededor del 40% (European Environment Agency, 2010).

En este contexto, muchos de los esfuerzos encaminados a reducir el consumo energético se centran en el sector del transporte por carretera. La Comisión Europea (European Commission, 2009) propone una política integrada para atajar el problema desde varios puntos, entre los que se pueden citar la gestión de la demanda, el cambio hacia modos más limpios, la mejora en las tecnologías de los vehículos y el uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC).

1.2. La congestión en modelos de transporte, emisiones y sistemas de información

1.2.1 Modelos energéticos y de emisiones

Los modelos energéticos y de emisiones generalmente están desarrollados a partir de un gran número de mediciones de casos reales, siendo necesario distinguir entre distintos tipos y motorizaciones de vehículos. Según el nivel de detalle del modelo, estos vehículos se agregan en categorías con niveles de consumo y emisiones similares.

Las características de operación del vehículo y su perfil de velocidad (Smit et al., 2007) son los elementos determinantes, aunque también se tienen en cuenta características ambientales.

Los modelos de consumo y emisiones se pueden clasificar según su nivel de desagregación, desde los muy detallados que se basan en los perfiles de velocidad de cada vehículo hasta los más agregados.

El primer grupo de modelos (modelos micro) estima los resultados de forma precisa, pero necesitan datos muy detallados y en algunos casos un laborioso proceso de calibración. El principal requerimiento de esta familia de modelos son los perfiles individuales de velocidad de cada vehículo, teniendo en cuenta así la congestión de forma explícita. Entre estos modelos, algunos como CRUISE (Hasewend, 2001) se basan en datos detallados del motor y la estimación de las fuerzas que se oponen al movimiento mientras que otros como VERSIT+ (Smit et al., 2007) estiman los resultados a partir de relaciones empíricas obtenidas del análisis estadístico de perfiles de velocidad, consumo y emisiones reales.

Para el análisis de grandes redes se aplican modelos a nivel macro, los cuales basan sus resultados en datos agregados. En esta familia destacan los modelos de velocidad media, que utilizan la velocidad de circulación media en cada vía, los flujos de tráfico y la composición de la flota para estimar la emisión. Ejemplos de este tipo son MOBILE (Parrish, 2006), MOVES (Liu y Barth, 2011) y COPERT (Ntziachristos y Samaras, 2000).

La velocidad media es un factor clave en el consumo de combustible y por lo tanto las emisiones de CO₂. Sin embargo, desde el punto de vista de la ingeniería de tráfico, la propia velocidad media no explica suficientemente la variabilidad de las condiciones del tráfico y de los diferentes niveles de congestión (Ahn y Rakha, 2008). Como se ha dicho anteriormente, el perfil de velocidad es determinante. Por ejemplo, una velocidad media de 50 km/h en un distribuidor urbano con coordinación semafórica podría reflejar las condiciones de flujo libre, logrando una velocidad prácticamente constante. Esta misma velocidad media en un tramo de autopista puede darse con altos niveles de congestión, lo que según veremos tiene implicaciones claras sobre el consumo de combustible y las emisiones. Esta variabilidad en torno a la velocidad media, hace necesario el estudio de los perfiles de velocidad.

Entre estas dos familias de modelos de consumo y emisiones, se puede encontrar una amplia gama de diferentes enfoques. Algunos de ellos tienen en cuenta específicamente una serie de situaciones (cualitativas) de tráfico para diferentes tipos de vías, que incluyen flujo libre, normal y congestión en autopistas, carreteras convencionales, arterias urbanas y vías locales. Ejemplos de estos modelos en Europa son HBEFA (Hausberger et al., 2009), en el que se utilizan perfiles de velocidad seleccionados para cada situación, y Artemis (Andre et al., 2004), en el que se generan ciclos de conducción basados en viajes reales.

Con el objetivo de tomar en cuenta las diferentes condiciones de tráfico, el modelo TEE (Agostini et al., 2005) genera ciclos de conducción artificiales en función de parámetros de tráfico, tales como la intensidad circulatoria, número de carriles o número de intersecciones por kilómetro, que más tarde se utilizan para corregir la estimación de los modelos de velocidad, en este caso específico COPERT.

Esta revisión de los modelos de consumo de energía de emisión y muestra una amplia gama de enfoques, cuya aplicación depende principalmente de la disponibilidad de datos y las necesidades de resolución espacial y temporal.

1.2.2 Sistemas de información vía web o navegadores

Los calculadores de ruta on-line ofrecen información sobre rutas óptimas basándose en diferentes parámetros. Generalmente sugieren la ruta más corta a partir de complejos algoritmos desarrollados a partir del de Dijkstra (Dijkstra, 1959), pero muchos de ellos tienen en cuenta otra serie de factores, tales como límites de velocidad, peligrosidad e incluso la situación actual del tráfico.

Por ejemplo, este es el caso de Google Maps (Barth, 2009), donde es posible mostrar la ruta óptima y el tiempo estimado según la situación del tráfico y el nivel de congestión. En sus inicios, esta opción se basaba en datos históricos, mientras que hoy en día se basa en datos extraídos de la posición instantánea de los usuarios de teléfonos móviles.

Por otra parte, estas aplicaciones también suelen ofrecer una estimación del consumo de combustible necesario para esa ruta, pudiendo el usuario seleccionar entre categorías generales de vehículos (a menudo 3 categorías). No obstante, este consumo no varía en función de las condiciones de tráfico.

Muy similar es el funcionamiento de los navegadores GPS, ya sean dispositivos portátiles o instalados directamente en los vehículos. De esta manera, el navegador es capaz de recalcular y guiar al usuario por una ruta más rápida. Sin embargo, la ruta más rápida no siempre es la de menor consumo (Ahn y Rakha, 2007). Por este motivo, en los últimos años se han desarrollado algoritmos de “eco-routing” que informan al usuario de la ruta más económica y con menores emisiones (Minett et al, 2011), aunque muy pocas metodologías integran emisiones e información del tráfico en tiempo real (Barth et al., 2007).

1.2.3 Modelos de demanda en el transporte

Los modelos de demanda en el transporte utilizan una función de coste generalizado a la hora de distribuir los viajes entre los diferentes modos y rutas alternativos. Estas funciones de coste incluyen tanto el coste monetario como el no monetario, básicamente el tiempo. En estos modelos, el tiempo de viaje se calcula a partir de la intensidad circulatoria, la

capacidad de la vía y una serie de relaciones empíricas entre estas variables y el tiempo de viaje, conocidas como Volume-Delay Functions (VDF). Estas curvas establecen la demora en un tramo en función del grado de saturación.

Como norma general, el consumo de combustible es considerado en las fórmulas de coste generalizado como una función de la distancia recorrida y solo en algunos estudios se incluye también la velocidad media (Benedek y Rilett, 1998). Con estos algoritmos, la variabilidad del tráfico se tiene en cuenta, pero como ya se ha dicho, los modelos de emisiones basados en la velocidad media pueden resultar en estimaciones erróneas dependiendo de la tipología de la vía.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

La revisión de la literatura nos muestra que los efectos de la congestión en el consumo de combustible son tratados de manera muy diferente según los objetivos del modelo. Solo en los modelos muy detallados a nivel micro, la influencia de la congestión es tratada de forma explícita.

A la vista de este hecho, el objetivo principal de este estudio es analizar a partir de datos empíricos cómo afecta la congestión al consumo de combustible para varias categorías de vehículos. Este análisis se ha realizado en diferentes vías situadas en la zona metropolitana de Madrid.

Como se detalla a continuación, la metodología se basa en el análisis de los datos de consumos y perfiles de velocidad recogidos por medio de vehículos flotantes en varios recorridos realizados en la ciudad de Madrid.

2.1 Campaña de recogida de datos

La campaña de recogida de datos se encuadra dentro del proyecto europeo de investigación “ICT-Emissions” (7º Programa Marco), cuyo objetivo es desarrollar una metodología para poder modelizar en detalle los efectos en las emisiones de GEI de una serie de TIC aplicadas al transporte. La metodología propuesta en el proyecto “ICT-Emissions” se basa principalmente en la interacción de los diversos modelos de simulación (vehículo, tráfico y emisiones) en sus niveles micro y macro.

Cómo valor añadido de este proyecto, se pretende también validar la metodología con varios casos de estudios en las ciudades de Roma, Turín y Madrid. En cada uno de estos casos, se realizan campañas de recogida de datos (espiras, cámaras, vehículos flotantes...) comparando la evolución del tráfico y otros parámetros del vehículo antes y después de la implantación de la medida TIC. Estos resultados son utilizados para calibrar los modelos y posteriormente validar los resultados obtenidos al aplicar la metodología de simulación a estos mismos casos de estudio. En marzo y abril de 2013, y en coordinación con el

Departamento de Tecnologías de Tráfico de Madrid, se llevó a cabo la campaña de recogida de datos. El principal objetivo fue recopilar perfiles de velocidad y consumo de combustible en varios tramos de la autopista de circunvalación M30 (trayectos 1, 2, 3 y 4) y algunas vías urbanas adyacentes (trayectos 5, 6 y 7) (Figura 1).



Fig. 1 – Recorridos monitorizados en la toma de datos de Madrid

Esta campaña de recogida de datos consistió en la realización de un número representativo de viajes a través de las secciones seleccionadas con la técnica del vehículo flotante. Con este procedimiento, es posible obtener los perfiles de velocidad instantánea y consumo. Se contó con tres turismos FIAT para este estudio, un Punto 1.2 l. gasolina y dos Diesel, Punto y Bravo, con motores de 1,3 l. y 1,6 l. respectivamente. El número total de conductores fue de 9 y el total de viajes registrados fue de casi 3.800.

El posterior tratamiento de estos datos, permitió obtener los resultados de consumo de combustible en función de la congestión, que se presentan en la siguiente sección.

2.2 Indicadores de congestión

Una gran variedad de indicadores son empleados para medir la congestión, ya sea en la literatura científica o en informes de autoridades de tráfico que reportan la situación del tráfico en áreas metropolitanas,

Debido a la disponibilidad de datos por parte de las autoridades de tráfico, el indicador más comúnmente empleado es el ratio volumen/capacidad, si bien este indicador presenta una serie de problemas a la hora de analizar la congestión detalladamente (Boarnet et al., 1998). El principal problema es que los usuarios no están realmente interesados en este

tipo de información, sino en la referente al tiempo empleado en realizar su recorrido. Este hecho, sumado a las diferentes tecnologías actuales que permiten la medición de tiempos de viaje, hace que la tendencia sea ofrecer indicadores de congestión basados en el tiempo perdido en la congestión (demora) con relación al tiempo empleado en condiciones de flujo libre.

Tras el análisis bibliográfico (Smit, 2006), (Taylor, 2000), (Cohn et al., 2012), (Schrank et al., 2010) y de las tendencias en desarrolladores de software y aplicaciones, se pueden destacar los siguientes indicadores:

- Demora (Delay): Tiempo perdido en un tramo en relación al tiempo que se emplearía en flujo libre
- Ratio de demora (Delay rate): Tiempo perdido por kilómetro de longitud en un tramo en relación al tiempo que se emplearía en flujo libre.
- Índice de Congestión (Congestion Index, CI): Ratio entre el tiempo empleado y el tiempo que se emplearía en flujo libre.
- Índice de reducción de velocidad (speed reduction congestion index, SRCI): Índice normalizado a una escala de 0 a 10. Es el ratio de reducción de la velocidad media en el tramo en relación con la velocidad en flujo libre.
- Índice de congestión Tom Tom: Ratio entre la demora y el tiempo que se emplearía en flujo libre en un tramo determinado.
- Nivel de Servicio (Level of Service, LOS): Es una medida cualitativa de la calidad de la circulación. Sobre una escala de A a F, describe una gama de condiciones de circulación donde A representa condiciones de flujo libre y F congestión severa. En España, la Dirección General de Tráfico utiliza una escala cromática similar, representando el blanco circulación en flujo libre mientras que el negro una congestión severa.

En este estudio se va a analizar la congestión utilizando el ratio de demora. Por un lado, desde el punto de vista del usuario la demora es el indicador más comprensible y en el que está más interesado. Este indicador como ratio en función de la distancia, nos permite comparar tramos de similar naturaleza aunque de diferente longitud.

2.3 Tratamiento de datos

A efectos de este estudio, los trayectos en los que estas medidas estaban activas no se consideran, ya que distorsionarían el consumo.

Una vez eliminados los trayectos con fallos en los dispositivos de recepción GPS, se agruparon los restantes por vehículo y trayecto, obteniendo un total de 2.412, distribuidos según especifica la tabla 1 y siguiendo la numeración establecida en la Figura 1.

N° Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación M30				Urbano			Total vehículo
	1	2	3	4	5	6	7	
Longitud (km.)	5,8	5,3	5,4	6,7	1,2	1,3	1,6	-
Fiat Bravo 1.6D	72	124	46	44	124	86	82	578
Fiat Punto 1.3D	104	215	72	74	214	146	133	958
Fiat Punto 1.2G	103	172	70	63	191	140	137	876
Total trayecto	279	511	188	181	529	372	352	2412

Tabla 1 – Número de viajes analizados según recorrido y vehículo

El Ratio de Demora (Delay Rate) se calculó de la siguiente manera para cada viaje registrado:

$$DR = \frac{(t - t_0)/60}{l} \quad (1)$$

Siendo:

t = tiempo de recorrido registrado (s)

t_0 = tiempo de recorrido en flujo libre (s)

l = longitud del tramo (km)

El tiempo de recorrido en flujo libre se estableció como el recorrido más rápido en cada trayecto, ya que en todos los tramos se efectuaron mediciones en horas valle con bajas intensidades circulatorias.

En los trayectos registrados en autopista y para aislar otros efectos que influyen en el consumo, tales como la temperatura, estilo de conducción, etc., se han agrupado las mediciones de acuerdo a los niveles de servicio (LOS) definidos según la AAHSTO (2001). Para una mayor precisión, ya que la mayoría de los viajes registrados se producen en situaciones cercanas al flujo libre, los niveles de servicio A y B han sido divididos en tres subniveles, C y D en dos, mientras que E y F se mantienen en un único nivel de servicio.

3. RESULTADOS EMPÍRICOS. RELACIÓN CONSUMO-CONGESTIÓN

Siguiendo la metodología planteada en el apartado anterior, para cada par vehículo-trayecto se ha obtenido la curva que relaciona el ratio de demora con el consumo de combustible. En el siguiente apartado se analizan algunas de estas curvas.

3.1 Trayectos autopista urbana

Como se puede observar en la Figura 2, dentro del mismo tramo, el consumo presenta una tendencia creciente según aumenta la congestión. Sin embargo, la pendiente es variable según el vehículo, siendo en este caso mayor para el vehículo de mayor cilindrada.

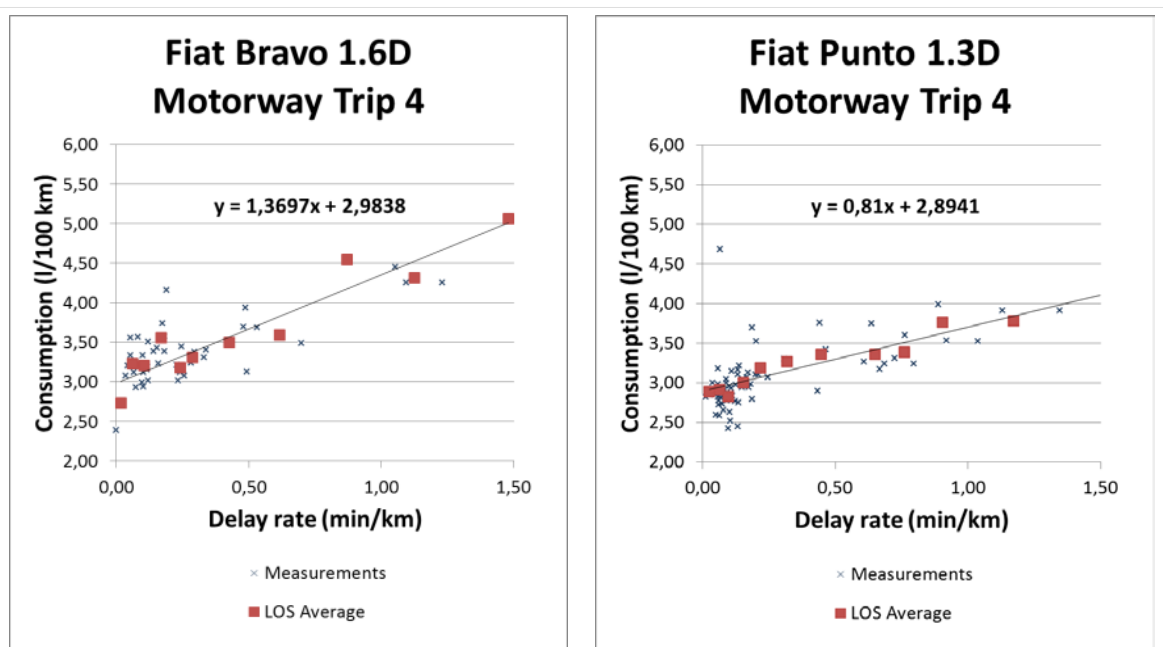


Fig. 2 – Ejemplos de consumo en función de la demora en el tramo (4) de autopista urbana

El hecho de que la pendiente sea mayor en el vehículo de mayor cilindrada se repite sistemáticamente para el resto de tramos en los que la congestión es reseñable, como se puede ver en la Tabla 2.

Nº Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación			
	1	2	3	4
Fiat Bravo 1.6D	0,9405	0,8388	1,2212	1,3697
Fiat Punto 1.3D	0,1888	0,5549	-0,8125	0,8100
Fiat Punto 1.2G	0,9035	0,7771	-3,0272	0,6454

Tabla 2 – Pendiente de la recta de regresión para cada trayecto y vehículo

Como puede observarse, el tramo 3 presenta pendientes negativas. Esto se debe a que en este tramo no se alcanzan altos niveles de congestión, por lo que el aumento de la demora no implica fenómenos de frenadas y aceleraciones sino que simplemente se reduce ligeramente la velocidad media en comparación con la de flujo libre. Analizando solo los niveles de servicio cercanos al flujo libre se obtienen en la mayoría de los casos pendientes negativas, como queda reflejado en la Tabla 3.

Nº Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación			
	1	2	3	4
Fiat Bravo 1.6D	1,4155	-1,3797	1,2212	1,3697
Fiat Punto 1.3D	-3,8528	-2,0475	-0,8125	-0,7977
Fiat Punto 1.2G	-3,8255	-0,1339	-3,0272	-4,1423

Tabla 3 – Pendiente de la recta de regresión en niveles y subniveles de servicio A y B, para cada trayecto y vehículo

Estas pendientes negativas para bajos ratios de demora, nos llevan a considerar que existe un mínimo de consumo en función del ratio de demora, el cual dependerá del trayecto y del vehículo. De esta manera, la función se ajusta a una curva como puede verse en la figura 3.

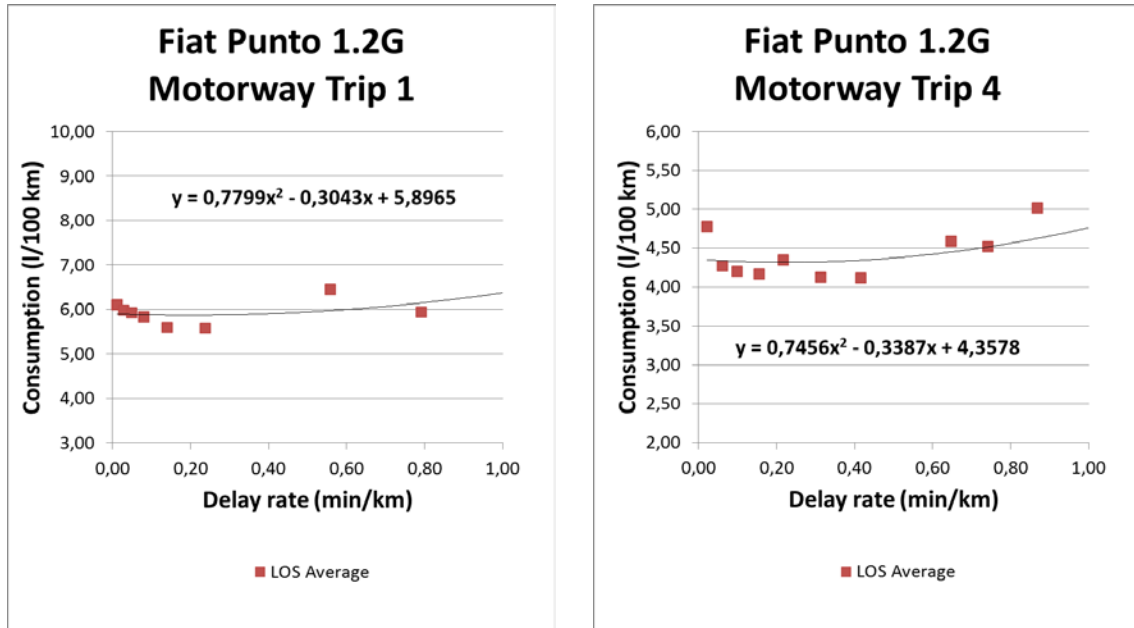


Fig. 3 – Curva de ajuste de consumo en función de la demora en varios tramos de la autopista M30. Fiat Punto 1.2G

3.1.1 Análisis del consumo en función de la homogeneidad del perfil de velocidad

Para estudiar porque se produce este óptimo, es necesario analizar un indicador que refleje la homogeneidad de la velocidad a lo largo de un tramo. De esta manera, Garcia-Castro y Monzon (2013) definen la aceleración positiva acumulada (PAA, Positive Accumulated Acceleration) como un indicador obtenido a partir del análisis del perfil de velocidad en un tramo y que gráficamente representa el área encerrada bajo la curva de aceleraciones positivas. Por tanto, un trayecto en el que la velocidad es muy variable, tenderá a tener comparativamente un valor del indicador PAA mucho mayor que el mismo trayecto realizado a una velocidad prácticamente uniforme.

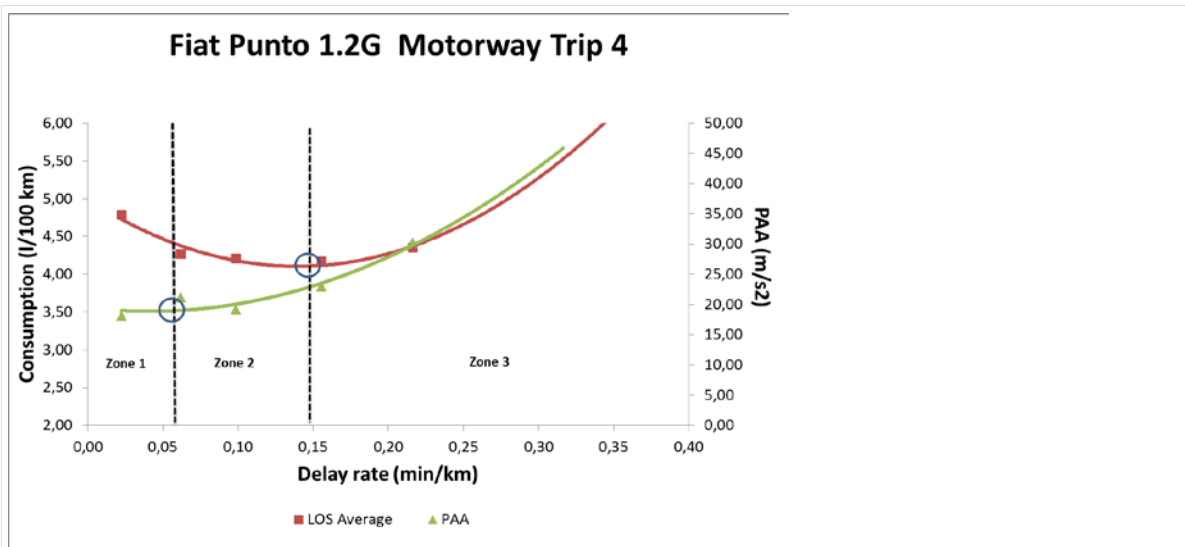


Fig. 4 – Curvas de consumo y aceleración acumulada en función de la demora, para un tramo de autopista urbana M30. Fiat Punto 1.2G

Analizando dónde se sitúan los mínimos de las curvas de consumo y PAA, se pueden establecer tres zonas diferenciadas en lo relativo al consumo en función de la congestión. (Figura 4).

Para ratios de demora próximos a cero, el consumo disminuye debido a que la velocidad media también decrece pero manteniéndose homogénea, es decir, el indicador PAA permanece prácticamente constante.

Una vez que el indicador PAA comienza a crecer debido a que la intensidad circulatoria hace el flujo más inestable y se provocan fenómenos de frenado. Cuando se alcanza el mínimo, la disminución de velocidad media no es suficiente para contrarrestar el efecto en el consumo de los procesos de aceleración-frenado.

Por último, en la tercera fase, el consumo se dispara debido a que al efecto negativo del aumento del indicador PAA, se suma que a esas velocidades el vehículo deja de situarse en la zona de máxima eficiencia.

3.2 Trayectos urbanos

En trayectos urbanos se observa (Figura 5) una tendencia más lineal que en los viajes en la autopista urbana M30.

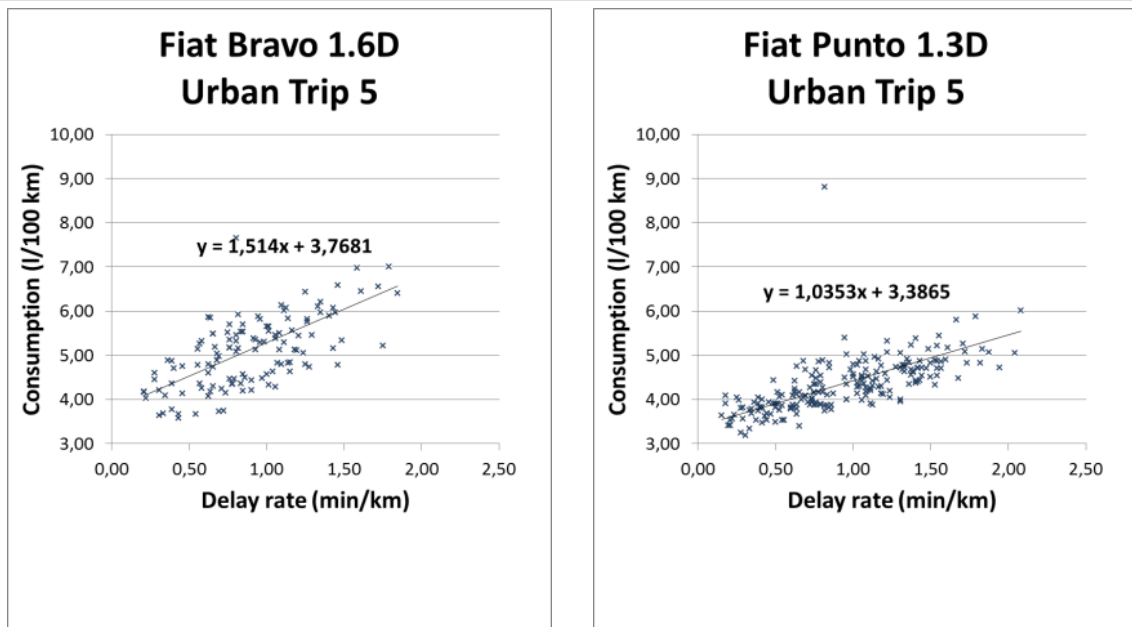


Fig. 5 – Consumo en función de la demora en el tramo urbano (5)

Esto concuerda con el hecho de que para el rango de velocidades urbanas, un decremento de la velocidad media en un tramo siempre implica un aumento de combustible según las curvas de rendimiento de los motores (Barth y Boriboomsomsin, 2010). En zonas urbanas, tanto el consumo como la aceleración positiva acumulada (PAA) se comportan de manera lineal, no observándose distintas zonas como en el caso de autopista (Figura 6).

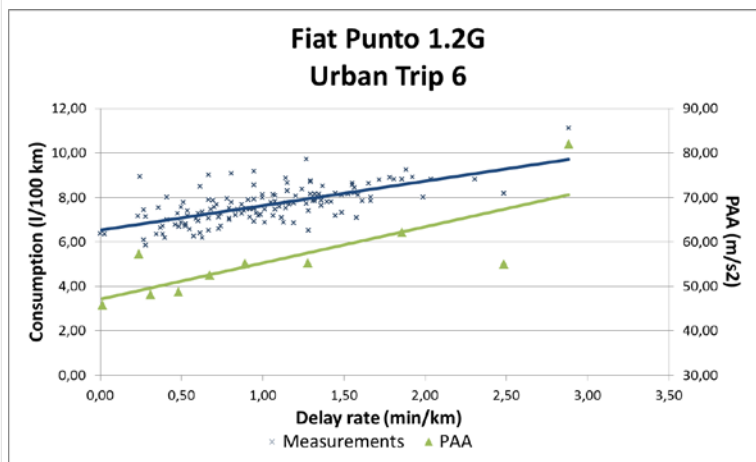


Fig. 6 – Rectas de consumo y aceleración acumulada en función de la demora, para un tramo urbano. Fiat Punto 1.2G

Del mismo modo que en el análisis realizado para los tramos de autopista, la demora influye más en el vehículo de mayor cilindrada, como muestran (Tabla 4) las pendientes de las rectas de ajuste calculadas para cada tramo y vehículo.

Nº Trayecto y Vehículo	Tramos urbanos		
	5	6	7
Fiat Bravo 1.6D	1,514	1,0353	1,3394
Fiat Punto 1.3D	1,3506	0,6922	1,0964
Fiat Punto 1.2G	1,4401	0,9041	1,1746

Tabla 4 – Pendiente de la recta de regresión para cada trayecto y vehículo en zona urbana

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una clara relación entre la congestión y el consumo de combustible. En el caso de una autopista urbana como es la M30 en Madrid, los datos recogidos muestran que ligeros aumentos de tráfico partiendo de condiciones de flujo libre resultan positivos en términos de ahorro de combustible.

Se observa de este modo, que para cada tramo de autopista se obtiene un óptimo de consumo en función del ratio de demora. Una vez rebasado este óptimo, el aumento de la intensidad circulatoria provoca que los perfiles de velocidad sean menos homogéneos, haciendo que el consumo aumente de forma más lineal.

Por el contrario, el análisis de los datos en zonas urbanas presenta un comportamiento distinto. Para los rangos de velocidades estudiados en estas zonas, el consumo aumenta linealmente en función de la congestión.

El análisis de la homogeneidad del perfil de velocidad realizado hace ver que el consumo de combustible depende en gran medida del momento en el que la intensidad circulatoria provoca inestabilidades en el flujo. Es por ello que el óptimo se alcanza en un punto distinto dependiendo del tipo de vía.

Por tanto, queda patente la necesidad de incluir parámetros de congestión en los modelos de consumo de combustible, ya que las variaciones en función del nivel de tráfico pueden ser superiores al 100%. Por otra parte, el uso de un solo indicador (habitualmente velocidad media) para cualquier tipo de vía entraña algún riesgo, ya que, como se ha visto, el óptimo de consumo también depende de la aceleración acumulada en el tramo, es decir, de la homogeneidad de la velocidad.

Para una mayor precisión en el cálculo de consumo de combustibles y emisiones sin acudir a modelos microscópicos que requieren gran cantidad de datos, sería por tanto aconsejable ajustar los modelos de velocidades medias añadiendo un factor de congestión en función de la tipología de vía.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Comisión Europea, bajo el proyecto *ICT-Emissions*, "Desarrollo de una metodología y herramientas para evaluar el impacto de las medidas TIC en las emisiones del transporte por carretera", Grant Agreement N° 288568. Igualmente, se agradece la colaboración del Ayuntamiento de Madrid y Calle-30 en el proceso de toma de datos.

REFERENCIAS

AASHTO. Policy on geometric design of highways and streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2001.

AGOSTINI, A., LELLI, M., NEGRENTI, E., y PARENTI, A. (2005). TEE2003: Transport energy & environment: An advanced software tool for the estimation of direct impacts from transport. En: *Urban Transport XI: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. Wit Press.

AHN, K., y RAKHA, H. A. (2007). Energy and environmental impacts of route choice decisions. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting, January 2007*, (07-1190), Washington D.C.

AHN, K., y RAKHA, H. A. (2008). The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(3), 151-167.

ANDRÉ, M., KELLER, M., SJÖDIN, Å., GADRAT, M., y MC CRAE, I. (2008). The ARTEMIS European tools for estimating the pollutant emissions from road transport and their application in Sweden and France. *17th International Conference Transport and Air Pollution*, pp. 118-127.

BARTH, D. (2009). The bright side of sitting in traffic: Crowdsourcing road congestion data. Consultado en 01/2014, de from <http://googleblog.blogspot.com.es/2009/08/bright-side-of-sitting-in-traffic.html>

BARTH, M., BORIBOONSOMSIN, K., y VU, A. (2007). Environmentally-friendly navigation. *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, pp. 684-689.

BARTH, M., & BORIBOONSOMSIN, K. (2010). Traffic congestion and greenhouse gases. *TR News*, (268)

BENEDEK, C., y RILETT, L. (1998). Equitable traffic assignment with environmental cost functions. *Journal of Transportation Engineering*, 124(1).

BOARNET, M. G., KIM, E. J., y PARKANY, E. (1998). Measuring traffic congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1634(1), 93-99.

COHN, N., KOOLS, E., y MIETH, P. (2012). The TomTom congestion index. *19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22 to 26 October 2012*.

DIJKSTRA, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1: 269–271.

EUROPEAN COMMISSION. Mobilising Information and Communication Technologies to Facilitate the Transition to an Energy Efficient, Low-carbon Economy. COM (2009) 111, 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. State and Outlook 2010. Urban Environment. Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-9213-151-7. 2010.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2011 and inventory report 2013. European Environment Agency. 2013.

HAUSBERGER, S., REXEIS, M., ZALLINGER, M., y LUZ, R. Emission factors from the model PHEM for the HBEFA. Version 3 No. I-20/2009. Graz, Austria. TU Graz, 2009.

HASEWEND, W. (2001). AVL Cruise - Driving performance and fuel consumption simulation. *ATZ worldwide* 103(5), pp. 10-13.

ITF/OECD. Transport greenhouse gas emissions: Country data 2010. International Transport Forum, 2010.

GARCIA-CASTRO, A. y MONZON, A. (2013). Variable Speed Limits. Review and Development of an Aggregate Indicator Based on Floating Car Data. *Proceedings of the 13th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (RelStat'13), 16–19 October 2013, Riga, Latvia*, p. 117–127. ISBN 978-9984-818-58-0.

GREENHOUSE GAS INVENTORY OFFICE OF JAPAN. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, Ministry of the Environment, Japan, 2011.

LIU, H., y BARTH, M. (2011). Analysis of US EPA's MOVES Model's operating modes and handling of history effects. *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2011, Washington, DC.*

MINETT, C. F., SALOMONS, A. M., DAAMEN, W., VAN AREM, B., y KUIJPERS, S. (2011). Eco-routing: Comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles. *Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS)*, 2011 IEEE Forum on, pp. 32-39.

NTZIACHRISTOS, L. y SAMARAS, Z., (2000). Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters. *Atmospheric Environment*, 4611-4619.

PARRISH, D. D. (2006). Critical evaluation of US on-road vehicle emission inventories. *Atmospheric Environment*, 40(13), 2288-2300.

PÉREZ, P. J., y MONZÓN, A. Informe sobre transporte y medio ambiente. Trama 2006. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2006.

RAMANATHAN, V. y FENG, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43(1), pp. 37-50.

SCHRANK, D., LOMAX, T., y TURNER, S. TTI's 2010 Urban Mobility Report Powered by INRIX Traffic Data. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2010.

SMIT, R. (2006). *An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks*. Tesis Doctoral, Griffith University, Australia.

SMIT, R., SMOKERS, R. y RABE, E. (2007). A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 12(6), pp. 414-422.

TAYLOR, M.A.P. (2000) Network modelling of the traffic, environmental and energy effects of lower urban speed limits. *Road and Transport Research* 9(4), pp.48-57.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 2011, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC., 2013.

Efectos de la monitorización individual del consumo de combustible en trayectos cotidianos

Andrés García Martínez

Investigador, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT. Universidad Politécnica de Madrid, España

Andrés Monzón de Cáceres

Director, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT. Catedrático, Universidad Politécnica de Madrid, España

Álvaro García-Castro

Investigador, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT. Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

El excesivo gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) constituyen un problema a nivel mundial con importantes implicaciones a nivel medioambiental y económico. Uno de los sectores que en mayor medida contribuyen a agravar esta situación es el transporte por carretera, el cual aporta alrededor del 20% del total de emisiones de GEI, porcentaje aún mayor en el caso de España.

Entre las políticas aplicadas para atajar este problema podemos destacar el uso de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC), incluyendo la promoción de un estilo de conducción más eficiente y los sistemas avanzados de ayuda a la conducción. La monitorización de los consumos es actualmente posible a nivel individual, ya que muchos de los turismos actuales proporcionan el consumo medio por trayecto en la pantalla del ordenador de a bordo.

El objetivo de este estudio es estimar la influencia del conocimiento de una ruta y de la monitorización del consumo en la reducción del mismo y las emisiones asociadas de CO₂. Para ello se ha seguido la evolución de varios conductores en trayectos repetitivos.

Los resultados muestran que el ahorro de combustible desde el momento en que un conductor realiza un tramo desconocido hasta el momento en que está acostumbrado a él es de un 8%. Estos resultados justifican la optimización de la gestión de infraestructuras, de forma que se produzca un ahorro global en el consumo de todos los usuarios que las utilizan.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El problema de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Tendencias

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es un problema global, tanto en sus causas como en sus consecuencias (Ramanathan y Feng, 2009). En los últimos tiempos se han producido grandes avances en tecnologías de motores. No obstante, el sector transporte sigue siendo uno de los mayores emisores.

Según la Agencia Medioambiental Europea (EEA, 2013) las emisiones del transporte por carretera han disminuido en los últimos años, pero sigue aportando aproximadamente el 93% de las emisiones atribuibles al sector transporte, lo que supone un 20,4% del total.

Más concretamente, en el caso de España, el sector transporte es la fuente de emisiones de GEI que presenta un mayor crecimiento, destacando también el transporte por carretera (Pérez y Monzón, 2006). El transporte en España contribuye con el 41% de emisiones de CO₂ sobre el total (ITF/OECD, 2010) y se encuentra entre los ratios más altos de Europa de consumo de energía del transporte per cápita transporte.

En este contexto, muchos de los esfuerzos encaminados a reducir la emisión de GEI se centran en el sector del transporte por carretera (Mendiluce et al., 2010). La comisión Europea propone una política integrada para atajar el problema desde varios puntos, entre los que se pueden citar la gestión de la demanda, el cambio hacia modos más limpios, la mejora en las tecnologías de los vehículos y el uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).

Esta ponencia presenta en primer lugar una revisión del estado del arte en relación con la monitorización del consumo en vehículos. En la tercera sección se explica la metodología empleada en el caso de estudio de Madrid. A continuación se detallan los resultados obtenidos y por último las conclusiones del mismo.

1.2 El proyecto europeo “ICT-Emissions”

El objetivo del proyecto de investigación “ICT-Emissions” (7º Programa Marco) es desarrollar una metodología para modelizar en detalle los efectos en las emisiones de GEI de una serie de TIC aplicadas al transporte. Cada una de las TIC consideradas afecta a las emisiones de CO₂ de distinta manera. Desde un punto de vista macroscópico se puede considerar que la demanda, la composición de la flota y la velocidad media determinan el nivel de emisiones (Ntziachristos y Samaras, 2000). Sin embargo, si analizamos más en detalle cada vehículo, los procesos de aceleración y deceleración, así como el rendimiento del motor resultan determinantes. Por otra parte, los ámbitos de aplicación son muy variables y los efectos en determinados entornos pueden producir resultados no deseados, por lo que se manifiesta la necesidad de utilizar modelos para simular estos posibles efectos antes de realizar las grandes inversiones que en algunos casos requieren estas

medidas. La metodología propuesta en el proyecto “ICT-Emissions” se basa principalmente en la interacción de los diversos modelos de simulación (vehículo, tráfico y emisiones) en sus niveles micro y macro.

2. MONITORIZACIÓN DE CONSUMOS

Las TIC aplicadas al transporte constituyen un campo muy amplio que puede tener efectos positivos en la eficiencia, seguridad, comodidad y del medio ambiente (Commission of the European Communities, 2008).

Las nuevas tecnologías permiten realizar una monitorización completa del vehículo. Los datos extraídos se utilizan para diversos fines. Es el caso de la utilización de teléfonos inteligentes como herramienta para inventariar carreteras (Higuera de Frutos y Castro, 2014). Otro ejemplo es el desarrollo de una metodología para monitorizar la posición del vehículo en un carril (Tu et al., 2013).

Existen numerosos estudios en los que se ha registrado el consumo de combustible. Baric (2013) evalúa técnicas de conducción eficiente en un tramo mixto en urbano y autopista. Anteriormente se desarrolló un modelo de regresión con el consumo como variable dependiente e indicadores basados en patrones de conducción como variables independientes (Wang et al., 2008). Cappiello (2002) estimó el consumo a partir de un modelo estadístico basado en características del vehículo. Sin embargo, no se han encontrado referencias donde se monitorice el consumo para comprobar si éste disminuye progresivamente a medida que un conductor repite un trayecto cotidiano.

El consumo de un viaje concreto depende directamente de la experiencia adquirida por el conductor en el trayecto en viajes inmediatamente anteriores. Por ello, la disminución del consumo está relacionada con una curva de aprendizaje. Esta curva describe el incremento de aprendizaje obtenido en el transcurso del tiempo y es conocida por otros nombres como curva progresiva o curva de experiencia. Los modelos más conocidos que representan fielmente la curva de aprendizaje son: log-lineal, Stanford-B, plateau, DeJong y S-model (Yelle, 1979).

3. CASO DE ESTUDIO DE MADRID - M30

A continuación se explican los tramos de aplicación de las medidas TIC y la metodología empleada con detalle.

3.1. Zonas de estudio

Se han escogido siete tramos, de los cuales cuatro se encuentran en la autopista de circunvalación M-30 y tres en zonas urbanas. En la Figura 1 aparecen detallados en un mapa de Madrid. En la Tabla 1 se incluye información de la salida y llegada de cada uno

de los trayectos.

El tramo 1 (Ventas - Costa Rica) está localizado en la zona este de la autopista M-30 (sentido norte). Cuenta con tres o cuatro carriles según la zona y una vía de servicio paralela de tres carriles. La hora punta tiene lugar a primera hora de la mañana. Su longitud es de 5,8 km y está limitado a 90 km/h.



Fig. 1 - Tramos de estudio en la toma de datos de Madrid

Tramo	Salida	Llegada
1	Ventas	Costa Rica
2	Costa Rica	Ventas
3	San Pol de Mar	Arroyofresno
4	Arroyofresno	San Pol de Mar
5	C/Sirio	C/Corregidor
6	C/del Maestro Sorozábal	C/San Pol de Mar
7	Paseo Marqués de Monistrol	C/del Maestro Sorozábal

Tabla 1 – Zonas de inicio y final de cada tramo

El tramo 2 (Costa Rica - Ventas) se engloba en la zona este de la autopista M-30 (sentido sur). Cuenta con tres o cuatro carriles a lo largo de su recorrido y una vía de servicio paralela de tres carriles. La hora punta se alcanza durante la tarde, su longitud es de 5,3 km y está limitado a 90 km/h.

El tramo 3 (San Pol de Mar - Arroyofresno) está comprendido en la zona oeste de la autopista M-30 (sentido norte). Tiene tres carriles y la intensidad en hora punta tiene lugar por la mañana. Su longitud es de 5,4 km y está limitado a 90 km/h en su totalidad.

El tramo 4 (Arroyofresno - San Pol de Mar) es una autopista de 3 carriles con una longitud de 6,7 km. Una gran parte del tramo está limitado a 90 km/h, excepto los últimos 100 m., limitados a 70 km/h (entrada del túnel). En la hora punta, que tiene lugar por la tarde, se da con frecuencia una situación de congestión debido al cuello de botella provocado por la entrada de la carretera de Castilla M-500.

Queda patente el comportamiento asimétrico en cuanto a intensidades de circulación y periodos de hora punta en la autopista M-30.

Los tramos 5, 6 y 7 se corresponden con áreas urbanas, con varias intersecciones reguladas por semáforos. Cuentan con una longitud de 1,2 km, 1,3 km y 1,6 km, siendo el número de paradas medio en cada trayecto de 1,5, 2,8 y 3,4, respectivamente.

3.2. Metodología. Caso de estudio de Madrid

Como parte del proyecto “ICT-Emissions”, durante los meses de marzo y abril de 2013, y en coordinación con el Departamento de Tecnologías del Tráfico de Madrid, se desarrolló una campaña de toma de datos con el objetivo de registrar los perfiles de velocidad y el consumo de combustible en diversos tramos antes y después de la aplicación de diferentes medidas TIC en dos tramos de la autopista de circunvalación M-30. Estas medidas fueron el control de velocidad por tramo en una sección en el este de la autopista M-30 y mensajes de velocidad variable en el oeste. La Figura 2 y la Tabla 2 muestran los días y el horario en que se llevó a cabo la campaña de toma de datos.

Tres turismos FIAT se utilizaron en este estudio, un Punto gasolina con motor 1,2 l y dos diesel, Punto y Bravo, con motorizaciones 1,3 l y 1,6 l respectivamente. El total de viajes registrados es de 3.800 aproximadamente.



Fig. 2 - Calendario de la campaña de toma de datos

Los vehículos estaban equipados con un dispositivo GPS (747+ GPS Recorder) para recopilar datos de distancia recorrida, posición y velocidad instantánea con una frecuencia de 1 Hz, permitiendo así obtener perfiles de velocidad y aceleración. Los datos recogidos por el dispositivo son más tarde descargados para su posterior tratamiento. El consumo de combustible se registró manualmente mediante el ordenador de a bordo del vehículo, que indicaba el consumo medio en l/100 km.

Día de la semana	Viaje	Horario
Lunes	1, 2, 5	De 9:30 a 13:30
Martes	3, 4, 6, 7	De 16:30 a 19:30
Jueves		
Miércoles	1, 2, 5 (6 de marzo y 10 de abril)	De 7:30 a 20:30
	3, 4, 6, 7 (13 de marzo y 17 de abril)	De 7:30 a 20:30
Viernes	1, 2, 5	De 9:30 a 12:00
	3, 4, 6, 7	De 12:00 a 14:30

Tabla 2 - Horarios de la campaña de toma de datos

La campaña de medición de datos consiste en registrar un número representativo de viajes en los tramos escogidos mediante la técnica del vehículo flotante. De esta manera se obtienen los perfiles de velocidad con el GPS y el consumo de combustible con el ordenador de a bordo del vehículo.

Como complemento a la recogida de datos con el dispositivo GPS, se anotaban a su vez en una hoja de ruta la fecha, el conductor, hora de salida, hora de llegada, incidencias de tráfico y climatología para cada viaje.

Para poder estudiar la evolución del consumo de los conductores es necesario disponer de una serie temporal de datos continua en el tiempo, no interrumpida y sin fallos o cambios en los patrones de conducción. Por ello, del total de viajes registrados, se han tomado como válidos los realizados exclusivamente por los conductores del vehículo FIAT Punto 1,3 l diesel. En el caso del vehículo FIAT Punto 1,2 l gasolina, se produjeron fallos en la toma de datos del consumo del ordenador de a bordo, por lo que no se dispone de una serie temporal de datos no interrumpida. Por otra parte, el conductor del vehículo FIAT Bravo 1,6 l diesel realizó técnicas de conducción eficiente, cambiando sus patrones de conducción.

El total de viajes registrados en la campaña de toma de datos fue de 3.800 aproximadamente, de los cuales se han considerado válidos para el análisis 966, que están especificados en la Tabla 3.

El posterior tratamiento de estos datos, teniendo también en cuenta los datos obtenidos de circulación, incidencias y condiciones climatológicas, permiten obtener los resultados de

ahorro de combustible y CO₂, así como la obtención teórica de la curva de aprendizaje seguida por los conductores. Para obtener ésta última se ha comparado cada viaje con la media de los veinte viajes realizados con anterioridad. En la bibliografía no aparecen referencias en relación con la curva de aprendizaje del transporte. No obstante, la curva del olvido de Ebbinghaus (Weiten y McCann, 2009) nos indica que tras 31 días sólo se recuerda un 20% de lo aprendido. Por ello, en el estudio se considera que un conductor recuerda los detalles con claridad hasta una frontera de 31 días e intenta que el valor de consumo de un nuevo viaje se sitúe por debajo de la media de los veinte viajes anteriores (equivalente a los días laborables de un mes, donde es más común que se repita un trayecto).

Tramo	Tipo de viaje	Número de viajes conductor 1	Número de viajes conductor 2	Número de viajes total	Distancia (km)
1	Autopista	80	80	160	5.8
2	Autopista	82	98	180	5.3
3	Autopista	59	56	115	5.4
4	Autopista	61	49*	110	6.7
5	Urbano	87	96	183	1.2
6	Urbano	63	50	113	1.3
7	Urbano	60	45	105	1.6
Total		492	474	966	

Tabla 3 - Número de viajes registrados

*. El tramo 4 del conductor 2 se llevó a cabo en la mayoría de los viajes bajo situaciones de congestión elevadas. La muestra, eliminando dichos viajes, es demasiado reducida para realizar un análisis que arroje resultados significativos.

4. RESULTADOS

Después de tratar y analizar todos los datos recogidos, se hace patente un descenso progresivo del consumo conforme el conductor repite el trayecto. La presentación de resultados se estructura como sigue. En primer lugar, se analiza el ahorro por conductor y tramo comparando la media de los diez últimos viajes y los diez primeros. A continuación se presenta un modelo de regresión lineal simple con el consumo como variable dependiente y el número de viajes como variable independiente. En último lugar, se estima la curva de aprendizaje teórica.

4.1. Comparación de la situación inicial y final

El primer análisis nos lleva a comprobar si existe un descenso del consumo entre los primeros viajes realizados en el mes de marzo y los últimos en el mes de abril.

Para ello se ha calculado la media del consumo de los primeros diez viajes realizados por cada conductor y la media de los diez últimos. En la Figuras 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos en autopista y en urbano, respectivamente, con el porcentaje de ahorro

de consumo para cada uno de los tramos.

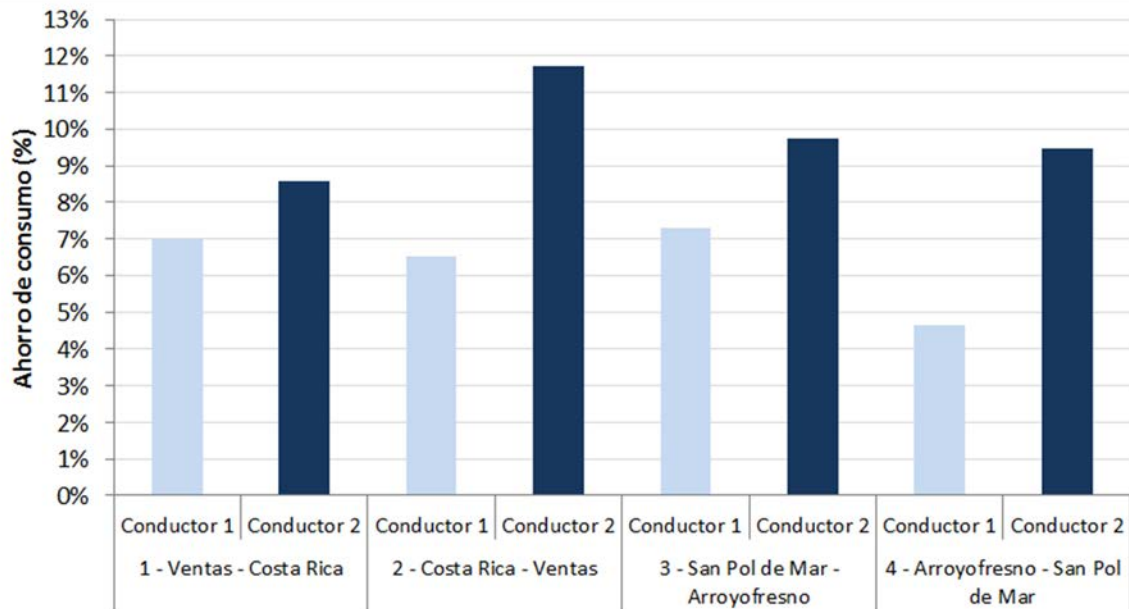


Fig. 3 - Porcentaje de ahorro en autopista por tramo y conductor

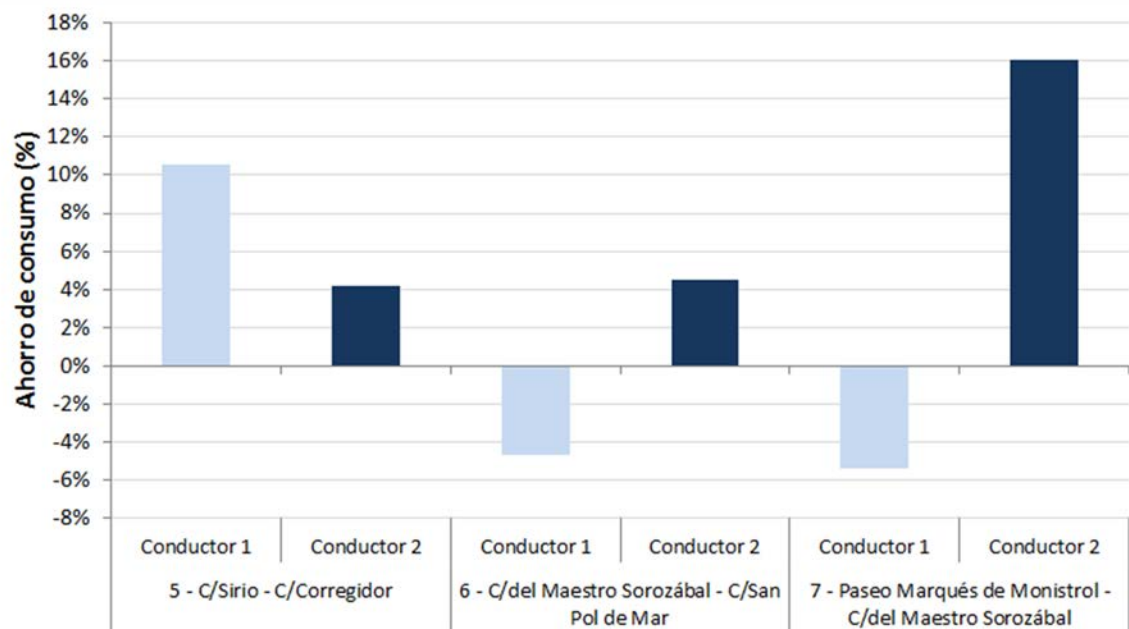


Fig. 4 - Porcentaje de ahorro en urbano por tramo y conductor

En todos los tramos de autopista se percibe un ahorro medio de consumo y CO₂ de un 8%. En urbano el efecto no es tan claro, en los tramos 6 y 7 el conductor 1 consume más en los diez últimos viajes que en los diez primeros. Sin embargo, se registra un ahorro medio de un 6%, excepto en el tramo 6 que permanece invariante debido a la variabilidad del tráfico del trayecto.

4.2. Análisis de regresión lineal

A continuación, se ha realizado un análisis estadístico con todos los datos disponibles. En él se busca establecer una relación con el consumo como variable dependiente y el número de viajes como variable independiente. La ecuación del modelo de regresión propuesto es el siguiente:

$$\text{Consumo} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{número_viajes} \quad (1)$$

En primer lugar, se han comprobado los cinco supuestos de Gauss-Markov para poder validar el modelo de regresión lineal.

El supuesto más fuerte es el de la normalidad de las variables. Se propone un Z-test basado en la asimetría y curtosis para comprobar la normalidad de la variable dependiente (Ghasemi y Zahediasl, 2012). Los estadísticos utilizados son los siguientes:

$$Z_{\text{asimetría}} = \frac{\text{Valor asimetría}}{SE_{\text{asimetría}}}, \quad Z_{\text{curtosis}} = \frac{\text{Excess Kurtosis}}{SE_{\text{excess curtosis}}}$$

La hipótesis nula formulada es H_0 : los valores de asimetría y curtosis son igual a cero. La normalidad de la variable dependiente quedará probada si no es posible rechazar la hipótesis nula. Por otra parte, se formula la hipótesis alternativa H_1 : los valores de asimetría y curtosis son distintos de cero.

Tramo	Conductor	n	Asimetría	SE _{asimetría}	Curtosis	SE _{curtosis}	Z _{asimetría}	Z _{curtosis}
1	1	80	.332	.269	-.428	.532	1.234	-.805
	2	80	.583	.269	-.234	.532	2.167*	-.440
2	1	82	-.121	.266	-.462	.526	-.455	-.878
	2	98	.167	.244	-.223	.483	.684	-.462
3	1	59	.128	.311	-.677	.613	.412	-1.104
	2	56	.352	.319	-.382	.628	1.103	-.608
4	1	61	-.309	.306	-.257	.604	-1.010	-0.425
	2	49	.606	.340	-.473	.668	1.782	-.0708
5	1	87	.278	.258	-.565	.511	1.078	-1.106
	2	96	.002	.246	-.752	.488	.008	-1.541
6	1	63	.331	.302	.008	.595	1.096	0.013
	2	50	-.194	.337	-.948	.662	-.576	-1.432
7	1	60	.303	.309	-.243	.608	.981	-.400
	2	45	.219	.354	.149	.695	.619	.214

Tabla 4 - Asimetría, curtosis y valores de los estadísticos Z de cada tramo por conductor

*. El viaje 1 del conductor 2 tiene un valor de $Z_{\text{asimetría}}$ de 2,167, mayor que 1,96. Aun así, al ser la muestra mediana ($50 < n < 300$) se puede considerar el p-valor como 3,29 (Kim, 2013), concluyendo que la muestra es normal.

Para muestras pequeñas ($n < 50$), si el valor absoluto del estadístico Z de la asimetría y la curtosis son mayores que el p-valor 1,96, que corresponde a un nivel de significancia del 5% (ensayo de dos colas) existen evidencias suficientes para rechazar la hipótesis nula y concluir que la distribución de la variable dependiente consumo es no normal. Se adopta un análisis restrictivo, pues la muestra de cada tramo es sensiblemente mayor que 50 en la mayoría de los casos. La Tabla 4 muestra el valor de los estadísticos Z.

Por tanto, para todos los casos, los valores de los estadísticos Z son aceptables y se puede concluir que no existen evidencias suficientes para rechazar la hipótesis nula. En la Tabla 5 aparece el coeficiente de determinación para cada uno de los viajes y conductor, así como la correlación bivariada de Pearson entre las variables y el coeficiente β_1 y su significancia estadística.

Tramo	Conductor	n	Correlación Pearson	Sig.	Coef. β_0	Sig.	Coef. β_1	Sig.	R ²
1	1	80	-.455**	.000	4.235	.000***	-.003***	.000	.207
	2	80	-.603**	.000	4.393	.000***	-.005***	.000	.364
2	1	82	-.372**	.001	2.034	.000***	-.002***	.001	.138
	2	98	-.472**	.000	2.307	.000***	-.003***	.000	.223
3	1	59	-.609**	.000	3.612	.000***	-.006***	.000	.370
	2	56	-.603**	.000	3.793	.000***	-.009***	.000	.364
4	1	61	-.303*	.018	2.964	.000***	-.003***	.018	.092
	2	49	-.198	.173	3.311	.000***	-.005	.173	.039
5	1	87	-.381**	.000	4.388	.000***	-.006***	.000	.145
	2	96	-.160	.118	4.517	.000***	-.003	.118	.026
6	1	63	.329**	.009	5.394	.000***	.008***	.009	.108
	2	50	-.193	.179	6.019	.000***	-.005	.179	.037
7	1	60	.079	.549	4.920	.000***	.002	.549	.006
	2	45	-.346*	.020	5.549	.000***	-.016***	.020	.120

Tabla 5 - Coeficientes de correlación de Pearson, coeficientes β , R² y significatividad

*. La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral)

**.. La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

***. El coeficiente es significativo con un nivel de confianza del 95%

El coeficiente de correlación de Pearson hace referencia a la media de los productos cruzados de las puntuaciones estandarizadas de dos variables. Su valor oscila, en términos absolutos, entre 0 y 1. Un valor positivo indica que existe una relación directa entre las variables, mientras que un valor negativo indica que existe una relación indirecta entre ellas. Valores cercanos a 1 en valor absoluto indican relación fuerte entre las variables y valores cercanos a 0 indican relación débil.

En tramos de autopista (tramos 1-4), la correlación de Pearson y el valor del coeficiente β_1 tienen una significatividad que permite aceptar estadísticamente los resultados obtenidos. En el caso del viaje 4 del conductor 2 no es así. Como ya se ha indicado, el viaje se realizó en un horario en el que existía una situación de congestión diaria. Esto explica que el

patrón de conducción varíe con la situación de congestión y no sea posible establecer una relación entre las variables.

Los coeficientes beta adquieren un valor medio de -0.004 aproximadamente, lo cual según el modelo de regresión planteado, un conductor verá disminuido su consumo en -0.004 l/100 km cada vez que realice un nuevo viaje en un tramo desconocido. Esto es válido hasta el momento en que el tramo es conocido totalmente, es decir, cuando el consumo en un viaje no difiere significativamente de la media de los cinco últimos viajes realizados.

El coeficiente R^2 explica qué cantidad de la variable dependiente “consumo” está explicada por la variable independiente del modelo “número de viajes”. Los valores de R^2 en tramos de autopista se sitúan en torno a 0,30, lo cual indica que el número de viajes explica un 30% el consumo de un vehículo y, por tanto, de las emisiones de CO_2 .

En el caso de tramos urbanos, la baja significancia de algunos coeficientes β_1 indica que no es posible establecer una relación clara entre las variables. La existencia de factores externos que influyen en el consumo tales como congestión, señalización semafórica, etc. provocan este fenómeno. Valores de significancia mayores que 0,05 indican que no existe evidencia estadística al 95% que la correlación de Pearson y el coeficiente de β_1 sean distintos de cero. Sin embargo, se ha demostrado que sí existe un ahorro en el consumo al comparar los primeros diez viajes con los diez últimos en cada tramo.

4.3. Curva de aprendizaje

Para representar la curva de aprendizaje de cada viaje y conductor, se introducen en un gráfico de dispersión el porcentaje del sumatorio del ahorro de combustible en ordenadas y el porcentaje de número de viajes en abscisas. A continuación, se dibuja la curva de tendencia de la nube de puntos, obteniendo así las curvas de aprendizaje individuales, representadas en las Figuras 5 y 6.

Se ha calculado el porcentaje del número de viajes para normalizar los valores y poder comparar las figuras, al no contar todos los tramos con el mismo número de viajes registrados. Por otra parte, el ahorro de consumo se calcula como el decremento entre el consumo de un viaje y la media de los veinte viajes anteriores. A continuación se calcula el sumatorio de todos los valores de ahorro de consumo y de la misma forma, se halla el porcentaje para normalizar los valores y poder comparar las figuras.

Cada trayecto, en función de sus características y situación de tráfico, necesitará que un conductor realice un número de viajes distinto para conocerlo en su totalidad. Se ha considerado que un tramo es conocido totalmente cuando no existen variaciones importantes de consumo entre un viaje y la media de los cinco viajes anteriores. En todos los casos se observa una estabilización en el ahorro de consumo, y por tanto, la llegada a la fase final de la curva de aprendizaje, en la que su pendiente es horizontal.

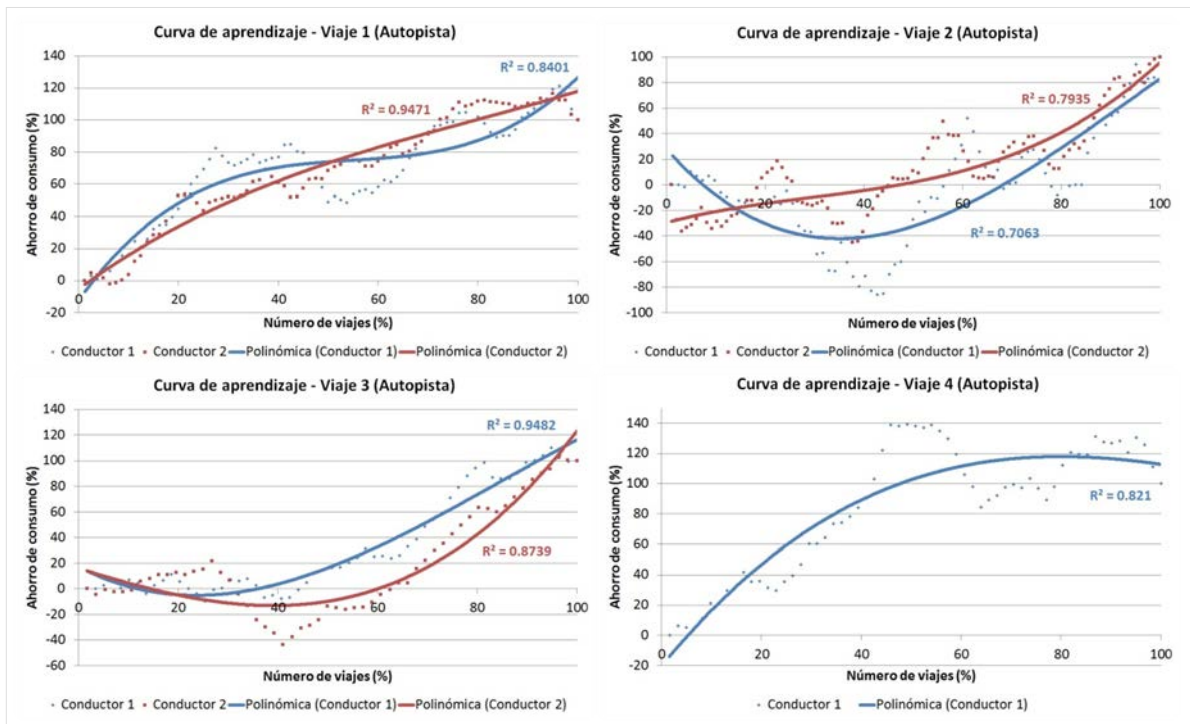


Fig. 5 - Curvas de aprendizaje en autopista por tramo y conductor

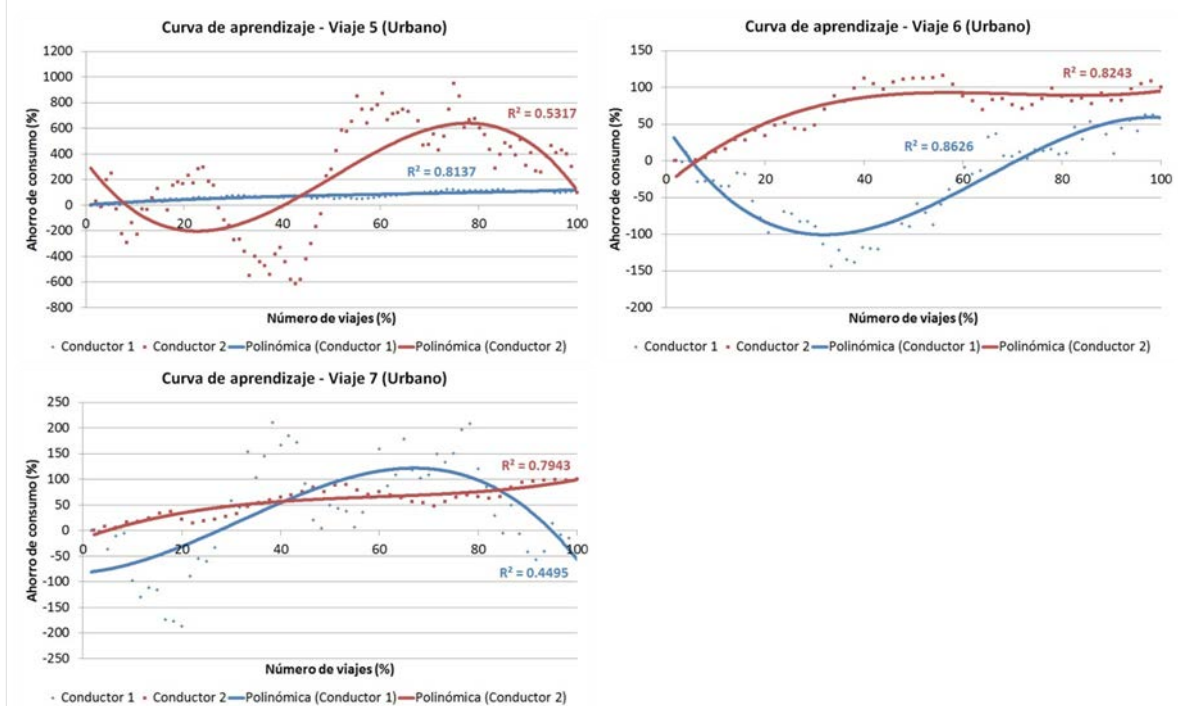


Fig. 6 - Curvas de aprendizaje en urbano por tramo y conductor

El modelo que mejor se ajusta a la nube de puntos es el S-model, que se identifica con una curva de tendencia polinómica cúbica. No existen diferencias significativas entre ajustar la curva mediante una ecuación polinómica de grado 3 o grado superior. En un primer análisis se puede observar cómo en autopista se produce generalmente un incremento progresivo del grado de aprendizaje conforme el número de viajes realizados es mayor.

Sin embargo, en urbano no se observa la misma tendencia. En el viaje 5 existen fuertes variaciones que incluso llegan a un ahorro del 600% y en el viaje 7 del conductor 1 se puede observar cómo se produce una bajada de la curva en los viajes finales.

Esto es explicado por la existencia de diferentes elementos propios del tráfico que influyen en el consumo de combustible, tales como semáforos, intersecciones, glorietas, aceleraciones y deceleraciones frecuentes propias de una zona urbana, pasos de peatones, situaciones de congestión, etc. Todos estos elementos son más propios de zonas urbanas y provocan que en éstas no sea posible aplicar esta metodología de curva de aprendizaje, al no producirse todos los viajes bajo las mismas circunstancias. Aún así, como se mostraba en el epígrafe anterior, se produce un ahorro de consumo si se compara el consumo de los diez últimos viajes con los diez primeros.

La Figura 7 muestra la totalidad de las curvas de aprendizaje en todos los trayectos, descartando los tramos urbanos. Es posible observar cómo la curva de aprendizaje global comienza con una clara tendencia ascendente en los primeros viajes. A continuación, no se aprecia mejoría y la curva se mantiene casi horizontal hasta el 50% de viajes realizados aproximadamente. Es entonces cuando se muestra un ascenso prolongado mayor que el inicial hasta alcanzar el final y volver a estabilizarse.

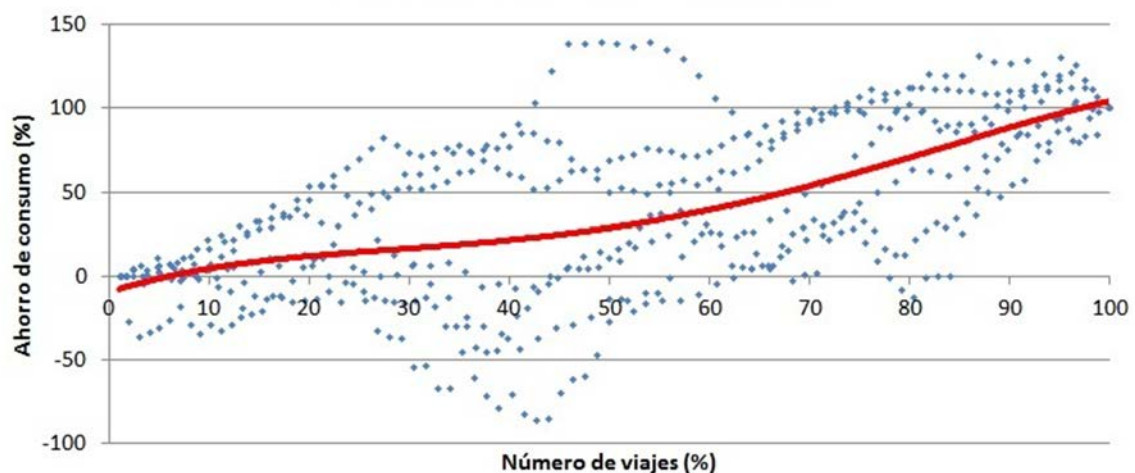


Fig. 7 - Curva de aprendizaje total en autopista

La Figura 8 muestra la curva de aprendizaje teórica para tramos de autopista urbana. Está basada en los resultados obtenidos en la Figura 6. La primera fase de la curva (Trayecto desconocido - Inicio) tiene una pendiente positiva mayor que la segunda fase (Aprendizaje lento), en la que la curva adopta un aspecto casi horizontal. En la tercera fase (Aprendizaje acelerado) la pendiente es mayor y más pronunciada que en la primera fase. En la última fase (Trayecto conocido - Final), el usuario ha optimizado su conducción y conoce perfectamente el trayecto. En esta última fase no se producen reducciones significativas de consumo.

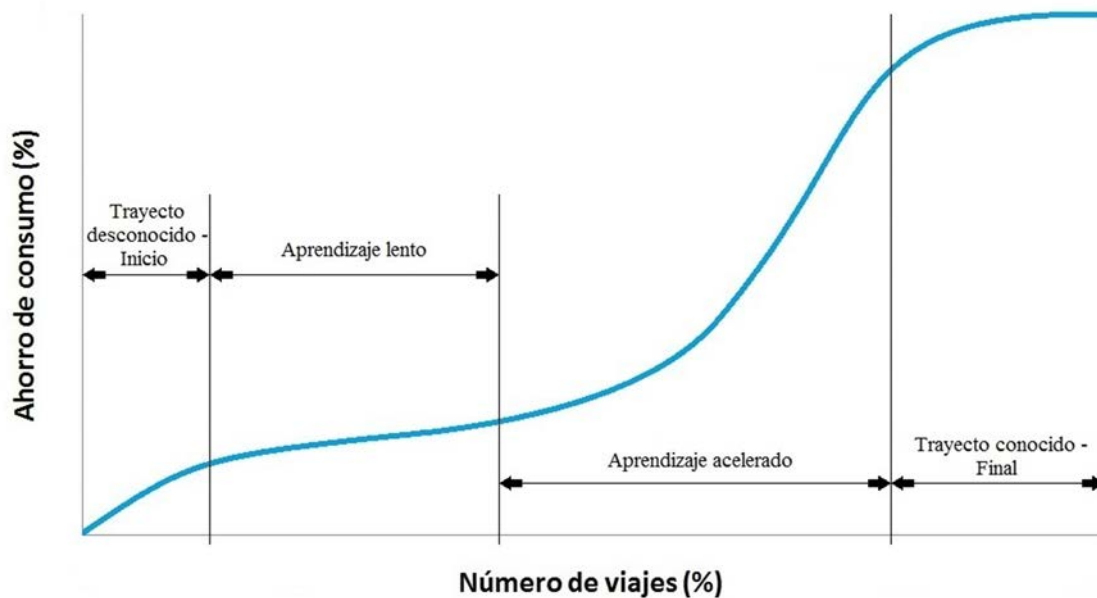


Fig. 8 - Curva de aprendizaje teórica

Los ahorros de consumo y emisiones se verían modificados en caso de que la curva de aprendizaje cambiara. Medidas como una optimización de la gestión de la información y tecnologías disponibles, campañas de educación vial, técnicas de conducción eficiente, etc. podrían variar la curva de aprendizaje del conductor. De esta forma, la experiencia en el tramo se adquiriría más rápido, con el consecuente ahorro de consumo y CO₂.

5. CONCLUSIONES

Este estudio aporta datos concretos sobre la influencia de la experiencia del conductor en un tramo y la monitorización del consumo en la reducción del mismo y las emisiones asociadas de CO₂. Se ha comprobado con un número significativo de viajes que el experimento presenta resultados positivos.

La experiencia adquirida en un trayecto, junto con la monitorización del consumo, lleva al conductor a optimizar su conducción. A medida que un tramo es conocido, se consigue homogeneizar el comportamiento del vehículo, evitando procesos de aceleración y frenado. Por tanto, además de cumplir el objetivo principal (reducción de consumo), demuestra un gran potencial de disminución de emisiones.

La curva de aprendizaje obtenida demuestra, que después de un inicio de aprendizaje lento con una pendiente casi horizontal, tiene lugar un aprendizaje acelerado al alcanzar el 50% de los viajes necesarios para que un conductor se habitúe a un trayecto.

En tramos de autopista, se puede concluir que un 30% del consumo y de las emisiones de

CO₂ está explicado por el número de viajes realizados, y que el ahorro desde el momento en que un conductor realiza un tramo desconocido hasta el momento en que está acostumbrado a él es de un 8%. En tramos urbanos, no es posible establecer una relación estadística que relacione el consumo con el número de viajes, pero sí se ha observado un ahorro de consumo entre la situación inicial y final de un 4%.

Las recomendaciones de gestión de infraestructuras que se derivan del estudio, son la búsqueda de una mayor homogeneidad de carreteras, una buena señalización, realización de campañas de educación vial y la consecución de un mayor porcentaje de conductores que apliquen técnicas de conducción eficiente. Como consecuencia, los usuarios optimizarían su conducción en un trayecto con un número menor de repeticiones, con el consecuente ahorro de consumo y CO₂.

Como futura investigación, sería interesante estudiar el efecto concreto que tendrían las medidas citadas en la curva de aprendizaje, con el objetivo de modificarla y reducir el número de viajes necesarios para alcanzar la fase de aprendizaje acelerado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Comisión Europea, bajo el proyecto ICT Emissions, "Desarrollo de una metodología y herramientas para evaluar el impacto de las medidas TIC en las emisiones del transporte por carretera". Grant Agreement N° 288568. Igualmente, se agradece la colaboración del Ayuntamiento de Madrid, Calle-30 y CRF FIAT en el desarrollo de la toma de datos.

REFERENCIAS

BARIC, D., ZOVAK, G. y PERISA, M. (2013). Effects of eco-drive education on the reduction of fuel consumption and CO₂ emissions. *Promet-Traffic & Transportation* 25(3), pp. 265-272.

CAPPIELLO, A., CHABINI, I., NAM, EK., LUE, A. y ZEID, MA. (2002). *A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption*. IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, pp. 801-809.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2008). *Action plan for the deployment of Intelligent Transport Systems in Europe*. Tech. Report. COM (2008) 886, 2008.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2011 and inventory report 2013. European Environment Agency. 2013.

GHASEMI, A. y ZAHEDIASL, S. (2012). Normality Tests for Statistical Analysis: A

Guide for Non-Statisticians. *International Journal of Endocrinology & Metabolism* 10(2), pp. 486-489.

HIGUERA DE FRUTOS, S. y CASTRO, M. (2014). Using smartphones as a very low-cost tool for road inventories. *Transportation Research Part C* 38(1), pp. 136-145.

ITF/OECD. Transport greenhouse gas emissions: Country data 2010. International Transport Forum, 2010.

KIM, HY. (2013). Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. *Restorative Dentistry & Endodontics* 38(1), pp. 52-54.

MENDILUCE, M., PEREZ-ARRIAGA, I. y OCAÑA, C. (2010). Comparison of the evolution of energy intensity in Spain and in the EU15. Why is Spain different? *Energy Policy* 38(1), pp. 639-645.

NTZIACHRISTOS, L. y SAMARAS, Z., (2000). Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters. *Atmospheric Environment* 34(1), pp. 4611-4619.

PÉREZ, P. J., y MONZÓN, A. (2006). Informe sobre transporte y medio ambiente. Trama 2006. *Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente*.

RAMANATHAN, V. y FENG, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43(1), pp. 37-50.

TU, C., VAN WYK, BJ., HAMAM, Y., DJOUANI, K. y SHENGZHI DU (2013). Vehicle position monitoring using Hough transform. *IERI Procedia* 4, pp. 316-322.

WANG, H., FU, L., ZHOU, Y. y LI, H. (2008). Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics. *Transportation Research Part D* 13(1), pp. 479-482.

WEITEN, W. y MCCANN, D. (2009). *Psychology: Themes and Variations, Second Canadian Edition*. Nelson Education, Toronto.

YELLE, L. E. (1979). The learning curve: historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences* 10(2), pp. 302-328.

WIN-WIN TRANSPORT STRATEGIES: SEARCHING FOR SINERGIES

Cristina Valdés Serrano

Researcher, TRANSyT-UPM, Spain

Andrés Monzón

Professor, Transport Department, Universidad Politécnica de Madrid, Spain

Francisco García Benítez

Professor, Transportation Engineering, University of Sevilla, Spain

RESUMEN

The need of an urban transport strategy on urban areas which solves the environmental problems derived from traffic without decreasing the trip attraction of these urban areas is taken for granted. Besides there is also a clear consensus among researchers and institutions in the need for integrated transport strategies (May et al., 2006; Zhang et al., 2006). But there is still a lack of knowledge on the policy measures to be implemented.

This research aims to deepen in the understanding of how do different measures interact when implemented together: synergies and complementarities between them.

The methodological approach to achieve this objective has been the double analysis – quantitative and comprehensive – of the different impacts produced, first of all by each of the measures by itself, and later on combining these measures.

For this analysis, we have first defined the objectives to achieve within the transport strategy – emissions and noise decrease without losing trip attraction - , and then selecting the measures to test the effects these objectives generate. This selection has been based on a literature review, searching for measures with have proven to be successful in achieving at least one of the objectives.

The different policies and policy combinations have been tested in a multimodal transport model, considering the city of Madrid as case study.

The final aim of the research is to find a transport strategy which produces positive impact in all the objectives established, this is a win-win strategy.

1. THE COMPLEX CONCEPT OF URBAN SUSTAINABLE TRANSPORT. A NEED FOR SINERGIES

European cities are essential in the development of Europe, as they constitute the living environment of more than 60% of the population in the European Union and are drivers of the European economy – just less than 85% of the EU's gross domestic product is produced in urban areas (EC, 2007a).

The car has been one of the main factors of development during the 20th century, but it is at the same time the origin of the main problems cities have to face: traffic increase. This has resulted in chronic congestion (Monzón and Guerrero, 2004), producing a loss of 1% of the EU's GDP, with many adverse consequences such as air pollution - urban traffic is responsible for 40% of CO₂ emissions and 70% of emissions of other pollutants- and noise -about 40% of the population is exposed to road traffic noise exceeding 55 dB. (WHO, 2000; EC, 2007a).

Moreover, during the last few decades, cities have experienced a process of urban sprawl, evolving from the traditional compact model to more disperse urban areas. This new metropolitan model has produced an increase in motorized trips, and a higher dependency on the car (Gutiérrez and García-Palomares, 2007; Monzón and de la Hoz, 2009). As a result, car use has increased, and, consequently, all their associated problems: congestion, emissions and noise among others.

In response to this urban sprawl, the concept of Smart Growth was introduced as a reaction to the undesirable features of continuing growth through “urban sprawl” (Burchell et al., 2000; Downs, 2001; Burchell et al., 2002). Among these theories, it is worth noting the recovery of the Compact City (Schwanen et al., 2004), which promotes an urban model with high densities, land use mix, public transport promotion, concentration of urban development around major transport nodes, regeneration and revitalization of urban centers and growth restrictions in the peripheral areas.

Sustainable urban transport has concerned city officials, institutions and researchers since the 1980's. Among all the different communications and initiatives launched by the EC, we can highlight the Thematic Strategy on the Urban Environment, adopted in 2006 (EC, 2005), which strongly recommends the development and implementation of Sustainable Urban Transport Plans (SUTP) for cities above 100,000 inhabitants.

However, despite all the concerns and efforts aimed at achieving sustainable urban mobility patterns, and the reliance on Sustainable Urban Transport Plans, the complexity of city and transport dynamics makes it difficult to find a practical solution. Some authors have even claimed it is impossible to find an effective sustainable mobility (Banister, 2008). In practice sustainable mobility remains an entelechy. There is no single reason for

this disparity between theory and practice but a mixture of political will, absence of public awareness, coordination, and lack of knowledge. There is a clear consensus among researchers and institutions in the need for integrated transport strategies (May et al., 2006; Zhang et al., 2006), but there is still a lack of knowledge on the policy measures to be implemented, as well as regarding compatibility and complementarity among them (Rupprecht Consult, 2005). And is in this lack of knowledge regarding synergies between measures where this research aims to contribute.

2. OBJECTIVES AND METHODOLOGY

2.1 OBJECTIVES

As previously said, the aim of this research is to contribute to gain knowledge in the possible synergies and complementarities among measures aiming to solve the problem of urban transport.

Despite the urban sprawl experienced in recent decades, European cities, especially city centers, still retain the main characteristics of a compact city, acting as important attractors and generator poles. Moreover, this fact is at the same time positive, with high densities helping public transport competitiveness, and negative, as car use increase has worsened congestion, emissions and noise, thus deteriorating urban conditions.

The EC states we must return to the dense city (EC, 2007a), but clean and competitive, and this implies reducing car use yet providing quality transport alternatives sufficient to recover and maintain the competitiveness of cities.

Consequently, European cities need an urban transport strategy which helps reducing their environmental problems –mainly emissions and noise – but without decreasing their trip attraction. This issue is very important because a loss of trip attraction would result in an increase of people moving to more disperse areas, contributing to worsen the current situation.

Therefore, the objective is to analyze possible synergies and complementarities between several measures aiming to reduce environmental problems in cities but without decreasing trip attraction.

2.2 METHODOLOGY

To achieve the objective defined in section 2.1, the steps followed have been:

- first of all, analyzing a selection of the measures to consider;
- second, selecting a case study to simulate and analyze the different measures;
- third, developing a tool to simulate the different measures;
- fourth, defining the range of scenarios to be analyzed;

- and fifth, defining a set of indicators to measure the goals to achieve.

Selection of measures

As already stated in section 2.1, this research is focused on compact urban areas, where the main problem from the transport perspective is urban congestion.

Among these measures, urban road pricing policy has been proposed as one of the most effective policies to curb down traffic congestion in the metropolitan areas (Ministry of Transport, 1964). But by their own, pricing policies are strongly rejected by people (Schade and Schlag, 2003), particularly when an existing infrastructure has been used for free for long time and a regulation is approved to pay for it (Palma et al., 2006).

The recent urban toll experiences of London and Stockholm have proved that, when public transport is improved at the same time as the new toll is implemented, rejection tends to decrease, since people perceive a direct benefit for it, not just an extra toll (Armeliuss and Hultkrantz, 2006).

From the plurality of measures aiming to improve public transport, we have chosen dedicated bus lanes due to two main reasons; the first one based on the fact that the EC (EC, 2007b) defines reserved corridors as the best solutions to ensure not only speed but regularity, which are crucial for public transport competitiveness. And the second one based on Banister and Marshall's (2000) defense that measures to encourage modal shift, such as pricing, must be combined with strategies to make the best use of the "released space".

Both cordon pricing schemes – London and Stockholm – have proved to produce positive impacts in terms of traffic and emissions reduction, but there is no evidence on noise decrease, which is one of the goals to achieve within the transport strategy sought.

The SMILE project (2010) – Guidelines for road traffic noise abatement - concludes that traffic calming is one of the most efficient measures for reducing traffic noise. And the EC (2007b) states that reserved corridors for buses support and are supported by traffic calming schemes, but does not give any evidence for this assertion.

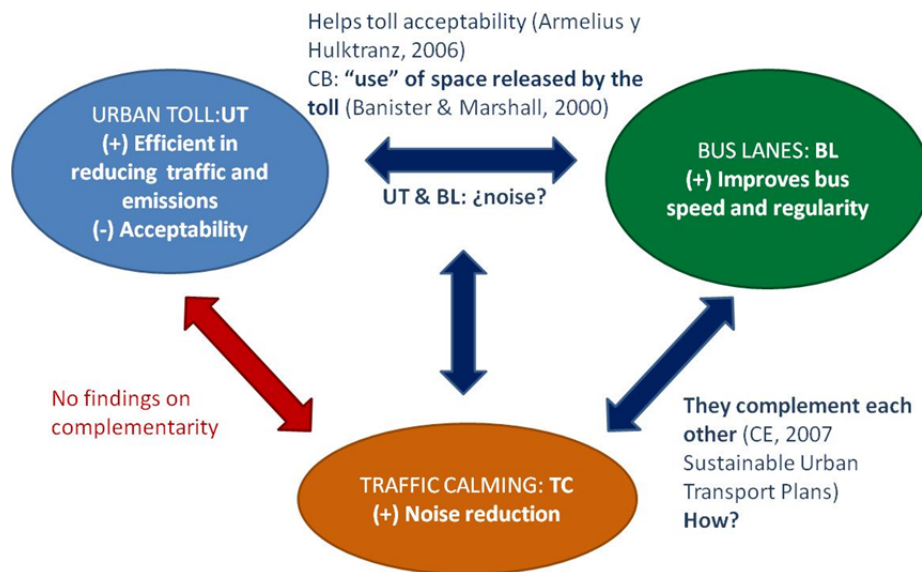


Figure 1 – Links between measures

These three measures – urban toll, dedicated bus lanes and traffic calming - seem to address the three goals to achieve: emissions reduction and noise decrease with no loss of trip attraction.

Positive effects of combining these measures have been proven when applying road pricing and public transport simultaneously, but not conclusive improvements have been observed with traffic calming.

The case study

The case study considered in this research is the Central Area of the city of Madrid. This Central Area is delimited by the M-30 inner ring road surrounding the city.

This area, of more than 61 km², contains all the main characteristics of the “compact city”:

- It locates more than 1.000.000 inhabitants and 35% of the jobs of the metropolitan area.
- It is the origin and/or destination for 43% of the mechanized trips done daily within the Metropolitan Area of Madrid.
- It has a high share of public transit - 60% to 75%. -, due partly to the high competitiveness of public transport in terms of travel time: public transit travel time is below 50% higher than car's.

The transport model

The three measures selected have been tested in a multimodal transport model developed in VISUM. This model includes all the metropolitan area of Madrid, though the analysis has focused on the Central Area of the city.

Figures 2 to 4 represent the road and public transit network characterized in the model.

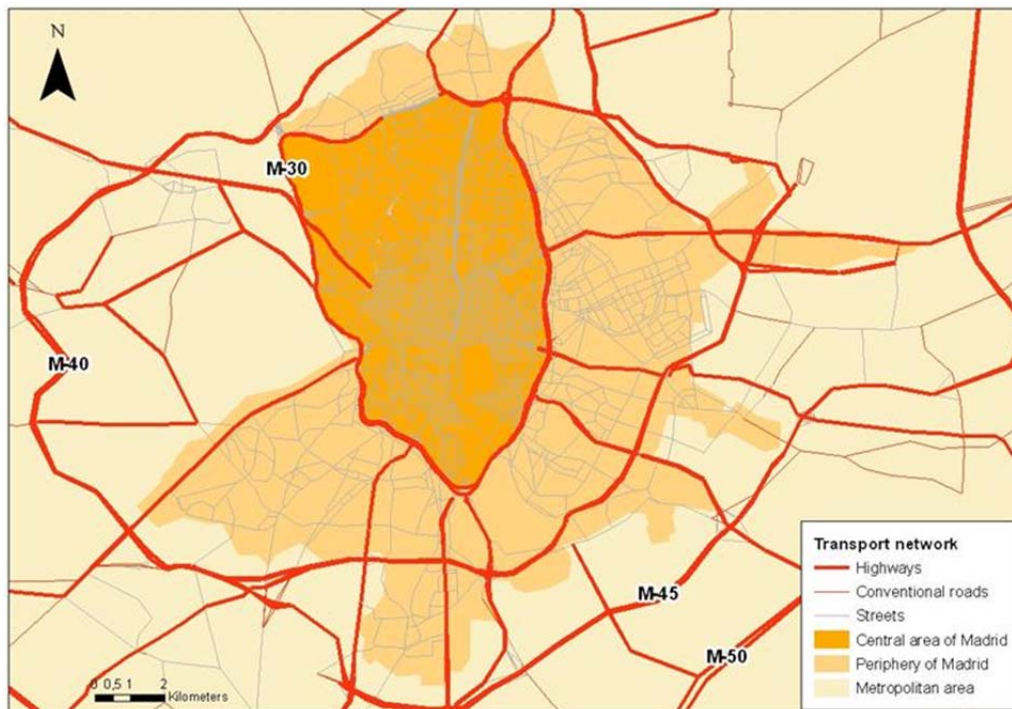


Figure 2 – Road network

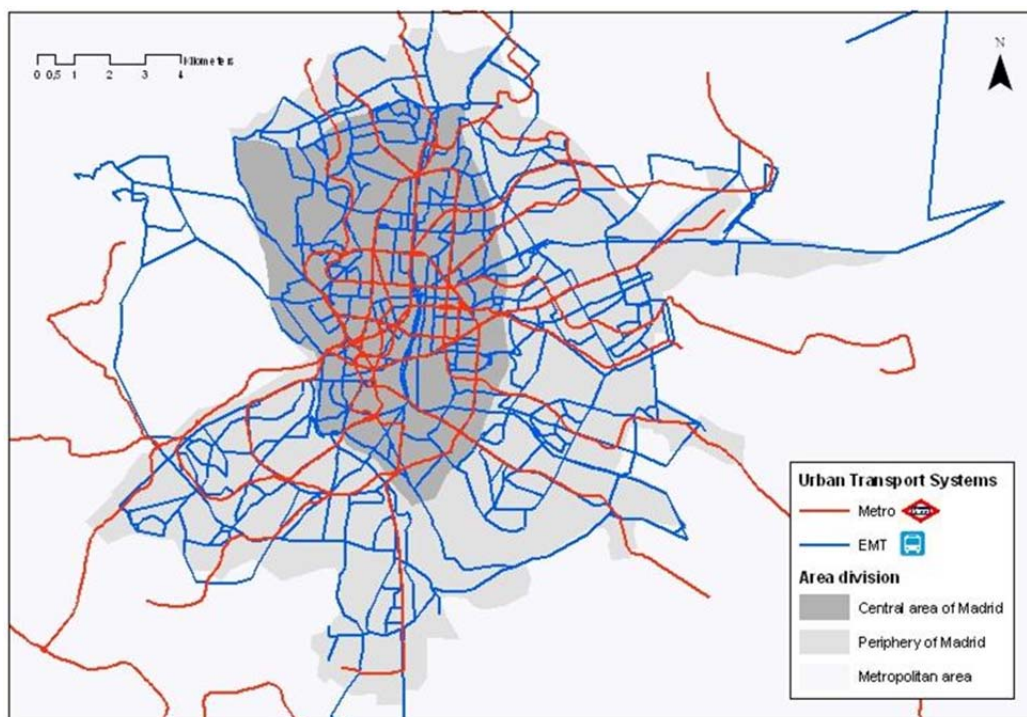


Figure 3 – Urban public transit network

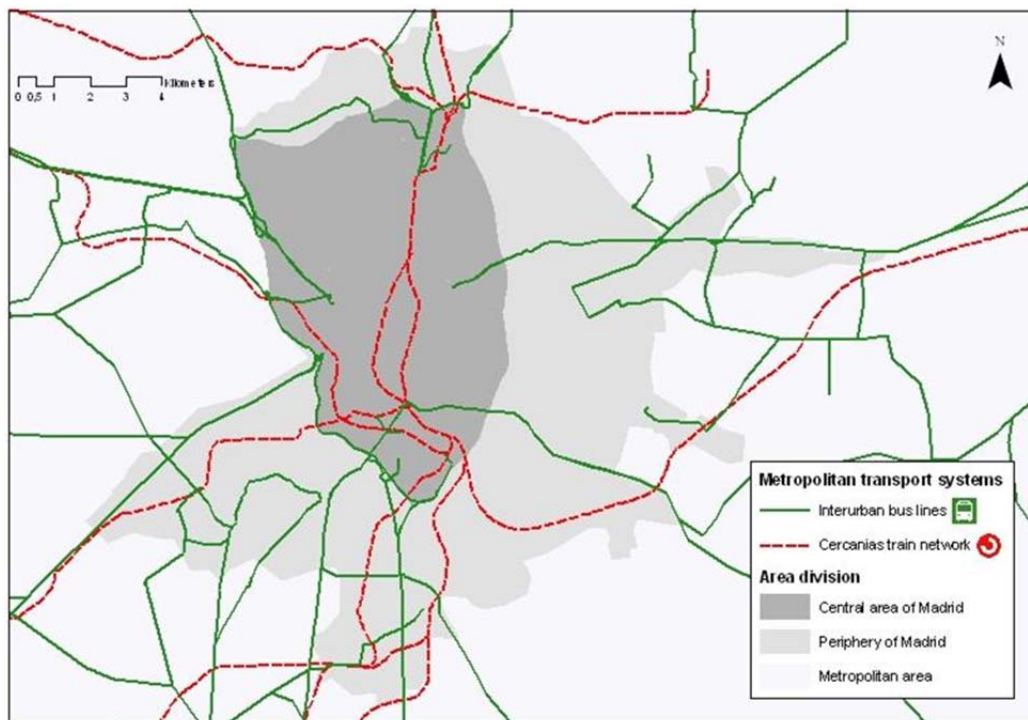


Figure 4 – Metropolitan public transit network

The urban toll defined is a toll ring, where vehicles have to pay for entering the tolled area. This toll has been implemented as an extra cost in all links entering the tolled area.

Efficiency of dedicated bus lanes increases with the number of bus services running in each road section (Sanz, 2008), reason why this measure has been simulated in the vertebral axes of the city -avenues and wide streets. Bus dedicated lanes are simulated by reducing car capacity on the links affected from n lanes to $n-1$ and re-calculating bus speed, as: $V_{cur_{bus}} = V_{o_{bus}}$

Traffic calming also pursues a gain of livability in neighborhoods, reason why it has been considered only in local streets - no more than 3 lanes in the whole road section - by reducing the maximum speed to 30 km/h.

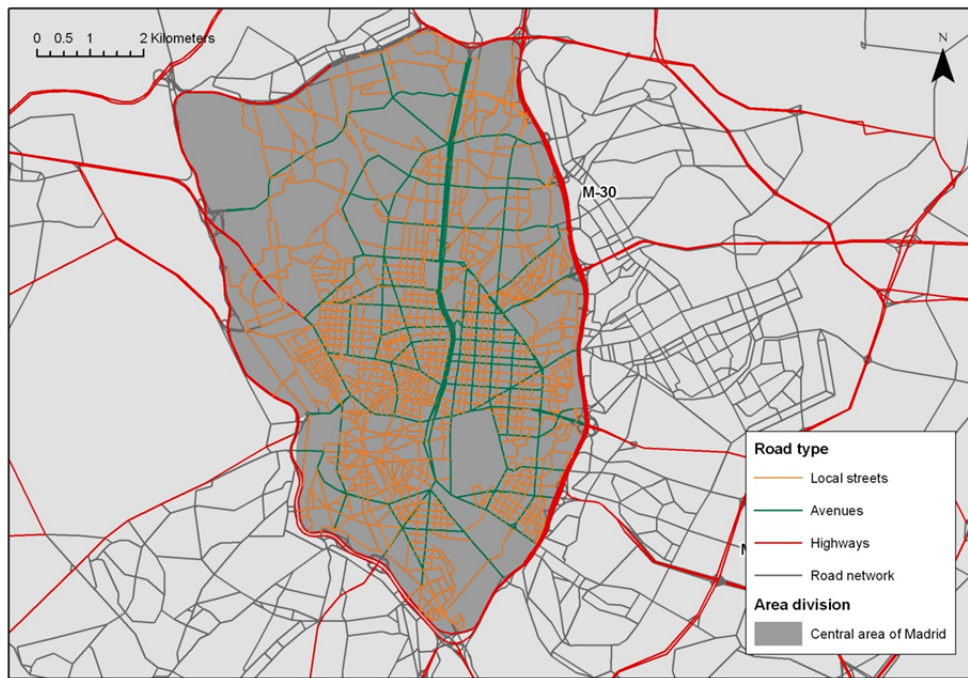


Figure 5 – Road network and hierarchy

Scenarios

In order to measure and understand possible synergies, several measures have been simulated firstly isolated, secondly combined two by two, and finally the three of them together.

This provides a wide range of seven different groups of scenarios, as shown in Table 1:

Measure	Scenario name
Urban toll (UT)	UT
Traffic calming (TC)	TC
Dedicated bus lanes (BL)	BL
Urban toll (UT) & Traffic calming (TC)	UT&TC
Urban toll (UT) & Dedicated bus lanes (BL)	UT&BL
Traffic calming (TC) & Dedicated bus lanes (BL)	TC&BL
Urban toll (UT) & Traffic calming (TC) & Dedicated bus lanes (BL)	UT&TC&BL

Table 1 – Scenarios

Each of the individual measures and a combination of them were simulated on three areas of different size, each area included the previous one and a new ring-road around it:

- Area 1 includes the Central district
- Area 3 includes the whole Central Area
- Area 2 is an intermediate level, delimited by consecutive big avenues which work as a main traffic-distributor axis inside Central Area.

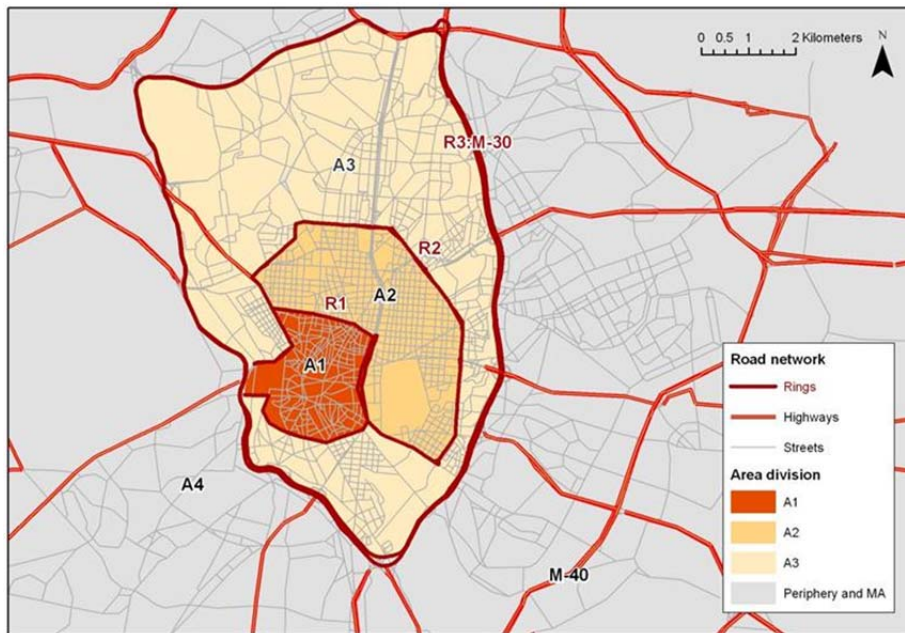


Figure 6 – Study area division

For the policy packages including just two measures, the scenarios considered are all the possible combinations of areas of implementations for each of the measures. When combining three measures, we only considered those which, from the values obtained in single measure scenarios, could generate the best results.

Indicators

Each of the objectives established in section 2.1 needs to be quantified, and this requires the definition of indicators. The indicators defined are:

- Emissions decrease

Considering the existence of several pollutants, an index of pollutants emissions (PEI) was defined. According to May and Marsden (2010), the main pollutants concerning air quality in urban areas are particulate matter (PM) and oxides of nitrogen (NO_x), being the toxicity factor of nitrogen oxides a 0.5 of the toxicity of PM (NEEDS, 2010). Therefore, the resulting index is shown in equation 1:

$$PEI = \frac{0.5 \times NO_x + 1 \times PM}{1.5} \quad (1)$$

- Noise reduction

According to the modeling results, more than 98% of the road network inside the Central Area of Madrid, holds during the morning peak hour a noise level higher than 55 db, value set by the World Health Organization (WHO, 2000) as the annoyance level.

Noise has been measured as the sum of the noise level of each of the road sections weighted by their length.

- No loss of trip attraction

Measuring this attraction in terms of travel time, one could consider trip attraction will increase with travel time saving. But, according to several authors (Zahavi, 1974; Zahavi, 1980; Metz, 2004; Knoflacher, 2007), travel time budget is a universal constant. This means that a speed increase will not produce a time saving but an increase in distances travelled or number of daily trips.

If time dedicated to travel is constant, then modal distribution will be determined by the possibility of reaching different destinations within these temporal limits; so that, if the time difference between car and public transport increases in favor of the car, public transport will not be an acceptable choice (Monzón and de la Hoz, 2009). Therefore, the third target to achieve is to increase public transport competitiveness but without varying substantially the total travel time; this means by reducing public transport travel time.

All these indicators, summarized in Table 2, are compared to the base case, which is referred to the case where no measure is applied.

Indicator		Geographic scope
Emissions	PEI (NOx, PM)	Central Area
Noise	Noise	Central Area
Trip attraction	Travel time	Trips with origin and/or destination in Central Area
	Ratio $\frac{\text{Average travel time PT}}{\text{Average travel time Car}}$	
	Public transport speed	

Table 2 – Indicators

3. RESULTS

Quantitative results of all the scenarios considered on the different indicators considered are shown in Figures 7 to 11:

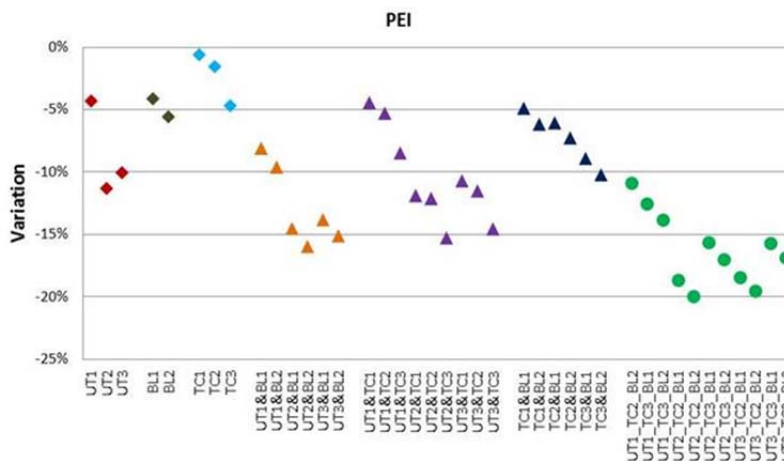


Figure 7 – Emissions variation

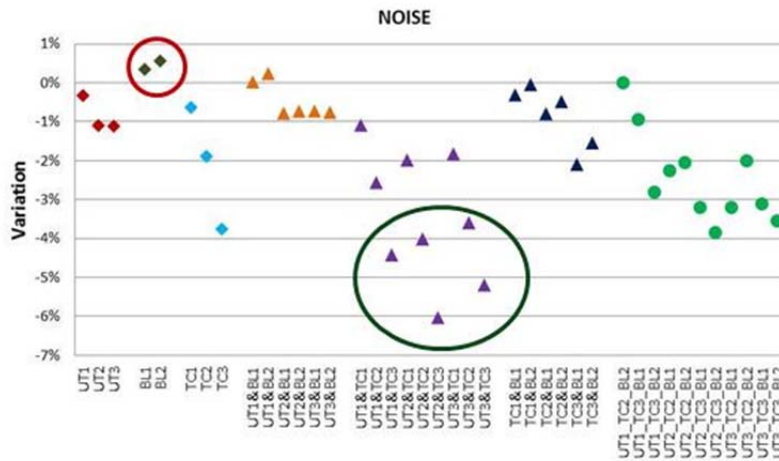


Figure 8 – Noise variation

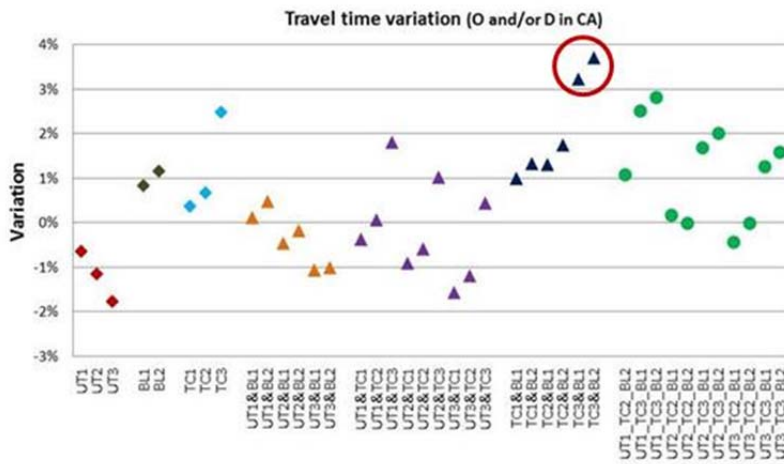


Figure 9 – Travel time variation

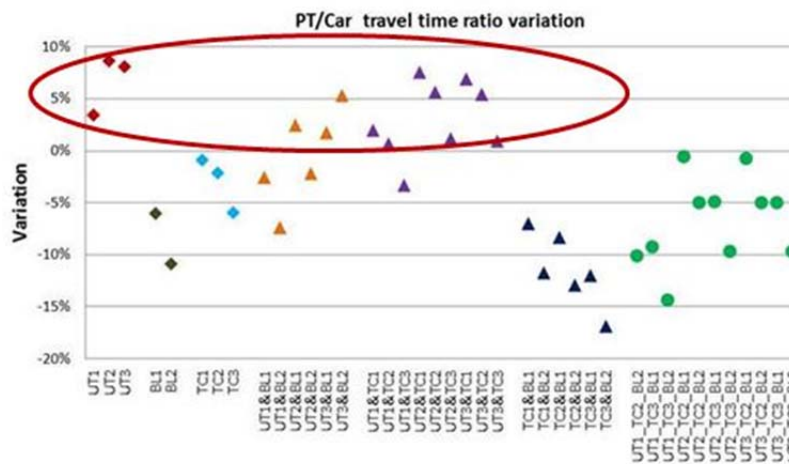


Figure 10 – PT/Car time variation

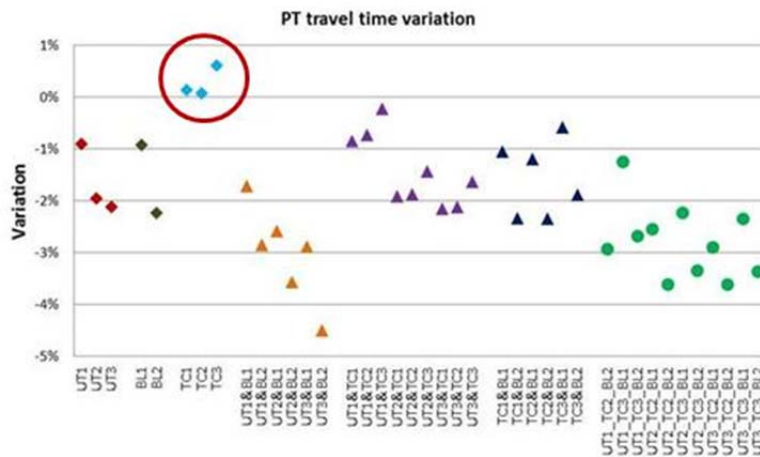


Figure 11 – Public transit time variation

Table 3 summarizes in a qualitative way - positive (+), negative (-) or neutral (~0) - the impacts of the different measures / combination of measures for each of the indicators previously defined.

Scenario	PEI	Noise	Trip attraction		
			Total trip time	Average PT time	PT time / Car time
UT	++	++	++	+	-
BL	+	-	-	+	+
TC	+	+	-	-	+
UT&BL	+	~0	+	+	-/+
UT&TC	+	+	+	+	-
BL&TC	+	~0	-	+	+
UT&BL&TC	+	+	~0	+	+

Table 2 – Qualitative representation of impact observed

All the three measures produce a positive impact in terms of veh-km inferring the three of them a modal split to public transit. Although distinct quantitative figures on the specific objectives achieved do vary with each of them.

The first of the measures considered – an urban toll - has a very positive impact for both emissions and noise. Regarding trip attraction, the total travelling time spent decreases, as well as the average time for public transit trips. But when comparing public transit time with car time, this ratio increases; this means car time decreases more than public transit time. As evidenced by Monzón and de la Hoz (2009), this ratio is strongly correlated with modal split. Therefore, we can expect an increase in car use in the medium term, especially for those origin-destination trips avoiding the toll but

benefiting from traffic release.

Dedicated bus lanes do produce a positive impact on emissions, but not on noise. Traffic decreases on streets where a bus lane is implemented, decreasing noise at the same time, but part of this traffic does not disappear but spills over to nearest streets with no capacity constraint. This traffic increase produces a higher noise level. An the “re-distribution” of this traffic produces a negative impact on car’s time while positive in public transit, resulting in an increase of public transit competitiveness compared to car’s in terms of time. However, the total travel time increases.

Traffic calming produces a positive impact especially on noise, and also on emissions. This is because noise benefits from speed reduction whilst emissions do not. Besides, impact on trip attraction is negative; speed decrement is an obvious consequence of this measure, and therefore time increase. Moreover, as traffic calming also entails a traffic re-distribution from streets with traffic calming to streets without this measure, travel time also increases in this second group.

When combining an urban toll with dedicated bus lanes, emissions diminish more than in the case of having active just only one measure, as positive isolated impacts complement each other. The positive impact on noise of an urban toll is neutralized when including dedicated bus lanes. And in terms of public transit competitiveness, the addition of bus lanes to the urban toll benefits public transit time while neutralizes the gain of time by car produced with the urban toll, maintaining the ratio between time by public transit and by car in a similar way to the reference scenario. This is because the space released by traffic decrease is mostly dedicated to bus lanes, instead of benefiting both modes, as happened when considering only an urban toll.

When combining the measures related to dedicated bus lanes with traffic calming, the first aspect to highlight is the neutralization of traffic spill overs.

The combination of dedicated bus lanes with traffic calming generates a double positive impact on emissions, as positive isolated effects complement each other. The negative impact on noise produced by dedicated bus lanes is mitigated with the positive impact produced by traffic calming, and the negative impact of public transit time increase produced due to the traffic spillover observed by traffic calming is mitigated with the dedicated bus lanes in main avenues. These bus lanes reduce partially the total travel increase due to traffic calming, but still travel time increases.

If we now consider the three measures are simultaneously applied (UT+BL+TC) then there is a positive impact on the three aspects considered – emissions decrease, noise reduction and no loss of trip attraction. The following effects are noticed:

- Regarding emissions, the three measures produce a positive impact.
- As for noise, the negative impact of the bus lanes is offset by the positive synergies

that occur when implementing together an urban toll and traffic calming.

- Regarding not to lose trip attraction:
 - An urban toll produces a global time saving, but public transport loses competitiveness compared to car,
 - Bus dedicated lanes partially offset this loss of competitiveness, but not substantially.
 - The joint implementation of traffic calming and dedicated bus lanes makes the restriction higher for cars than for public transport: the speed restriction of the traffic calming measure entails a speed decrement. Implemented by itself, traffic calming affects both modes, partially due to the speed restriction and partially due to the congestion increase in the adjacent main roads produced by the spillovers. But when bus dedicated lanes are considered together with traffic calming, buses are practically not affected by the speed restriction, as they run mostly along dedicated bus lanes along the main roads.
 - The car speed imposed by traffic calming schemes produces a negative impact on global time saving when implemented by itself, but in combination with an urban toll this negative impact is annulled by the positive impact of the toll.

4. CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS

The results previously presented show how the combination of measures is fundamental in achieving sustainable mobility. As already mentioned, sustainable mobility encompasses a host of different goals to achieve, whilst no single measure has a positive effect on all.

However, when combined, sometimes they reinforce each other to a greater or lesser extent, and sometimes annul the negative effects of another measure for a specific target.

Thus, in a complementary manner, achieving an impact that is not necessarily higher in each one of the targets considered, it does produce a positive effect when considering all of them in a simultaneous manner – a WIN-WIN strategy.

To achieve this balance is essential to select the measures based on the objectives to be achieved, as stated by May et al (2000a). This may seem obvious; however, it is one of the main problems that SUTP has to face. As seen previously, the policy package combining the three measures produces a benefit in the three targets considered, whilst the policy packages considering only two do not. In practice this means that despite how well the SUTP is defined, the results do not produce a positive impact on all the targets when only part of the measures is implemented.

REFERENCIAS

ARMELIUS, H. and HULTKRANTZ, L., (2006). The politico-economic link between public transport and road pricing: An ex-ante study of the Stockholm road-pricing trial. *Transport Policy* 13(2), 162-172.

BANISTER, D. and MARSHALL, S., (2000). *Encouraging Transport Alternatives: Good Practice in Reducing Travel*. The Stationery Office, London.

BANISTER, David, 2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy* 15, pp. 73-80.

BURCHELL, R., LISTOKIN, D. and GALLEY, C.C., (2000). Smart growth: More than a ghost of urban policy past, less than a bold new horizon. *Housing Policy Debate II*, Rutgers, the State University of New Jersey (821-879).

DOWNS, A., (2001). What does "smart growth" really mean?. *Planning* 67(4), 20-25.

EC, 2005. *Thematic Strategy on the Urban Environment*. COM (2005) 718.

EUROPEAN COMMISSION, (2007a). *Green Paper on Urban Environment: Towards a new culture for urban mobility*. COM (2007) 551.

EUROPEAN COMMISSION, (2007b). *Sustainable Urban Transport Plans*. Preparatory Document in relation to the follow-up of the Thematic Strategy on the Urban Environment.

GUTIERREZ, J. and GARCÍA-PALOMARES, J.C., (2007). New spatial patterns of mobility within the metropolitan area of Madrid: Towards more complex and dispersed flow network. *Journal of Transport Geography* 15(1), 18-30.

KNOFLACHER, H., (2007). Success and failures in urban transport planning in Europe—understanding the transport system. *Sadhana* 32 (4), 293-307.

MAY, A.D., KELLY, C., SHEPHERD, S., (2006). The principles of integration in urban transport strategies. *Transport Policy* 13(4), 319-327.

MAY, A.D., MARSDEN, G., (2010). *Urban Transport and Mobility*. Document produced as background for the 2010 International Transport Forum on Transport and Innovation: Unleashing the Potential. Leipzig, Germany, 26-28 May 2010.

METZ, D., (2004). Travel time constraints in transport policy. *Transport. Proceedings of the Institution of Civil Engineering* 157(2), 99-105.

MINISTRY OF TRANSPORT, (1964). *Road Pricing: The economic and technical Possibilities*.

MONZÓN, A., GUERRERO, M.J., (2004). Valuation of social and health effects of transport-related air pollution in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 334-335, pp. 427-434.

MONZÓN, A. and DE LA HOZ, D., (2009). Efectos sobre la movilidad dinámica territorial de Madrid. *Urban*, 14, pp 58-71. Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Madrid.

NEEDS, (2011). NEEDS project: New Energy Externalities Developments for Sustainability. 6th Framework Programme of the European Commission. 2004-2009. Final report. <http://www.needs-project.org>. Accessed in September 2011.

PALMA, A., LINDSEY, R. and PROOST, S., (2006). Research challenges in modelling urban road pricing: An overview. *Transport Policy* 13(2), 97-105.

RUPPRECHT CONSULT, (2005). Sustainable Urban Transport Plans (SUTP) and urban environment: Policies, effects, and simulations. Review of European references regarding noise, air quality and CO2 emissions. Final report.

SANZ, A., (2008). Calmar El Tráfico. Pasos Para Una Nueva Cultura De La Movilidad Urbana. Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, 2008.

SCHADE, J. and SCHLAG, B., (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 6(1), 45-61.

SCHWANEN, T., DIJST, M., DIELEMAN, F. M., (2004). Policies for urban form and their impact on travel: the Netherlands experience. *Urban Studies* 41(3), 579-603.

SMILE, (2010). SMILE project: Guidelines for Road Traffic Noise Abatement. European Commission "LIFE-Environment" research programme. LIFE00 ENV/F/000640.

WHO (World Health Organization), (2000). World Health Report 2000. Health Systems: Improving Performance.

ZAHAVI, Y., (1974). Travel time budgets and mobility in urban areas. Federal Highway Administration, Washington DC., U.S. Department of Transportation.

ZAHAVI, Y. (1980). Regularities in travel time and money expenditures. *Transportation Research Record* 750, 13-19.

ZHANG, X., PAULLEY, N., HUDSON, M. and RHYS-TYLER, G., (2006). A method for the design of optimal strategies. *Transport Policy* 13, 329-338.

I intend to have this conference paper considered for the selection of best papers to be submitted to the special issues.

Public transport accessibility: measuring negative synergies of urban sprawl and economic crisis

Prof. Andres Monzon

Transport Research Centre, TRANSyT-UPM, Spain
andres.monzon@upm.es
+34 913 365 373

Andrea Alonso, PhD student

Transport Research Centre, TRANSyT-UPM, Spain
Andrea.alonso@upm.es
+34 913 365 234

Abstract

Accessibility to public transport is one of the key factors to assure sustainable mobility patterns. However PT accessibility levels are linked to PT supply. After more than two decades of a clear trend for urban sprawl, PT has increasing problems of efficiency to compete with car trips. This tendency could only be counterbalanced through more and better PT transport services. However these problems are now ever greater because the lack of resources for financing PT services. The clear risk is that cities could fall in the so called vicious circle of mobility, where less quality of PT services would reduce demand producing less income which would have the consequence of reducing more the services and so on.

This paper aims to analyse the urban transport systems on some Spanish metropolitan areas in order to determine their evolution during the last years, given the challenges they have to deal with, mainly urban sprawl and economic decline, both considered as important threats in European urban areas. The required data for this work are taken from The Spanish Metropolitan Mobility Observatory (MMO) which comprised supply, demand and economic data from the majority of the big cities in Spain.

The paper shows the results of the analysis of 10 years of PT performance, including those of very severe economic crisis in Spain. The paper differentiates the situation in central cities and in those cities in the suburban areas. A number of indicators are analysed based on the following data: population and population density, GDP, unemployment rate, PT demand and supply.

Based on those data, 2 accessibility indicators have been designed to analyse PT efficiency and PT quality in 8 selected cities and metropolitan areas along Spain. The results indicate that PT accessibility levels are measures that indicate which transport policies should be foster to keep PT efficiency and quality levels in order to keep PT competitiveness in urban areas.

The paper also shows how different cities have reacted in very different way to the lack of resources and reduction of trips, with very different results. Those policy actions are analysed on the light of the PT accessibility levels. Some cities have increased the PT supply to provide better PT to those affected by the reduction of income, while other cities have adopted a more pragmatic policy by reducing services and lines when the number of travellers is decreasing due to the reduction of economic activities in the area.

Keywords: accessibility to PT, urban mobility, urban sprawl, economic crisis

Abbreviations

PT: Public Transport

MMO: Metropolitan Mobility Observatory

MA: Metropolitan Area (geographical area where there is a high degree of interaction between its urban centres in terms of trips, relationships or economic activity)

CC: Central City (core city in the metropolitan area)

MR: Metropolitan Ring (Metropolitan area excluding Central City)

PTA: Public Transport Authority

1 Introduction

Evolution of human settlements and unavoidable effects society's development has on environment, started to concern the global arena in the Conference on the Human Environment in Stockholm, where the importance of achieving a sustainable development by cities was especially enhanced (UN, 1972). European cities- which are the living environment for the majority of the population (EC, 2007) - are essential for their countries development. But in the last years, urban areas are facing some new trends, which added to the old ones, have become real threats to their efficient operation and sustainable development. Those trends are described by the initiative *Cities of Tomorrow* (EU, 2011), they are generalized over all European cities, and here we describe them into the three dimensions normally related to the concept of sustainability- society, environment and economy (OECD, 2001; Tanguay et al., 2010; Haghshenas and Vaziri, 2012). Regarding society, the working-age population weight is decreasing due to the low birth rate, the increase of life expectancy and the active population migration due to the lack of job opportunities. On environmental dimension, damages of urban development to natural resources, which are not new, still need to be addressed, especially because of the added difficulty that possess urban sprawl over resources management. Regarding economy, the main problems have recently appeared with the general recession faced by Europe, putting pressure over economic development and competitiveness. Finally, during the last decades many European cities are sprawling, and this affects society, entails more environmental problems and reduces economic efficiency, and therefore it can be considered a horizontal threat over sustainability on its three dimensions, although all described threats are related (i.e, the demographic decline is partly due to the economic problems).

Analyses of the challenges facing cities in their efforts to achieve a more sustainable development invariably give a high priority to the problems of mobility and access (Newman and Kenworthy, 1999). At the urban level, where transport problems are more acute and concentrated than elsewhere, achieving a sustainable form of mobility is a prerequisite for both improvement of the environment, including social aspects, and enhancement of economic viability (EC, 1996). Most problems in meeting this objective derive from excessive car traffic volumes, and the solution lies partly in the provision of public transport choices (EC, 2011a).

2 Research Background and objectives

This paper aims to analyse urban public transport systems in eight Spanish metropolitan areas, in order to determine their evolution during the last years given the challenges they have to deal with. Out of the main trends described above, the most related to urban transport operation are sprawl and economic changes as it is outlined in the Green Paper on urban transport (EC, 2007). On one hand, urban sprawl is a barrier for providing accessibility and achieving efficiency in public transport management (EEA, 2006). In the other hand, economic activity is usually connected to transport demand (Hine and Grieco, 2003); and fiscal austerity periods, like the one we are facing now, usually lead to public resources constraints (EU, 2013), which may affect PT services provision and quality, and therefore accessibility (Preston and Raje, 2007). To measure the evolution of described trends-demographic changes, economic evolution, PT demand, PT accessibility and PT efficiency- and their interactions, we follow an indicators-based methodology. Before selecting appropriate indicators for each trend, we define the different concepts to be measured, which have been largely referred along literature.

2.1 Demographic evolution and urban sprawl.

Historical concerns about demographic dynamics and sustainability were focused on the growth of cities linked to increasing population (UN, 1992). In contrast, urban sprawl is a more recent phenomenon, resulting from the spread of low-density settlements, around the core cities, and is

one of the main threats over urban areas (EU, 2011), as it creates environmental, social and economic impacts. Urban sprawl is tied to a variety of factors such as the development of the modern city, individual housing preferences, increased mobility, commercial investment decisions and the coherence and effectiveness of land use policies at all levels (EEA, 2006). Urban sprawl has several consequences, which are described in this section.

- *Socio spatial segregation- social polarization*

From a social point of view analysis, there are two main drivers of urban sprawl, and the sprawl itself reinforces those drivers, some European institutions have described both of them in several reports (EEA, 2006; EU, 2011). From one side, the degradation of some parts of the cities regarding human living conditions, in contrast to the apparent attractions of the suburbs, are making many families settle in peri-urban areas. From the other side, the increased gentrification of other parts of the core-cities, drives less affluent social classes look for more affordable housing further from the city. Therefore, from a social perspective urban sprawl is due to the segregation of residential development according to income and exacerbates urban social and economic divisions, enhancing differences between the different zones inside and outside the cities. Furthermore, urban sprawl makes it more difficult the provision of services and this leads to a reduction of the accessibility to basic needs such as health care, education or transport and ultimately contributes to social exclusion (Preston and Raje, 2007).

- *Land occupation and environment degradation*

Urban development involves the substantial consumption of numerous natural resources. The consumption of land and soil are of particular concern as they are mostly non-renewable sources. Infrastructure development and urban sprawl result in a continued expansion of artificial surfaces across Europe, at the expense of agro-ecosystems, grasslands and wetlands (EU, 2011). Another consequence of sprawl is the growing consumption of energy. Generally, compact urban developments with higher population densities have more efficient consumption patterns (Theodoridou et al., 2012). Regarding transport energy, and as it has been evidenced by EEA (2006), there is a significant increase in travel related energy consumption in cities as densities fall. Disperse cities are characterized by an excessive car use, due to the lack of alternative modes- because of the difficulty in providing services- and the longer trip distances. These factors also result in more air and noise pollution.

- *Economic losses and inefficiencies in services delivery*

City centres have been always characterized by functional mix, but urban sprawl contributes to fragmentation of living and working spaces and pushes companies or research centres outside city centres, which may be adversely affected regarding economic dynamics (EU, 2011). Finally, sprawl is at the very least a more costly form of urban development due to increase household spending in housing and transport, the cost to business of the congestion in excessively car dependent areas, and the additional costs of the extension of urban infrastructures including utilities and related services.

2.2 Economic decline

More than two thirds of the European Union's workforce lives in cities- enterprises benefit from agglomeration economies (EU, 2011). But many of these cities are now exhibiting a dual personality of economic strength co-existing with weak demand and unemployment: economic growth depends on demand of consumers and businesses, and policies to develop the local economy seem to have been insufficient, because economic growth may have not created enough jobs, or the jobs may have not been easily accessible (EU, 2013). Unemployment reduction is a top priority across European cities, since the beginning of the European recession which has caused a large drop in economic activity in the EU, with millions of jobs lost (EC, 2011b).

- *Effects on the urban PT systems*

The described economic decline context, affects the demand of goods and services, including transport services demand, a drop in the incomes is usually thought to reduce overall transport demand (Preston and Raje, 2007; Taylor et al., 2009). Regarding urban PT, lower demand, may

imply lower fare revenues, and less efficiency if tariff and service levels remain constant. In addition, government spending is usually very limited in times of austerity (EU, 2013); we cannot ignore the implications of this in the transport provision and offer management, and therefore accessibility levels.

2.4 Accessibility

Accessibility is defined by the “get-at-ability” of a destination (Hillman et al. 1973). And the concept involves supply in terms of land use, and supply in terms of transport provision (Hine and Grieco, 2003; Preston and Raje, 2007). In this paper, we focus on the analysis of accessibility related to transport provision, particularly accessibility of PT networks, but spatial dimension should be also taken into account. Accessibility regarding transport services involves the PT density offer within the area to be served (Preston and Raje, 2007); reason why public transport resources constraints, (if they affect offer quality), or spread of low density settlements (urban sprawl) can lead to lower accessibility levels.

2.5 Efficiency

The term efficiency, usually applied to business, refers to the comparison between the values of outputs and inputs in a production process. In PT transport management, it can be evaluated by tracking service provision and quality implemented to achieve the goals- supply passenger transport needs (Fielding et al., 1978; Karlaftis and Tsamboulas, 2012). Following a similar approach, here we understand efficiency as the quantity of resources -PT offer- used to supply each demand unit. Therefore, accessibility has also an economic dimension, related to the economic costs of providing the supply for each trip.

2.6 Objectives of the paper

In the frame of all those changes, linked to urban development trends and their effects on urban mobility, this paper has a twofold objective.

The first one is to develop a methodology to analyse the evolution of the above described concepts regarding urban systems. It appears the necessity of measuring them on an objective manner, and to create tools for comparison: “You can’t manage what you can’t measure” (TERM, 2000). To that end the methodology will be based on specific indicators able to measure the evolution and to predict future trends of key explanatory factors regarding urban PT operation.

Then, the indicators are applied to a number of Spanish cities, analysing how each of their mobility patterns have evolved differently according to different policy measures and strategies. Therefore the second objective is to extract some policy conclusions based on the impact of the different actions and their effect on sustainable mobility. To this end, two accessibility indicators are proposed for measuring PT quality and PT efficiency.

3 Methodology

Once the objectives have been set, and the concepts to analyse have been defined: firstly the context facing cities- demographic changes, evolution of economic activity and effects on PT demand-, secondly the affection of this context to accessibility and quality of PT offer, and finally how does this combination result in PT management efficiency. We explain in this section the methodology followed to fulfil the objectives.

3.1 Data source

The Metropolitan Mobility Observatory (MMO, 2014) is an association that collects and public urban transport information from a representative group of metropolitan areas, promoting the exchange of information and good practices in the field of public transport organisation, planning and funding. The supporting platform, which has been expanding, comprises nowadays 23 public transport authorities (PTA) in the main Spanish metropolitan areas. The MMO publishes annual reports analysing the mobility patterns of the participating metropolitan areas, which were the main sources for our research. The first report contains information of 11 PTA from 2002 (Aparicio, 2004), and the last one from 2012 (Monzon et al., 2014). Regarding the European framework and according to the revised documents; in those years urban sprawl tendency- that has accompanied the growth of urban areas across Europe over the past 50 years- has continued its way (EEA,

2006); while the economic framework has drastically changed, the first period of economic growth has been followed by the financial crisis that began to hit the global economy in the summer of 2007 (Directorate-General for Economic and Financial Affairs of the European Commission, 2009). In this paper, both tendencies are analysed separated in these two periods (2002-2007 and 2007-2012), as well as how has the PT demand been affected by external changes. Finally, we evaluate the evolution of PT accessibility and PT efficiency in the second period of generalised economic decline.

3.2 Indicators

In this paper we consider indicators to be the right tools for the proposed analysis, as there is a common consensus as to the usefulness of indicators in progress monitoring (Newman and Kenworthy, 1999). Table 1 and 2 describe the indicators provided in the data sources concerning each of the concepts to be analysed, the availability of them regarding the number of cities and the periods of time, and the selected and discarded indicators for this paper, with a brief explanation about the reasons for the selection of each one.

Table 1. Selection of indicators for socioeconomic and sprawl

Concept	Indicators from OMM reports (2014)	Use and availability	Comments
Population growth	Nº inhabitants in the MA	Yes Available (2002/12)	The global population evolution is better comprehended by the number of inhab. in the MA. The differences between MR and CC growth are explained by the concentration ratio
	Nº of inhabitants in the CC	Yes Available (2002/12)	
	<i>Elaborated from MMO data: Nº inhabitants in the MR= Nº inhab. in MA - nº inhab in CC</i>	Yes, but not for final conclusions Available (2002/12)	
Sprawl	MA surface	Not for measuring urban sprawl, but for elaborating accessibility indicators available (2002/12)	Sprawl is characterized by CC loosing population weight overall MA population. But as there is a population growth in both MA and MR, densities are getting higher.
	CC surface		
	Population density in the MA (Nº inhab. MA/ MA surface)	No	
	Population density in the CC (Nº inhab. MA/ MA surface)	No	
	Concentration ratio (Nº inhab. in CC/ nº inhab. MA)	Yes Available (2002/12)	
Economic activity	Household size in MA (Nº persons/ house)	No	Comes from statistics or surveys not updated annually
	GDP per capita in MA (annual € per inhabitant)	Yes Available (2002/12) Not available for CC	To represent value creation
	Employment rate in MA (% of active population employed)	Yes Available (2002/12) Not available for CC	For measuring economic activity is better understood the employment rate which usually grows together with GDP
	Unemployment rate in MA (% of labour force unemployed)	No	

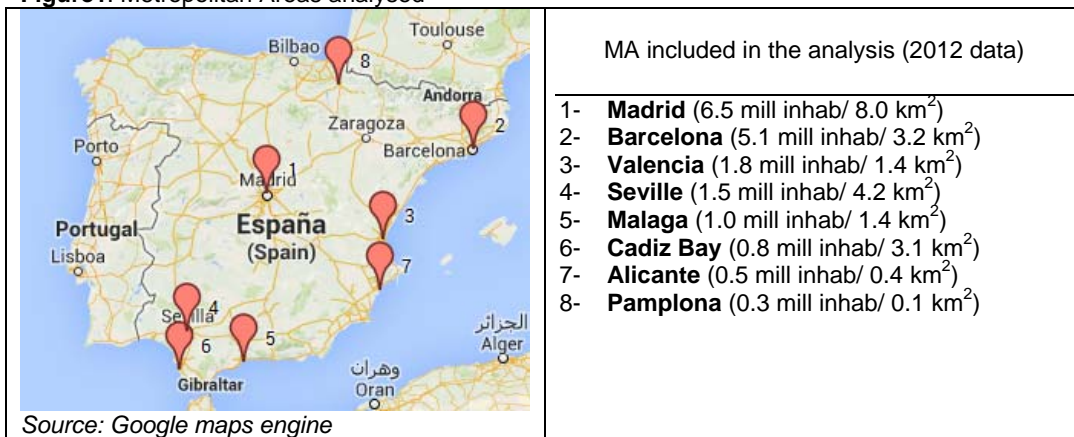
Table 2. Selection of indicators for Public Transport performance

Factor	Indicators in MMO reports (2014)	Use and availability	Comments
PT Demand*	N° PT trips per person per day (according to household surveys)	No	Comes from household surveys not updated annually
	PT modal share (%) (according to household surveys)	No	
	N° trips per PT mode per year (according to PTA registrations)	Yes Available (2007/12) (trips for all modes available for 11 MA 2002/2012)	The number of trips to reflect demand is a more homogeneous and reliable data than passengers-km (Fielding et al., 1978)
	N° of PT trips per inhabitant (N° trips/ n° inhabitants in MA)	Yes, but not for final conclusions (trips for all modes available for 11 MA 2002/2012)	
	N° passengers-km per PT mode/year (according to PTA registrations and estimations)	No	
Accessibility-PT Offer	N° PT lines for each PT mode	No	All are very stable indicators, and do not reflect evolution of PT offer over the years. In addition, for a global overview, it is not accurate to add up these indicators for railway and bus modes (different characteristics).
	N° stops for each PT mode	No	
	Length of each mode of the PT network	No	
	Vehicles-km per PT mode per year	No	For a global overview, it is more accurate to add up seats-km than vehicles-km for railway and bus modes (different carrying capacity). Seats-km is a good measure of the density of transport services supply. The spatial term (service area) must be taken into account to measure accessibility (Preston and Raje, 2007)
	Seats-km per PT mode per year	Yes, but elaborated Available for 8 out of 11 initial MA (2007/12)	
	<i>Elaborated from MMO data seats-km/ service area (MA or CC area)</i>	Yes	
Efficiency-PT Offer & Demand	Vehicle occupation per mode: passengers-km per PT mode /vehicles-km (for each mode)	No	For a global overview, it is more accurate to add up seats-km than vehicles-km for railway and bus modes (different capacities).
	<i>Elaborated from MMO data Seats-km/ n° PT trips (for all PT modes)</i>	Yes	

(*) Although PT Demand is a transport related indicator, in this paper the analysis of its evolution will be presented together with the economic evolution, because of the strong interactions between both factors.

Finally, eight Spanish cities were selected out from those comprising the Metropolitan Mobility Observatory (Figure 1). This selection responds to availability of data for the years of analysis. The socio-economic indicators are analysed for an 11 years period, while transport indicators correspond only to the last 6 years, which is the period characterized by the economic recession in Spain.

Figure1. Metropolitan Areas analysed



3.3 Indicators treatment- Measuring trends and evolution of factors

In order to evaluate the trend of each factor, and be able to provide a global perspective of the evolution of all factors, we propose also an indicator treatment, is to say a formula to be applied to the indicators proposed to measure each factor. A report by the EC-Joint Research Centre (Saisana and Tarantola, 2002) recommends appropriate formulas and normalisation methods for Indicator treatments to be used to summarise complex or multi-dimensional issues as they provide a big picture, and may be easier to interpret. For the analysis of trends over the years, the report proposes the following formula:

$$E_c(\%) = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{x_c^t - x_c^{t-1}}{x_c^{t-1}}}{n - 1} * 100$$

Where E is the value of the evolution indicator which measures the trend of the factor we are evaluating (if it is >0 the analysed factor has increased –positively grown- over the analysed period) for the city c; x_c^t and x_c^{t-1} are the values of the indicators measuring the factor (for example, GDP could be an indicator for measuring economic activity) in year t and the previous year (t-1); n is the number of years in the analysis period.

Therefore, the evolution indicators are the average annual growth over a period of n-1 years (from year i=1 to year y=n). In this paper, all the indicators are analysed from 2007 to 2012, in order to capture the effects of the economic crisis, and some are also analysed in the period 2002-2012.

4 Analysis of the trends in the selected indicators

This section is dedicated to describe the observed trends for the selected explanatory variables. These trends are common for most European cities, but this analysis is focussed in the 8 selected cities. The part tries to evaluate how these trends have and are affecting to PT demand.

In all the analysis we have differentiated two periods: the first one (2002-2007) corresponds to a time of steady economic growth of the country, attracting many immigrants. The second period of analysis (2007-2012) corresponds to the economic crisis, which has been particularly severe for Spain.

4.1 Demographic changes. Population growth and urban sprawl.

The eight metropolitan areas contained in this analysis present very different characteristics. Regarding their population, and according to the MMO classification (Monzon et al, 2014); there are four big metropolitan areas - Madrid, Barcelona, Valencia and Seville - all of them have a

population over one million inhabitants, but Madrid and Barcelona stand out from the rest for having a population over 5 million inhabitants. Then there are two medium size cities, Malaga and Cadiz Bay. And finally two small ones are also included - Alicante and Pamplona- with less than half a million inhabitants. This heterogeneity does not make a difference in the evolution of their populations - big or small areas do not present similar evolution patterns.

Table 3 shows the population in all areas has grown in both analysed periods, although most of them present higher growth rates in the first period (2002-2007), than in the second one (2007-2012), except from Seville, Cadiz Bay and Pamplona. On average, MA present an annual growth of 2.3% in the first period and 1.8% in the second one, since 2007, when the effects of the economic crisis started to be noticed. It is noteworthy the high growth rates of Seville in the first period and Cadiz Bay in the second one, and by contrast, the low rates of Barcelona and Valencia in the second period.

Table 3. Population in metropolitan areas (MA) (inhabitants) - growth (%)

	2002	2007	2012	Average annual growth	
				Average annual growth 2002/2007	Average annual growth 2007/2012
				Economic Growth	Economic Crisis
Madrid	5,423,384	6,081,689	6,498,560	2.3%	1.3%
Barcelona	4,482,623	4,857,000	5,052,000	1.6%	0.8%
Valencia	1,603,655	1,739,946	1,805,115	1.7%	0.7%
Seville	1,121,208	1,246,460	1,476,929	2.2%	3.5%
Malaga	721,945	944,815	1,021,755	5.7%	1.6%
Cadiz Bay	615,600	663,510	783,847	1.5%	3.5%
Alicante	393,736	438,430	464,061	2.2%	1.1%
Pamplona	295,432	309,607	336,410	0.9%	1.7%
GLOBAL AVERAGE				2.3%	1.8%

In Table 4, the demographic evolution is showed separately, considering on the one hand population in the central cities (CC), and on the other hand population in the metropolitan rings (MR). Although in general, population grown for both, shows also higher rates in the pre-crisis period, we notice big differences in both tendencies; growth rates of MR population are clearly higher than those of CC in both periods, presenting on average five times higher values. Therefore, it could be said that urban sprawl, understood as the spread of low-density settlements around the core cities (EU, 2011) seems to be affecting to analysed MA. Although central cities are not losing population, which is another threat usually associated to urban sprawl (EEA, 2006), they are gaining inhabitants but at a slower rate than their corresponding MA.

Table 4. Population in metropolitan rings (MR) and central cities (CC) (inhabitants) - Growth (%)

	2002		2007		2012		E-Avg annual growth 2002/07		E-Avg annual growth 2007/12	
	Metrop. ring	Central city	Metrop. ring	Central city	Metrop. ring	Central city	MR	CC	MR	CC
							Economic Growth	Economic Crisis	Economic Growth	Economic Crisis
Madrid	2,466,326	2,957,058	2,949,226	3,132,463	3,265,033	3,233,527	3.7%	1.2%	2.1%	0.6%
Barcelona	2,977,298	1,505,325	3,262,000	1,595,000	3,431,000	1,621,000	1.8%	1.2%	1.0%	0.3%
Valencia	857,043	746,612	942,292	797,654	1,008,087	797,028	1.9%	1.3%	1.4%	0.0%
Seville	418,688	702,520	547,315	699,145	774,574	702,355	5.6%	-0.1%	7.5%	0.1%
Malaga	187,738	534,207	383,565	561,250	454,322	567,433	17.4%	1.0%	3.5%	0.2%
Cadiz Bay	477,629	137,971	534,956	128,554	659,899	123,948	2.3%	-1.3%	4.3%	-0.3%
Alicante	110,493	283,243	115,757	322,673	129,383	334,678	1.1%	2.7%	2.3%	0.7%
Pamplona	103,567	191,865	114,713	194,894	138,806	197,604	2.1%	0.3%	3.9%	0.3%
GLOBAL AVERAGE							4.5%	0.8%	3.2%	0.2%

The demographic evolution showed in the previous tables has the following consequence: the central cities are losing population weight over their metropolitan areas, with evolution rates similar for each period (Table 5). Generally, about 50% of the MA population lives in the CC - the size of the MA does not seem to make a difference either- but some cases present higher population

concentration such as Alicante- and others very low values, as is the case of Cadiz Bay. Malaga and Cadiz Bay CC have the most important population weight losses over their MA.

Table 5. Population concentration ratio (pop.central city/ pop.metropolitan area) - growth (%)

	2002	2007	2012	<i>E-Average annual growth 2002/2007</i>	<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>
				Economic Growth	Economic Crisis
Madrid	0.55	0.52	0.50	-1.1%	-0.7%
Barcelona	0.34	0.33	0.32	-0.4%	-0.5%
Valencia	0.47	0.46	0.44	-0.3%	-0.7%
Seville	0.63	0.56	0.48	-2.2%	-3.2%
Malaga	0.74	0.59	0.56	-4.2%	-1.3%
Cadiz Bay	0.22	0.19	0.16	-2.8%	-3.8%
Alicante	0.72	0.74	0.72	0.5%	-0.4%
Pamplona	0.65	0.63	0.59	-0.6%	-1.4%
GLOBAL AVERAGE				-1.4%	-1.5%

4.2 Economic decline

As was the case with the MA sizes, the economic context is very different in each MA analysed, southern MA- Seville, Malaga, Cadiz Bay - present lower GDP per capita and lower employment rates than the rest (Tables 6 and 7). The evolution is also presented in the two periods, and unlike in the demographic analysis, the economic evolution drastically changes from one period to the other. The first period is characterized by a marked growth of employment rates (Table 7) and an even more marked growth of GDP (Table 6); while the second period is characterized by employment decline and a lighter GDP decline. Southern MA present higher economic growth rates in the first period, but their economic activity levels also decrease more rapidly in the second period. Summarising, as expected, after the economic growth of the period 2002-2007, the economic recession has affected the Spanish MA analysed, in terms of wealth (GDP) and activity (employment), and those MA with higher growths in the first period have been more sensitive to the crisis in the second period. Also, the GDP per capita has shown to be a more sensitive indicator for economic expansion (showing an annual average growth of 6.1% in the period 2002-2007) as well as the employment rate has shown to be more sensitive to the economic decline (with an annual average growth of -3.7% in the period 2007-2012).

Table 6. Annual GDP per capita (€ per year and inhab.) - growth (%)

	2002	2007	2012	<i>E-Average annual growth 2002/2007</i>	<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>
				Economic Growth	Economic Crisis
Madrid	23,847	29,965	28,906	4.7%	-0.7%
Barcelona	21,246	29,011	27,236	6.5%	-1.2%
Valencia	17,277	22,617	20,678	5.5%	-1.7%
Seville	13,852	19,190	16,960	6.7%	-2.3%
Malaga	13,608	18,715	16,900	6.8%	-2.0%
Cadiz Bay	13,377	19,595	16,538	8.1%	-3.3%
Alicante	16,187	20,097	17,064	4.4%	-3.2%
Pamplona	22,303	29,385	31,167	5.7%	1.3%
GLOBAL AVERAGE				6.1%	-1.6%

Table 7. Employment rate (% of active population employed) - growth (%)

	2002	2007	2012	<i>E-Average annual growth 2002/2007</i>	<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>
				Economic Growth	Economic Crisis
Madrid	54.0	60.8	53.5	2.4%	-2.5%
Barcelona	52.1	59.0	50.1	2.5%	-3.1%
Valencia	50.4	56.8	45.5	2.4%	-4.3%
Seville	42.8	50.4	42.1	3.3%	-3.5%
Malaga	44.0	50.6	39.0	2.9%	-5.0%
Cadiz Bay	38.0	46.2	36.1	4.0%	-4.8%
Alicante	49.0	50.6	41.3	0.7%	-3.9%
Pamplona	52.8	58.4	50.6	2.0%	-2.8%
GLOBAL AVERAGE				2.5%	-3.7%

4.3 Public transport demand

The economic activities are always linked to transport demand (Preston and Raje, 2007; Taylor et al., 2009; de Jong and van de Riet; 2008; Taylor et al.; 2009). In this section, we present the evolution of PT demand in the MA in order to compare it with analysed economic trends. Table 8 shows the demand measured in number of trips and number of trips per MA inhabitant for all PT modes. This indicator presents clear differences based on the size of the MA: bigger MA present higher PT use (even when the indicator is homogenised by the population), with a few exceptions. Regarding demand evolution, it behaves very similar to the economic activity: the first period, characterised by a demand growth (showing an annual average growth of 2.3% in the period 2002-2007), is followed by a second period of demand decline (with an annual average growth of -1.5% in the period 2007-2012). If we focus on the evolution of the demand per inhabitant, the growth in the first period is lighter while the decline in the second period is stronger (which is coherent with the population growth exposed).

Table 8. Public Transport demand (millions of trips & trips/inhab) - growth (%)

	2002		2007		2012		<i>E-Average annual growth 2002/2007</i>		<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>	
	Trips (million)	Trips per inhab.	Trips (million)	Trips per inhab.	Trips (million)	Trips per inhab.	Trips (million)	Trips per inhab.	Trips (million)	Trips per inhab.
							<i>Economic Growth</i>		<i>Economic Crisis</i>	
Madrid	1,514.5	279.3	1,679.0	276.1	1,479.9	227.7	2.2%	-0.1%	-2.5%	-3.7%
Barcelona	800.1	178.5	934.7	192.4	899.9	178.1	3.2%	1.5%	-0.7%	-1.5%
Valencia	175.7	109.6	208.2	119.7	179.9	99.7	3.5%	1.9%	-2.9%	-3.6%
Seville	105.9	94.5	106.7	85.6	111.6	75.6	0.2%	-1.9%	0.9%	-2.4%
Malaga	52.2	72.3	69.5	73.6	67.8	66.4	6.7%	1.5%	-0.5%	-2.0%
Cadiz Bay	8.2	13.4	8.0	12.1	8.2	10.5	-0.5%	-1.9%	0.5%	-2.7%
Alicante	30.6	77.8	32.9	75.0	26.1	56.2	1.5%	-0.7%	-4.5%	-5.6%
Pamplona	34.9	118.3	38.5	124.3	34.7	103.1	2.0%	1.0%	-2.0%	-3.6%
GLOBAL AVERAGE							2.3%	0.2%	-1.5%	-3.1%

For the second period of analysis, data availability enables a separated analysis of urban and metropolitan modes demand (Table 9). The picture is very different from what could be expected: almost all MA present a more important reduction of the metropolitan modes demand than in urban ones, while it is clear that population in metropolitan rings has increased faster than in the central cities. It may also be noted that urban trips are more numerous than metropolitan trips, with the exception of Malaga. Nevertheless it should be considered the fact that urban modes are usually used by all the MA inhabitants while metropolitan modes use is more associated to the inhabitants in the metropolitan rings (MR).

Although it is clear that economic circumstances affect passenger transport demand, different approaches have been attempted at identifying other significant influencing factors. There seems to be a common approach on other two main drivers for PT demand: socio-spatial structure and PT offer (de Jong and van de Riet; 2008; Taylor et al.; 2009). A socio-spatial overview of the MA and CC parts of the city has already been done, as well as the economic aggregated circumstances have been analysed. In the following section, some indicators related to PT offer in the AM and CC are presented in order to measure accessibility, this will also enable to analyse possible effects of supply evolution on PT demand decline.

Table 9. Public Transport demand (millions of trips) - growth (%)

	2007		2012		<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>	
	Urban	Metropolitan	Urban	Metropolitan	Urban	Metropolitan
Madrid	1,200	479	1,069	411	-2.3%	-3.0%
Barcelona	710	224	689	211	-0.6%	-1.2%
Valencia	169	39	151	29	-2.2%	-5.8%
Seville	86	21	92	20	1.4%	-0.8%
Malaga	49	20	50	18	0.2%	-2.0%
Cadiz Bay	-	8	-	8	-	0.5%
Alicante	20	12	16	11	-5.0%	-3.7%
Pamplona	39	-	35	-	-2.0%	-
GLOBAL AVERAGE					-1.5%	-2.3%

5 Accessibility indicators for measuring quality and efficiency

Based on the previous analysis two accessibility indicators have been designed to characterize the impacts on the PT system – supply and demand – associated to socioeconomic changes and trends.

The first one is related to **PT quality**, because it serves to analyse how the PT supply is changing when demographic and economic changes occur. The second indicator is nominated as **PT efficiency** because it constitutes an indicator to measure the supply use to serve the real demand, which is dependent of the funding sources and the population changes due to urban sprawl.

5.1 Accessibility to Public Transport (PT quality)

This accessibility measure is defined by the density of PT offer per service area. Its values for the selected cities are presented in Table 10 for MA, and Table 11 for CC. The first clear finding is that PT accessibility levels in CC are much higher than in the MA. As has been enhanced in most revised documentation, it is more difficult and less economically viable to provide quality PT transport services to segregated areas (EU, 2011; EEA, 2006). This fact may play a part in the observed higher car modal shares in the metropolitan rings (Monzon et al, 2013). Secondly, the bigger MA use to present higher accessibility levels, for both MA and CC, with the exception of Pamplona, being the most accessible Barcelona for MA and CC (Madrid has a wider offer but also a larger service area). Thirdly, and against forecasts, the accessibility has globally improved over these years of economic recession, and PT demand decline, factors which could have been a threat for PT services provision and offer (EU, 2013; Preston and Raje, 2007), although if we analyse particular evolution in the years 2011-2012, in many cases accessibility has decreased. Besides, CC accessibility growth rates (3.0% annual growth on average) are higher than those in MA, this is not concordant with the population growth, and this may have also influenced the demand evolution shown in Table 9.

Table 10. Public Transport accessibility. Offer density per surface in the **metropolitan areas** (seats-km/km² MA surface) - growth (%)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	E-Average annual growth 2007/2012
Madrid	7.64	8.01	8.32	8.25	8.41	8.07	1.1%
Barcelona	10.66	11.42	11.35	12.01	12.33	11.82	2.2%
Valencia	6.22	6.14	6.03	5.99	5.95	5.66	-1.9%
Seville	1.54	1.47	0.82 ¹	0.77	0.85	0.87	-8.6% ¹
Malaga	1.42	1.51	1.46	1.34	1.42	1.42	0.3%
Cadiz Bay	0.18	0.15	0.17	0.17	0.17	0.18	0.4%
Alicante	2.49	2.63	2.78 ²	2.78 ²	2.94 ²	3.11 ²	4.6%
GLOBAL AVERAGE							1.1% ³

(1) From 2008 to 2009, Seville MA increases the extension of its surface, and although in 2009 metro services were inaugurated, and the seats-km offered increased, the indicator is penalised by a wider service area.

(2) High increase in provision of urban tramway services in Alicante

(3) In the global average Seville value is not included.

Pamplona did not provide information on metropolitan trips

Table 11. Public Transport accessibility. Offer density of urban modes per surface in the **central cities** (seats-km/ km² CC surface) - growth (%)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	E-Average annual growth 2007/2012
Madrid	67.33	71.72	73.99	73.57	75.75	71.97	1.4%
Barcelona	200.65	211.53	213.44	233.09	239.68	225.39	2.5%
Valencia	45.97	45.68	45.96	45.84	45.85	42.80	-1.4%
Seville	10.40	11.23	14.49 ¹	12.69	13.85	14.13	7.1%
Malaga	2.44	2.69	2.85	2.56	2.74	2.68	2.1%
Alicante	2.55	2.84	3.13	3.12	3.40	3.68	7.7%
Pamplona	36.36 ²	37.40 ²	37.00 ²	35.72 ²	36.36 ²	37.40 ²	1.4%
GLOBAL AVERAGE							3,0%

(1) In 2009 new metro services were inaugurated in Seville

(2) Increases in urban tramway services in Alicante had higher impact on CC than in MA

Cadiz Bay did not include urban trips information

5.2 Use of PT resources (PT Efficiency)

The PT efficiency indicator is a measure of the resources (seats-km offered) to get one unit of demand (trip made). The corresponding results are presented in Table 12 for all modes operating in the whole MA (metropolitan and urban trips). Table 13, on its turn, presents the PT efficiency for urban mobility. In that way the results are comparable with the PT quality indicator (Tables 10 and 11).

As expected the efficiency in CC is higher than in MA. This is consistent with the shorter distances of urban trips (less seats-km are needed for one demand unit). Secondly, it should be clarified that these efficiency indicators penalise metro and in general rail modes, as they are massive modes and provide a high quantity of seats-km per vehicle-km. This is the reason why big metropolitan areas with a dense rail modes offer such as Madrid, Barcelona or Valencia, have lower efficiency ratios. Therefore, it would not be accurate to make comparisons between different MA or CC based on this indicator: the elaborated efficiency indicators are used here to analyse the evolution of efficiency in each case, and comparisons should be made among consecutive years for each case. The cross-site analysis should take into account the different mix of transport modes in each city, with very different carrying capacity.

Table 12. Public Transport Efficiency in MA. (n° trips/ seats-km offered) - growth (%)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>
Madrid	0.0274	0.0255	0.0234	0.0231	0.0229	0.0228	-3.5%
Barcelona	0.0271	0.0253	0.0249	0.0237	0.0233	0.0235	-2.8%
Valencia	0.0236	0.0234	0.0223	0.0222	0.0220	0.0224	-1.0%
Seville	0.0374	0.0375	0.0324 ¹	0.0347	0.0314	0.0306	-3.7%
Malaga	0.0390	0.0359	0.0319	0.0354	0.0345	0.0333	-2.8%
Cadiz Bay	0.0183	0.0175	0.0156	0.0149	0.0153	0.0147	-4.1%
Alicante	0.0372	0.0348	0.0329 ²	0.0298 ²	0.0266 ²	0.0237 ²	-8.6%
GLOBAL AVERAGE							-3.8%

(1) In 2009 metro services are inaugurated in Seville.

(2) Decreases in efficiency indicators of Alicante are partly due to high increases in provision of urban tramway services.

Pamplona does not provide metropolitan modes information

Table 13. Public Transport efficiency in urban trips-CC. (n° trips/ seats-km offered) - growth (%)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	<i>E-Average annual growth 2007/2012</i>
Madrid	0.0294	0.0271	0.0254	0.0251	0.0246	0.0245	-3.5%
Barcelona	0.0347	0.0329	0.0320	0.0298	0.0294	0.0300	-2.8%
Valencia	0.0268	0.0266	0.0251	0.0251	0.0247	0.0257	-0.8%
Seville	0.0586	0.0563	0.0461 ¹	0.0531	0.0479	0.0462	-4.0%
Malaga	0.0510	0.0464	0.0436	0.0497	0.0473	0.0469	-1.3%
Alicante	0.0392	0.0352	0.0292 ²	0.0285 ²	0.0245 ²	0.0210 ²	-11.6%
Pamplona	0.0460	0.0428	0.0406	0.0391	0.0395	0.0389	-3.3%
GLOBAL AVERAGE							-3.9%

(1) In 2009 a new metro service were inaugurated in Seville

(2) Increases in urban tramway services in Alicante had higher impact on efficiency rates on CC than in MA
Cadiz Bay did not include urban trips information

The overall results is that during the period of economic crisis PT efficiency has decreased in all cities, both for CC and MA, at similar rates (-3.9% and -3.8% annual growth on average). The decline in PT demand -in parallel with the evolution of economic activity- and the generalised improvement of the accessibility (PT quality), have resulted in a less efficient use of resources: more seats-km are needed to provide each trip. From a global perspective, the demand decline seems to be more related to economic framework than to services quality deterioration.

But it is likely, that worse accessibility levels or a decrease in PT supply levels would have led to even higher demand reductions (Hine and Grieco, 2003; Preston and Raje, 2007). On the contrary, and thanks to the APT efforts to maintain the demand, by raising or maintaining the levels of

service, and in spite of public resources constraints usually linked to crisis periods, accessibility PT levels have improved since 2007.

6 Final analysis and Conclusions

The final analysis could be made by comparing the growth and trends of the explanatory indicators in contrast with the results of the two accessibility indicators, for each city. The results are shown in Table 14. Clearly the results show a deterioration of the *Explanatory Indicators* during the period of economic crisis. The population has grown but at less pace than in the previous years. However the suburbs have absorbed most population movements. Consequently, the population has spread during these years. At the same time economic indicators (GDP and employment) have suffer a lot because the crisis, being negative for all the cities.

The combined effect of the population sprawl (EEA, 2006) and the crisis (**Preston and Raje, 2007; Taylor et al., 2009**) has produced a clear drop of PT trips in most of the cities, except the case of Seville. This exception is explained by the inauguration of new metro lines during the crisis period which have changed the mobility patters in Seville, improving PT trip time and reliability.

This effect on demand does not seem to be attributed to a lower quality offer, because in the analysed period, PT quality has grown, in an attempt to maintain the demand, by raising or maintaining the levels of service, and in spite of financing constraints that are usually faced in times of recession.

Table 14. E-Evolution of Explanatory and PT Accessibility Indicators.
 Average annual growths (2007-2012) (%).

	Explanatory Indicators						Accessibility Indicators			
	Population growth		Population density	GDP	Employment	PT demand	PT quality		PT efficiency	
	MA	CC					MA	CC	MA	CC
Madrid	1.3	0.6	-0.7	-0.7	-2.5	-2.5	1.1	1.4	-3.5	-3.5
Barcelona	0.8	0.3	-0.5	-1.2	-3.1	-0.7	2.2	2.5	-2.8	-2.8
Valencia	0.7	0.0	-0.7	-1.7	-4.3	-2.9	-1.9	-1.4	-1.0	-0.8
Seville	3.5	0.1	-3.2	-2.3	-3.5	0.9	-8.6 ¹	7.1 ¹	-3.7 ²	-4.0 ²
Malaga	1.6	0.2	-1.3	-2.0	-5.0	-0.5	0.4	2.1	-2.8	-1.3
Cadiz Bay	3.5	-0.3	-3.8	-3.3	-3.9	0.5	0.4	-	-4.1	-
Alicante	1.1	0.7	-0.4	-3.2	-3.9	-4.5	4.6 ¹	7.7 ¹	-8.6 ²	-11.6 ²
Pamplona	1.7	0.3	-1.4	1.3	-2.8	2.0	-	1.4	-	-3.3

(1) A further explanation of these extreme values is presented in Tables 10 and 11

(2) A further explanation of these extreme values is presented in Tables 12 and 13

The final conclusion is that negative synergies have been produced by the combination of urban sprawl and economic crisis. The combined effect of those factors has resulted in less PT efficiency. All values for this accessibility indicator are clearly negative.

Results indicate that in time of economic problems we need more than ever a clear land-use and transport strategy to achieve more sustainable mobility patterns. Generally, analysed cities did not correct policies during the period of economic growth; they did not settle the basis for more sustainable urban developments. Instead of fostering concentration of activities, they have allowed urban sprawl with higher PT costs and car dependency, and have not invested in new or better PT systems to correct this trend. As a consequence, when the problems came they had to face severe problems to cover the costs of PT supply to maintain its level of quality. That produced a further increasing of costs by reducing the PT efficiency: more costs with fewer passengers in a context of low investment capacity.

The overall conclusion could be: look for environmental improvements of the transport system by investing in PT quality and controlling urban sprawl when you have money. Then, if an economic crisis has to be faced, the achieved sustainable transport system will help you to keep economic sustainability in your transport budget.

7 References

- Aparicio, A. (2004) Informe 2002-Observatorio de la Movilidad Metropolitana. *Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Fomento, Madrid*. (accessed July 2014) http://www.observatoriomovilidad.es/images/stories/05_informes/Informe_OMM2002.pdf
- De Jong, G. C., & van de Riet, O. (2008). The Driving Factors of Passenger Transport. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 8 (3), 227-250.
- Directorate-General for Economic and Financial Affairs of the European Commission. (2009). Economic Crisis in Europe: Causes, Consequences and Responses. *Brussels: European Communities*.
- European Commission, (1996). European Sustainable Cities. EU Expert Group on the Urban Environment. *Directorate General XI Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Brussels*.
- European Commission (2007). Green Paper-Towards a new culture for urban mobility/COM/2007/551 final/Brussels.
- European Commission (2011)a. White Paper- Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system /COM/2011/0144 final/, Brussels.
- European Commission (2011)b Green Paper-Restructuring and anticipation of change: what lessons from recent experience? COM/2012/7 final/ Brussels.
- European Environment Agency (2006). Urban Sprawl in Europe. The ignored Challenge. *Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities*.
- European Union (2011). Cities of Tomorrow. Doi: 10.2776/41803
- European Union (2013). Cities of Tomorrow – Action Today. URBACT II Capitalisation. More jobs: better cities- a framework for city action on jobs. Saint-Denis.
- Fielding, G.J., Glauthier R.E., Lave, C.A. (1978) Performance indicators for transit management. *Transportation* 7, pp. 365–379
- Haghshenas, H., Vaziri, M., (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecol.Ind.* 15, 115-121.
- Hillman, M. Henderson, I., Whalley, A., (1973). Transport realities and Planning Policy, *PEP, London*.
- Hine, J., Grieco, M. (2003). Scatters and clusters in time and space: implications for delivering integrated and inclusive transport. *Transp. Policy* 10, 299-306.
- Karlaftis, M.G., Tsamboulas, D., (2012) Efficiency measurement in public transport: Are findings specification sensitive? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, 392-402.
- Monzon, A., Cascajo, R., Alonso, A., García, A., Tadeo, A. (2014). Informe 2012-Observatorio de La Movilidad Metropolitana. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. (accessed July 2014) http://www.observatoriomovilidad.es/images/stories/05_informes/Informe_OMM_2012.pdf
- Newman, P., Kenworthy, J.(1999). Sustainability and Cities. Overcoming Automobile Dependence. Island Press, Washington.
- MMO, 2014. Metropolitan Mobility Observatory. (accessed July 2014) <http://www.observatoriomovilidad.es/>
- OECD (2001). Policy instruments for Achieving Environmentally Sustainable Transport. Paris.
- Preston, J., Raje, F., (2007). Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *J. Transp. Geography* vol 15, 151-160
- Saisana, M., Tarantola, S., 2002. State-of-the-Art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development, *EUR 20408 EN, European Commission-Joint Research Centre, Italy*.
- Tanguay, G.A., Rajaonson, J., Lefebvre, J., Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. *Ecol. Ind.* 10, 407-418.
- Taylor, B. D., Miller, D., Iseki, H., & Fink, C. (2009). Nature and/or nurture? Analyzing the determinants of transit ridership across US urbanized areas. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 43 (1), 60
- TERM, (2000) Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environment Integration in the EU. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/ENV/ISSUENo12>, (accessed July 2014)
- Theodoridou, I., Papadopoulos, A.M., Hegger, M., (2012). A feasibility evaluation tool for sustainable cities – A case study for Greece. *Energy Policy* 44, 207-216.
- United Nations (1972). Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment. (accessed July 2014) <http://www.unep.org/Documents/Multilingual/Default.asp?documentid=97&articleid=1503>
- United Nations (1992). Agenda 21. *United Nations Conference on Environment & Development. Rio de Janeiro. Brazil.* 3-4 June 1992.



ANEXO II – Artículos

Transport and Telecommunication, 2014, volume 15, no. 2, 130–143
Transport and Telecommunication Institute, Lomonosova 1, Riga, LV-1019, Latvia
DOI 10.2478/ttj-2014-0012

HOMOGENIZATION EFFECTS OF VARIABLE SPEED LIMITS

Alvaro Garcia-Castro, Andres Monzon

*Transportation Research Centre (TRANSyT) Universidad Politecnica de Madrid.
Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Avda. Profesor Aranguren s/n. Madrid. Spain
Phone: +34 91 336 52 34. Fax: +34 91 336 53 62. E-mail: alvaro.garcia.castro@upm.es*

Changing factors (mainly traffic intensity and weather conditions) affecting road conditions require a suitable optimal speed at any time. To solve this problem, variable speed limit systems (VSL) – as opposed to fixed limits – have been developed in recent decades. This term has included a number of speed management systems, most notably dynamic speed limits (DSL).

In order to avoid the indiscriminate use of both terms in the literature, this paper proposes a simple classification and offers a review of some experiences, how their effects are evaluated and their results

This study also presents a key indicator which measures the speed homogeneity and a methodology to obtain the data based on floating cars and GPS technology applying it to a case study on a section of the M30 urban motorway in Madrid (Spain). It also presents the relation between this indicator and road performance and emissions values.

Keywords: Effectiveness indicator, variable speed limits, dynamic speed limits, GPS application, speed management, floating car data

1. Introduction

The main tool used by authorities to manage speed is the setting of speed limits, which tend to be fixed. However, the optimal speed cannot remain constant at all times, as the road conditions are affected by numerous factors, mainly traffic intensity and weather conditions (Giles, 2004).

Speed can be regarded as a key factor that directly affects certain aspects of the road such as traffic performance, road safety and environmental externalities.

1) Traffic performance

Together with intensity and density, speed is one of the key factors determining road capacity. At a critical speed and the corresponding critical intensity or density, the state of flow will change from stable to unstable and, speed differences and braking process can therefore lead to congestion and reduced road capacity (Van Nes & etc., 2008).

2) Road safety

It is generally accepted that high speeds involve a high risk to road safety. This idea is supported by a large number of studies which highlight the relationship between speed and road safety. For instance, ref. (Elvik, 2005) shows an extensive review of 98 studies containing 460 estimates of the relationship between changes in speed and changes in the number of accidents or accident victims, concluding “the relationship between speed and road safety is causal, not just statistical”.

3) Environmental externalities

Apart from vehicle technologies, speed is a very important factor determining negative environmental effects such as CO₂ emissions, pollutants (Ntziachristos & Samaras, 2000) and noise (Makarewicz & Gałuszka, 2011).

The concern of traffic authorities to adapt traffic speed to changing road conditions has led in recent decades to the development of variable speed limits (VSL).

2. Variable Speed Limits. Classification

VSL is a broad term that includes many speed management systems with different motivations and control algorithms. VSL can be defined simply as speed limit management systems, which are time dependant. Some authors confine the term VSL to systems which utilize traffic detectors to determine the appropriate speed (Sisiopiku, 2011); however, this fails to take into account the existence of VSL, which operate following prefixed calendars or timetables based on historical data. It is thus necessary to classify VSL as follows:

2.1. Scheduled Variable Speed Limits (SVSL)

These are VSL which depend on a pre-established calendar or timetable. Among these, the following types can be identified:

Seasonal Variable Speed Limits

These are applied to a specific type of road and set the speed limit during a particular season, with the most common being the winter/summer speed limits.

An example can be found in the Nordic countries due to their extreme weather conditions during the winter months. In Finland the reason for lowering winter speed limits is primarily the adverse road and driving conditions (Peltola, 2000).

Experiments involving the setting of seasonal speed limits for safety reasons can be also found in the northern states of the U.S.A. For instance, the Wyoming Department of Transport first implemented the seasonal speed limit for six months beginning on October 15, 2008 (Wyoming Department of Transport, 2012).

In the Austrian region of Tyrol during the winter of 2006/2007, the speed limit was temporarily reduced on the Inn Valley Motorway from 130 km/h to 100 km/h, mainly due to high levels of air pollution during previous winter seasons (Land Tirol, 2012).

Hourly Variable Speed Limits

These are mainly applied to prevent or reduce certain negative externalities in a specific road section or street at particular times.

Experiments of this type can be found in some German or American cities where authorities have implemented VSL in school areas in order to reduce speed when schools are open or at exactly the times children are arriving or leaving (Lehming, 2008), (Transport and Main Roads, 2011).

There are also experiments related to noise reduction during night hours in residential areas or close to hospitals and other facilities. In the city of Berlin (Lehming, 2008), speed is limited during the night hours to 30 km/h in residential or mixed areas.

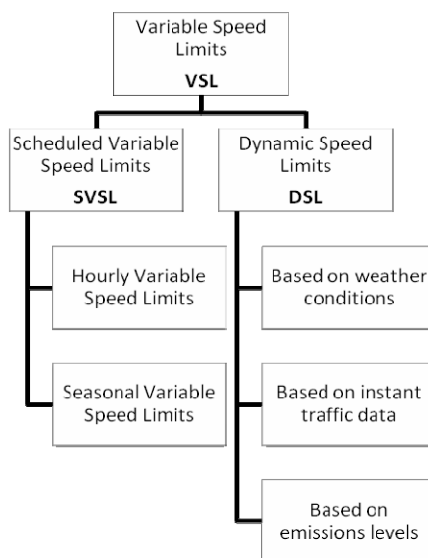


Figure. 1. Proposed classification of Variable Speed Limits

2.2. Dynamic Speed Limits (DSL)

The term “dynamic” implies a force which produces a change in state or movement. In this case, the “forces” that produce changes in speed limits are the conditions in and around the road. Therefore, Dynamic Speed Limits can be defined as a type of Intelligent Transport System (ITS) which produces changes in speed limits in response to accurate information regarding road, driving, weather and/or environmental conditions (Van Nes & etc., 2008).

In practice, the system consists of dynamic message signs (DMS) deployed along a roadway and connected via a communication system to a traffic management centre (Allaby & etc., 2007). After data processing and speed limit calculation, the new speed limit information is displayed on these DMS.

Pure manual control methods are based simply on a protocol that the operators activate when one or more levels (traffic intensity, visibility, air pollution, etc.) exceed the pre-set thresholds.

The concept of automatic DSL is based on various approaches, ranging from basic protocols according to particular thresholds (similar to manual methods) to complex algorithms based on multi-objective optimization, game theory, predictive control and genetic algorithms (Hegyí & etc., 2005; Xu & etc., 2006; Ghods & etc., 2010; Xiao-Yun & etc., 2010).

3. Evaluation of Variable Speed Limits

DSL are being implemented worldwide; however their effects are not yet clearly defined, and in some cases their benefit is not fully proven.

Based on international experiments and research studies, we summarize the way in which DSL affect the parameters of traffic performance, road safety and environmental levels, and the variables that are used to assess their effectiveness.

3.1. Traffic Performance

With regard to traffic performance and traffic flow behaviour, there are several parameters which may be affected by the implementation of DSL, including particularly speed and capacity.

The reduction in average speed and speed variations depends largely on the type of speed limits imposed (mandatory or recommended) and their enforcement. Most DSL operate as mandatory limits, such as the M25 controlled motorway around London (Highways Agency, 2004), although there are also some systems with recommended speed limits, such as the Motorway Control System (MCS) on the E4 in Stockholm (Nissan & Bang, 2006).

These systems are based on the capacity increase that occurs when speed and speed variations are reduced by high flow levels. Moreover, speed homogenization reduces the number of acceleration and deceleration manoeuvres and therefore the oscillations in traffic flow (García, 2009). Ref. (Heydecker & Addison, 2011) shows that under certain congestion conditions, speed determines density; based on this observation, the relationship between density and speed can be estimated depending on speed limits.

The reduction of speed limits has a considerable effect on the speed differential between lanes. In (Van Nes & etc., 2008), the conclusions show that it can be said that dynamic speed limit systems do increase the homogeneity of the driving speed.

Based on computer simulators, some authors evaluate positively the effects of DSL on traffic performance. Reference (Zhicai & etc., 2004) shows the simulation of a number of types of DSL scenarios, and the results indicate that the benefits of DSL are obvious when the traffic volume is equal to or greater than 2,800 veh. in a double-lane freeway. Ref. (Hegyí & etc., 2005) simulates the effects of DSL on the prevention of congestion caused by shockwaves, obtaining a reduction in total travel time of 21.7%.

Germany has a long tradition of implementing VSL, and in particular DSL. The first experiment was implemented in 1965 on the A8 motorway between Munich and Salzburg, with good results in terms of harmonization and reduction of speed differences between lanes. These results and many others from German motorways can be found in (Schick, 2003). Among these cases, we can highlight the report on the A5 motorway in Frankfurt. Based on data from video recording and induction loops, the authors found a significant increase in the empirical maximum traffic intensity in the southbound direction from 5,200 veh/h. to 5,900 veh/h. (about a 10% increase). However other studies in the Netherlands (Hoogendoorn, 1999) estimate the capacity increase at around 2%.

The M25 in the U.K. can also be highlighted as a successful implementation of DSL. During the first year of operation, a section of this controlled motorway absorbed a 1.5% increase in throughput over 5-hour peak periods, without any detectable increase in congestion levels. Traffic conditions have improved as a result of the reduction in frequency and severity of shockwaves. The study (Highways Agency, 2004) revealed a reduction of over 25% in the typical number of shockwaves during the morning peak period. It has also been observed that the traffic is now more evenly spread across all four lanes.

Reference (Nissan & Bang, 2006) studied the application of DSL on the E4 motorway through Stockholm, revealing that lane changes were reduced by over 50%, and that lane distribution became more balanced after the implementation. However, this phenomenon can have negative effects in sections with a high density of on-ramps, as this will lead to smaller gaps in the traffic on the outside lane, making the merging process more difficult and therefore creating congestion on the on-ramp (Knoop & etc., 2010).

Experiments were conducted on the ASF (Autoroute du Sud de France) in France in the summer of 2004, with the implementation of an innovative traffic control system on the A7 motorway, which includes

DSL. In the southbound corridor, the use of progressively slower speed limits depending on traffic volume has reduced congestion by between 16% and 40%, depending on the section (ECMT, 2007).

3.2. Road Safety

The effects mentioned in the previous section can also have a positive impact on road safety, as decreases in the speed limits can lead to a reduction in the speed differences between successive vehicles, resulting in a decline in rear-end collisions.

Reference (Lee & etc., 2007) presents a simulation-based study showing the potential safety benefits of DSL using a real-time crash prediction model integrated with a microscopic traffic simulation model. The study found that dynamic speed limits can reduce average total crash potential by approximately 25%, by temporarily reducing speed limits during hazardous traffic conditions. Positive effects of DSL have also been found in other simulation-based studies, such as (Piao & McDonald, 2008).

Regarding the study of the DSL implemented, an analysis of crash data in Germany has shown that the use of dynamic speed limit and speed warning signs reduced the crash rate by 20 to 30% (Robinson, 2000). Other German studies cited by (Schick, 2003) estimate a reduction in the number of accidents of over 30% (A5 motorway, near Frankfurt), and a similar decline in fatalities by more than 60%. In Stuttgart, the reduction in accidents caused by fog conditions is as high as 86%.

In the UK (Highways Agency, 2004) data are analysed from the M25 in order to compare them with the trends. The impact of introducing the controlled motorway driving environment (mainly DSL and managed lanes) has been an estimated reduction in injury accidents of 10% during the period of operation, and a decrease in the ratio of damage of 20%.

The aforementioned programme in the South of France also had very positive road safety results, with crashes reduced by 10–20% (ECMT, 2007).

Table 1. Summary of evaluation variables used in different research studies

Ref.	Case study	Variable	Effects
<i>Traffic Performance</i>			
(Makarewicz & Gafuszka, 2011)	Simulation of 12 rural roads	Standard deviation of the average speed	Depending on scenarios
(Zhicai & etc., 2004)	Simulation	Traffic volume, travel time, queue length, number of stops	Variable
(Hegyí & etc., 2005)	Simulation	Total travel time	21% reduction
(Hoffmann-Leichter, 1997)	A5 Motorway, Germany	Intensity	10% increase
(Hoogendoorn, 1999)	Simulation	Capacity	2% increase
(Highways Agency, 2004)	M25, U.K.	Throughput	1.5% increase
(Nissan & Bang, 2006)	E4 Stockholm	Lane changes	50% reduction
(ECMT, 2007)	A7 France	Congestion	16-40% reduction
<i>Road Safety</i>			
(Lee & etc., 2007)	Simulation	Total crash potential	25% reduction
(Piao & McDonald, 2008)	Simulation M6, U.K.	Time-to-collision Headway	Depending on scenarios
(Robinson, 2000)	German motorways	Crash rate	20% reduction
(Highways Agency, 2004)	M25, U.K.	Damage ratio	20% reduction
(ECMT, 2007)	A7 France	Crash number	10-20% reduction
<i>Emissions</i>			
(Zegeye & etc., 2010)	Simulation	Total emissions	35% reduction
(Highways Agency, 2004)	M25, U.K.	Emissions levels	Between 2-8% reduction
(Highways Agency, 2004)	M25, U.K.	Noise levels	0.7-2.3 dB reduction
(Land Tirol, 2012)	A12, Austria	NO ₂ levels	3.6% reduction

3.3. Environmental effects

It is well-known that improved traffic flows can have a significant impact on emission levels (Benedekand & Rilett, 1998). There are very few approaches based on simulating emissions in DSL. Of particular note is the simulation of a case study based on model predictive control, where the total emissions are reduced by over 35% (Zegeye & etc., 2010).

Returning to the case of the M25 motorway in the U.K., in (Highways Agency, 2004) it was found that vehicle emissions have dropped as a result of reducing start-stop driving. Depending on the particular emissions measured, the decrease is between 2% and 8%. Fuel consumption has also been reduced. In parallel, there has been a favourable impact on noise as a result of the introduction of DSL systems

between Junction 15 and 16. The reduction in stop-start driving and the improved compliance with the speed limits have reduced the weekday traffic noise adjacent to the motorway by around 0.7 decibels, with reductions at some points of up to 2.3 dB.

Another example can be found in Inn Valley in Austria. The effects of the implementation of DSL were analysed on this motorway after one year of operation (November 2007 to November 2008). In a before/after evaluation the results show that NO₂ emissions were reduced by 3.6%. Also, the NO₂ limit value for short-term exposure (half-hour limit: 200 g/m³) was exceeded only twice during the first year of operation, while without the DSL in operation, it is estimated that it would have been exceeded nine times (Land Tirol, 2012).

4. Methodology to Evaluate VSL Systems Using an Aggregate Effectiveness Indicator

4.1. Effectiveness indicator. Definition

Table 1 shows the large number of variables which are used in the scientific literature and other public reports to evaluate the effects of DSL. This fact highlights the need to find a single variable which makes possible to evaluate the system’s effectiveness easily and concisely by aggregating the potential effects on traffic performance, road safety and emissions.

With regard to traffic performance, several of the aforementioned studies point out that the homogenization of speed (i.e., lower acceleration rates) contributes to a smooth traffic flow (García, 2009), an increase in capacity (Heydecker & Addison, 2011) and the attenuation of shockwaves (Hegyi & etc., 2005).

Likewise, road safety has been proven to be related with traffic and speed homogeneity (Van Nes & etc., 2008), (Piao & McDonald, 2008), (Fildes & Lee, 1993), (Wegman & etc., 2008). It can therefore be concluded that there is a clear relation between speed variations and number of accidents.

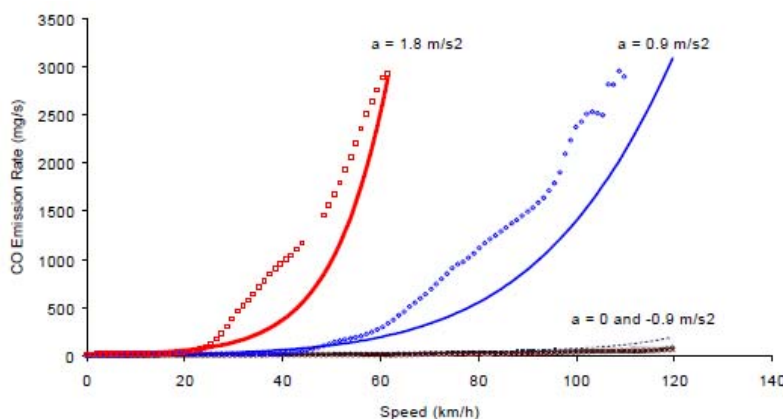


Figure 2. Regression fit for CO emissions as a function of speed and acceleration rates. Source (Rakha & etc., 2000)

Many research studies (Rakha & etc., 2000; El-Shawarby & etc., 2005; Joumard & etc., 1995; Ding & Rakha, 2002) also state that, apart from mean or average speed, positive acceleration rates also have a major impact on emissions, as shown on Figure 2 from (Rakha & etc., 2000).

It has thus been possible to pinpoint instant acceleration as a key factor by evaluating the effectiveness of implementing DSL, and then proposing an aggregate indicator as follows:

Positive Accumulated Acceleration (PAA) is defined as the sum of the speed variations on a particular road section.

Mathematically, it is the cumulative integral of the positive acceleration law (1).

$$PAA = \int_0^t a^+(t) dt \cong \sum_0^t a_t^+ \cdot \Delta t = \sum_0^t \frac{\alpha \cdot (V_t - V_{t-1})}{\Delta t} \cdot \Delta t = \sum_0^t \alpha \cdot (V_t - V_{t-1}).$$

$$\text{If } (V_t - V_{t-1}) > 0 \quad \text{then } \alpha = 1 \quad (1)$$

$$\text{Otherwise} \quad \alpha = 0.$$

Graphically, PAA is the positive area of the region bounded by the acceleration law, as shown on Figure 3.

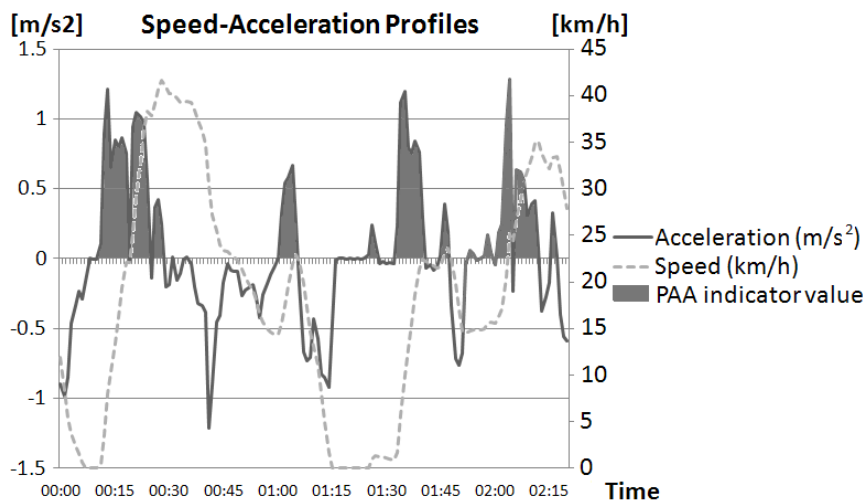


Figure 3. Graphic representation of PAA indicator from an acceleration function

The PAA indicator makes it possible to compare the same section before and after the implementation of DSL, thus evaluating its effectiveness.

4.2. Data collection and evaluation

As already mentioned, the PAA indicator is simply based on speed variations, and the data required to calculate it is relatively easy to obtain.

Speed data are often collected by induction loops located at certain points on the road, but this method makes it impossible to establish the speed evolution between two loops, and leads to the possibility of distorted results.

It is thus essential to obtain speed data at short time intervals, and the methodology proposed is therefore based on GPS technologies. With a small portable device it is very simple to collect and download speed data, position and so on every second, which allows a very accurate speed profile to be obtained along the road section analyzed.

The methodology is based on a before & after evaluation, by observing the evolution of the PAA indicator. Ideally, the number of trip repetitions should be fairly high in order to limit variations caused by other factors such as meteorology, extraordinary events, incidents, etc. In any case, the trips must be made in the same time slot and on days with similar behaviour in terms of traffic. In the event of a limited sample, particular care must be taken to ensure that the conditions are almost the same. The traffic intensity upstream must be guaranteed to be substantially the same when performing the before & after trips.

Once the valid data has been processed and selected, the implementation of DSL can be valued positively if the indicator PAA_a (activated) is lower than PAA_d (deactivated).

5. Pilot Test Case: West Section of Madrid M30 Motorway

5.1. Description

Madrid is a city of about 3.5 million inhabitants, and up to 6 million in its metropolitan area. The city is surrounded by three motorway ring-roads, with the M30 the closest to the city centre.

In the afternoon peak hours on a normal working day, the M30 has high traffic levels southbound on its east and west sections. In an attempt to avoid this habitual congestion and its externalities, the Madrid Traffic Department is testing a DSL system based on recommended speed limits.

The tested section is a three-lane motorway (southbound) with traffic intensity in the afternoon peak hours of around 3,300 veh/h. (upstream), and a length of 5.8 km. Most of the section is limited to 90 km/h, except the last 100 m., where the limit is 70 km/h. (tunnel entrance). The congestion is usually caused by the bottleneck situated at the M500 junction, as around 2,800 vehicles merge into the M30.

The DSL system consists of three Variable Message Signs (VMS) situated before the M500 junction. These VMS display a recommended speed limit of 40, 60 or 80 km/h, depending on the control algorithm. This is based on instant speed and traffic intensity data recorded by induction loops situated along the section.

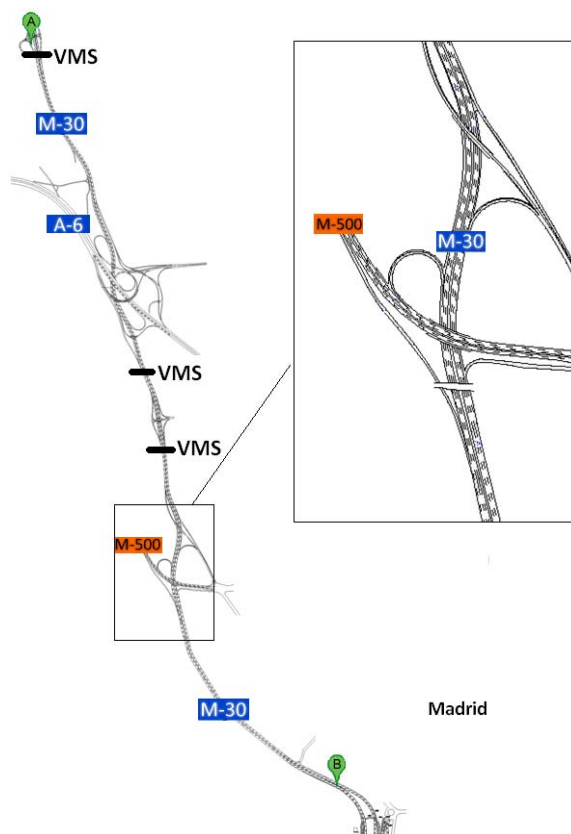


Figure 4. West Madrid motorway ring-road and the 5.8 km. test section (from A to B) with the location of the Variable Message Signs (VMS). The bottleneck junction where the congestion usually starts (M-500) is highlighted

A microscopic car study was undertaken in the afternoon peak traffic period between 18:00-20:00. A total of nine trips were made on the 6th and 7th June (Tuesday and Wednesday) with the DSL system activated. One week later (12th and 13th June) another nine trips were performed at exactly the same times, this time with the DSL system deactivated. The intensity levels upstream for the test days were very similar, with a maximum deviation of 2.63% from the mean value (Table 2). The weather was sunny and there were no particular incidents or accidents during the test trips, except for unusual congestion on 6 June, which caused the system not to be automatically activated.

Table 2. Traffic flow intensities upstream (Measuring point PM 22421)

Time	Date				Mean	Max. mean deviation
	05-June	06-June	12-June	13-June		
18:00	3159	3196	3114	3324	3198	-2.63%
19:00	3501	3544	3506	3440	3498	-1.65%

The mobile study was carried out using an instrumented vehicle (Skoda Fabia TDI) equipped with a GPS data recorder (747+ GPS Trip Recorder), which was subsequently downloaded as an Excel Sheet (.csv) and georeferenced (.kml) documents.

The data collected included travel distance (m), position and speed (m/s), recorded every second, enabling the PAA to be obtained as defined in the previous section.

Likewise, seven trips (Figure 5) in free flow (southbound mornings) were performed in order to study the variability of the PAA in similar conditions and to isolate the effects of DSL from any other which may influence the results (small disturbances and changes in driving style).

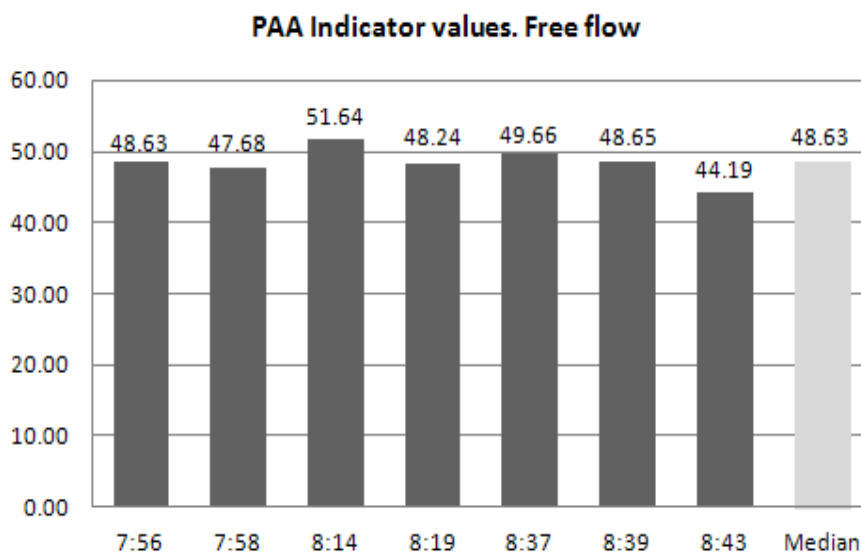


Figure 5. PAA indicator values in free flow. Obtained in the morning hours of the 5th and 6th June

From this analysis, it can be concluded that in free flow and in similar conditions, 99% (confidence level = 0.99, $\alpha = 0.01$) of the PAA results present a deviation from the median of less than 2.19 (confidence limits). Therefore any deviation greater than this value will be assigned to the effects of DSL.

5.1. Analysis of results

5.1.1. Effects on speed homogenization

Table 3 shows the resulting values of the PAAa and PAAd from the trips performed on the 5th and 12th June. The results on Wednesday 6 are considered invalid, as the system was automatically disconnected due to the unusual and extreme congestion (recorded speed under the operation thresholds).

Table 3. Values obtained for PAA Effectiveness indicator. Congested trips

Activated		Deactivated	
<i>Tuesday 5 and 12. Afternoon peak</i>			
Time	PAA values	Time	PAA values
18:30	91.68	18:29	92.04
18:52	88.20	18:52	88.89
19:11	72.23	19:10	90.99
19:32	59.62	19:32	105.88
19:51	63.54	19:55	69.36
<i>Average</i>	<i>75.05</i>	<i>Average</i>	<i>89.43</i>
<i>Wednesday 6 and 13. Afternoon peak</i>			
18:28	125.84	18:27	99.20
18:50	124.06	18:49	86.62
19:14	130.74	19:13	90.68
19:38	73.21	19:38	76.82
<i>Average</i>	113.46	<i>Average</i>	<i>88.33</i>

When the effects of DSL are isolated from any other effects, as described in the paragraphs above, the result shows that the PAAa falls by an average of 13.1%, compared to the PAAd.

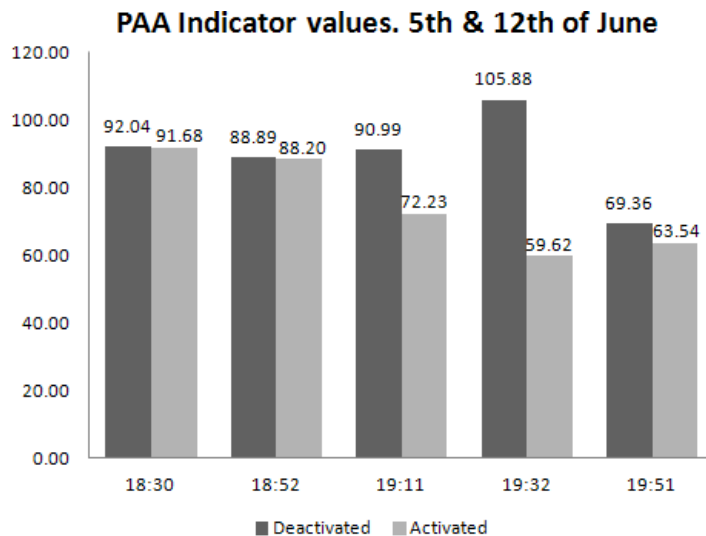


Figure 6. Comparison of the effectiveness indicator (PAA) on Tuesday 5th and 12th June

Figure 6 shows that PAAa and PAAd values are fairly similar, except for the trips that are highly affected by congestion. An analysis of the speed profiles on Figure 7 and the indicator values shows that in the 19:11 trip, the speed distribution is more homogeneous, although the congestion levels are similar. This fact causes the congestion on the following trip (19:32) to remain at similar levels (or even to decrease) while DSL is activated, and the queue length to increase while deactivated.

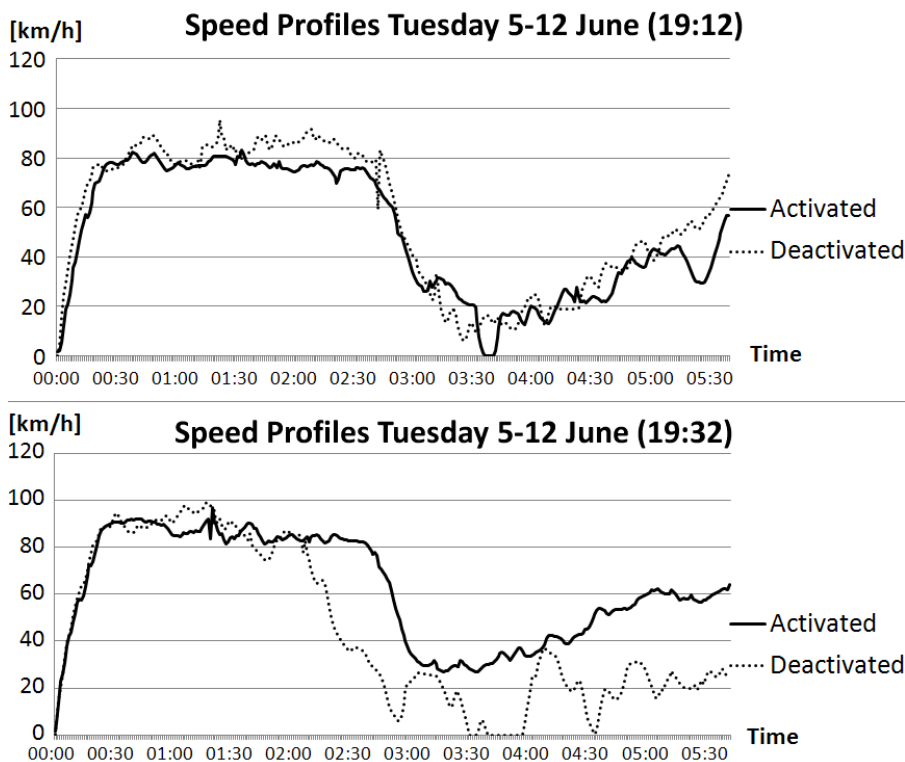


Figure 7. Comparison of speed profiles for trips with DSL activated and deactivated

5.1.2. Effects on traffic performance

As we have seen in the literature review, the effects of variable speed limits on traffic performance are site dependant, achieving most of the case studies positive results in terms of traffic throughput and travel times.

Table 4 shows the relation (in percentage) between traffic throughput downstream and upstream during the peak hours in the test days.

Table 4. Traffic throughput relation downstream/upstream the test section

Date	05-June	06-June	07-June	12-June	13-June	14-June	Mean
Activated	183%	181%	178%	-	-	-	181%
Deactivated	-	-	-	181%	177%	178%	179%

The results show a slight improvement of 2% in the relation between the traffic flow downstream and upstream during the test days.

Table 5 shows the travel times during peak hour trips on the 5th and 12th June. The results on Wednesday 6 are considered invalid, as the system was automatically disconnected due to the unusual and extreme congestion (recorded speed under the operation thresholds).

Table 5. Trip travel time per day (activated/deactivated)

Activated		Deactivated	
<i>Tuesday 5 and 12. Afternoon peak</i>			
Time	Travel time	Time	Travel time
18:30	7:59:00	18:29	6:59:00
18:52	7:28:00	18:52	6:15:00
19:11	6:35:00	19:10	6:10:00
19:32	5:36:00	19:32	7:24:00
19:51	4:45:00	19:55	4:46:00
Average	6:28:00	Average	6:18:00
<i>Wednesday 6 and 13. Afternoon peak</i>			
18:28	9:34:00	18:27	7:21:00
18:50	10:13:00	18:49	6:32:00
19:14	10:29:00	19:13	6:56:00
19:38	7:02:00	19:38	6:04:00
Average	9:19:00	Average	6:43:00

Rejecting the results of the 6th June and comparing similar trips of activated and deactivated days, the result shows a 3% increase in travel time with the system activated.

From the traffic performance point of view, the results are contradictory. Firstly, the application of variable speed limits produces in this case a slight improvement in the throughput relation between traffic flow downstream and upstream the controlled section. On the other hand, travel time suffers a small penalty, which is related with the more restrictive speed limits.

However, it is important to mention that although this travel time increase, PAA values decrease when the system is activated. This means that the system achieves more homogeneous speed profiles for the same travel times (Figure 8).

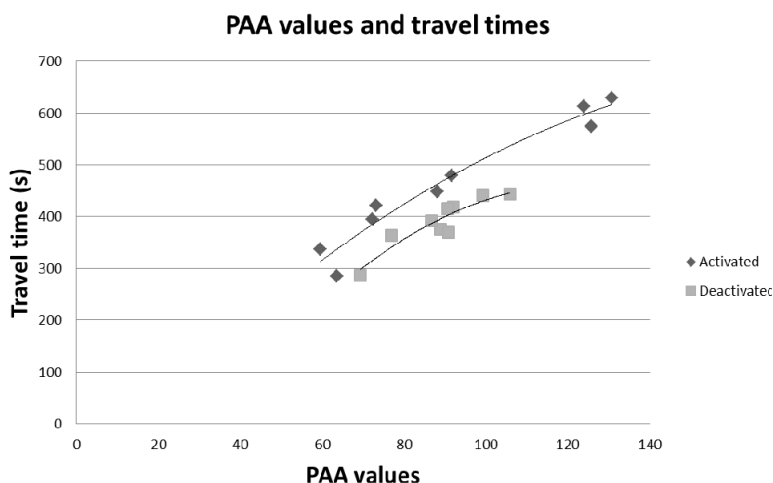


Figure 8. PAA values and travel times

5.1.3. Environmental effects

Together with road safety considerations, positive environmental effects are one of the main reasons for implementing variable speed limits systems in motorways. Most of the studies reviewed show positive results in case of emissions and fuel consumptions.

In the presented case study, reductions of PAA values, which mean more homogeneity in speed profiles, imply reductions in emissions and fuel consumption. This reduction can be quantified by introducing the speed profiles in micro emissions models, such as VERSIT+ (Smit & etc., 2007).

The output of the VERSIT+ model for the presented case study is summarized in Table 6.

Table 6. Trip travel time per day (activated/deactivated)

Activated				Deactivated			
<i>Tuesday 5 and 12. Afternoon peak</i>							
Time	CO ₂	NO _x	PM ₁₀	Time	CO ₂	NO _x	PM ₁₀
18:30	1021	1.880	0.2396	18:30	1040	1.994	0.2413
18:52	1037	1.985	0.2481	18:52	1058	2.103	0.2462
19:11	973.1	1.845	0.2173	19:11	1074	2.379	0.2387
19:32	961.6	1.845	0.2216	19:32	1102	2.226	0.2495
19:51	1014	2.209	0.2199	19:51	1034	2.303	0.2200
<i>Average</i>	<i>1001.3</i>	<i>1.952</i>	<i>0.2293</i>	<i>Average</i>	<i>1061.6</i>	<i>2.201</i>	<i>0.2391</i>
<i>Wednesday 6 and 13. Afternoon peak</i>							
Time	CO ₂	NO _x	PM ₁₀	Time	CO ₂	NO _x	PM ₁₀
18:28	1148	2.197	0.2704	18:27	1079	2.028	0.2523
18:50	1171	2.333	0.2819	18:49	1047	2.206	0.2426
19:14	1165	2.133	0.2703	19:13	1051	2.037	0.2431
19:38	1002	1.802	0.2442	19:38	1023	1.958	0.2380
<i>Average</i>	<i>1121.5</i>	<i>2.116</i>	<i>0.2667</i>	<i>Average</i>	<i>1050</i>	<i>2.057</i>	<i>0.2440</i>

As in previous analysis, rejecting the extreme results of the 6th June, the emissions savings are shown on Table 7.

Table 7. Emissions savings comparing the scenarios activated vs. deactivated.

Emissions	CO2	NOx	PM10
<i>Savings</i>	2.58%	4.14%	2.54%

Analysing the relation between Positive Accumulated Acceleration indicator and the emissions, both CO₂ and the pollutants show the same tendency. Despite this tendency is clear, NO_x is not clearly correlated with the indicator, obtaining a low value of R². Figure 9, 10 and 11 show the relation between PAA and CO₂, NO_x and PM₁₀ respectively.

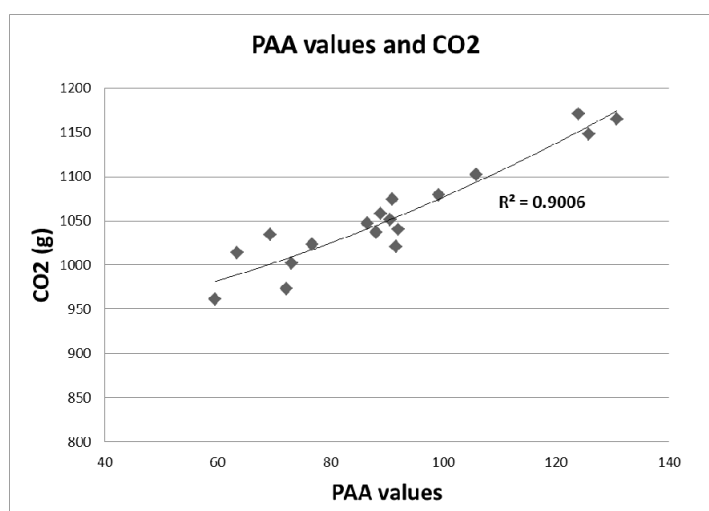


Figure 9. PAA values and CO₂ emissions

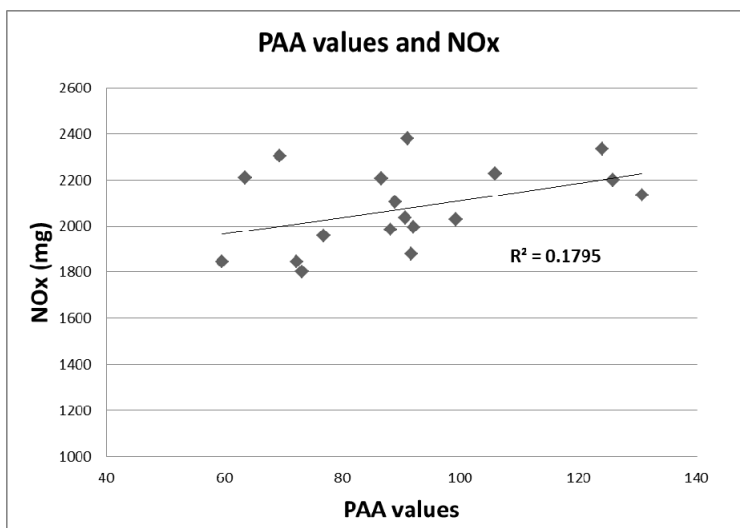


Figure 10. PAA values and NO_x emissions

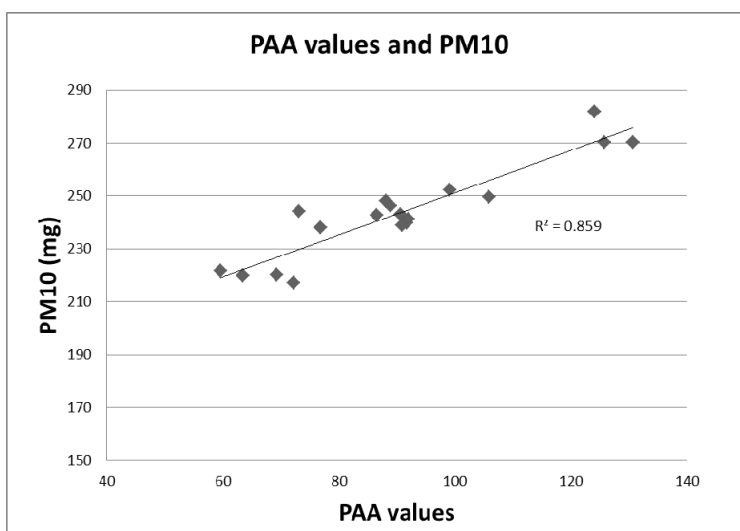


Figure 11. PAA values and PM₁₀ emissions

6. Conclusions

After classifying Variable Speed Limits, the literature review has shown that in many cases VSL (and in particular VSL based on dynamic control) have been beneficial in terms of traffic performance, road safety and environmental effects. Based on the accumulated acceleration in a section (or instantaneous speed variations) the methodology described provides a single indicator (PAA) to evaluate whether the implementation of VSL is working properly and has the potential to produce the desired effects.

To evaluate the feasibility of the methodology on a practical level, a pilot study was carried out on a stretch of the M30 motorway ring-road in Madrid. This demonstrated the defined PAA effectiveness indicator to be specific, measurable, reliable and traceable.

Once the effects of driving variability have been statistically bounded by analyzing the trips in free flow, the variability in traffic intensities requires a greater number of routes. Regarding the traffic performance, traffic data extracted from induction loops shows an increasing traffic throughput when the system is activated, slightly penalising travel times.

After estimating the emissions based on the speed profiles, clear tendencies have been extracted by correlating the results with the PAA indicator, especially with CO₂ and NO_x.

Although it has been not possible to cross the obtained data with road safety figures, in general it can be concluded that the homogenization achieved by the implementation of variable speed limits systems has positive effects.

Future research in relation to this indicator could be directed towards establishing more solid quantitative relationships between changes in the value of the PAA effectiveness indicator and the VSL effects, especially regarding road safety.

Acknowledgments

This work was supported in part by the European Commission, under the project ICT-EMISSIONS, “Development of a Methodology and Tool to Evaluate the Impact of ICT Measures on Road Transport Emissions”, Grant agreement no: 288568.

References

1. Giles, M.J. (2004). Driver speed compliance in Western Australia: a multivariate analysis. *Transport Policy*, 11(3), 227–235.
2. Van Nes, N., Brandenburg, S. & D. Twisk. (2008). Dynamic speed limits; effects on homogeneity of driving speed. *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE*, 269.
3. Elvik, R. (2005). Speed and road safety – Synthesis of evidence from evaluation studies, *Transportation Research Record: Statistical Methods; Highway Safety Data, Analysis, and Evaluation; Occupant Protection; Systematic Reviews and Meta-Analysis*, no. 1908 (pp. 59–69). Washington.
4. Ntziachristos, L. & Z. Samaras. (2000). Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters. *Atmospheric Environment*, 34(27), 4611–4619.
5. Makarewicz, R. & M. Gałuszka. (2011). Road traffic noise prediction based on speed-flow diagram. *Applied Acoustics*, 72(4), 190–195.
6. Sisiopiku, V. (2011). Variable Speed Control: Technologies and Practice, *Proceedings of the 11th Annual Meeting of ITS America, 2011, Virginia*.
7. Peltola, H. (2000). Seasonally changing speed limits – Effects on speeds and accidents. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1734, 46–51.
8. Wyoming Department of Transport. (May 10, 2012). *Variable speed limits replaces seasonal limit on I-80 section, 2010*. Available at – http://www.dot.state.wy.us/wydot/news_info/news_releases;jsessionid=8C31A2CE4E803278FC9A1703A8425BC4?template=tpl.newsDetail&newsID=910
9. Land Tirol. (May 24, 2012). *Tempo 100 auf der Autobahn – warum?* (In German). Available at – <http://www.tirol.gv.at/themen/verkehr/verkehrsplanung/verkehrsprojekte/tempo100>
10. Lehming, B. (2008). Noise reduction plan for Berlin – Action plan, *Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz. Abt. III Umweltpolitik, Referat Immissionschutz*. Berlin.
11. Transport and Main Roads. (2011). *School Environment Safety Technical Guidelines*. Queensland Government, Queensland, Australia.
12. Allaby, P., Hellinga, B. & M. Bullock. (2007). Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 8(4), 671–680.
13. Hegyi, A., De Schutter, B. & J. Hellendoorn. (2005). Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(1), 102–112.
14. Xu, J., Liang, F. & W. Yu. (2006). Coordinated Control of Variable Speed Limits Based on Neural Dynamic Optimization. In “Vehicular Electronics and Safety”, ICVES, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (pp. 163). Shanghai, China.
15. Ghods, A.H., Fu, L. & A. Rahimi-Kian. (2010). An Efficient Optimization Approach to Real-Time Coordinated and Integrated Freeway Traffic Control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 873–884.
16. Xiao-Yun, L., Varaiya, P., Horowitz, R., Dongyan, S. & S.E. Shladover. (2010). A new approach for combined freeway Variable Speed Limits and Coordinated Ramp Metering. In Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 491). Funchal, Portugal.

17. Highways Agency. (2004). *M25 Controlled Motorways. Summary Report*. Bristol (UK): Highways Agency Publications Group.
18. Nissan, A. & X. Bang. (2006). Evaluation of impacts of the motorway control system (MCS) in Stockholm. In Proceedings of the European Transport Conference, AET. Strasbourg, France.
19. García, A. (2009). Estudio sobre la gestión variable de la velocidad en las vías de acceso a las áreas urbanas, *Cambra Oficial de Comerç, Indústria i Navegació de Barcelona*. Barcelona, Spain.
20. Heydecker, B.G. & J.D. Addison. (2011). Analysis and modelling of traffic flow under variable speed limits. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 19(2), 206–217.
21. Zhicai, J., Xiaoxiong, Z. & Y. Hongwei. (2004). Simulation research and implemented effect analysis of variable speed limits on freeway. In Proc. of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 894). Washington.
22. Schick, P. (2003). Einfluss von Streckenbee in flussungs anlagen auf die Kapazität von Autobahn abschnittensowie die Stabilität des Verkehrsflusses. (In German) Ph. D. Thesis. Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität, Stuttgart.
23. Hoogendoorn, S.P. (1999). *Multiclass continuum modelling of multilane traffic flow*. Delft, The Netherlands: Delft University Press.
24. Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C. & B. Van Arem. (2010). Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits. In Proc. of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 485). Madeira, Portugal.
25. ECMT. (2007). Congestion management measures that release or provide new capacity. In OECD/ECMT (Eds.), *Managing urban traffic congestion* (pp. 229). France: OECD Publishing.
26. Lee, C., Hellinga, B. & F. Saccomanno. (2007). Assessing safety benefits of variable speed limits. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, 1897, 183–190.
27. Piao, J. & McDonald, M. (2008). Safety Impacts of Variable Speed Limits – A Simulation Study. In Proc. of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, (ITSC) (pp. 833). Beijing, China.
28. Robinson, M. (2000). Examples of Variable Speed Limit Applications. In Speed Management Workshop, the 79th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington.
29. Benedekand, C.M., Rilett, L.R. (1998). Equitable traffic assignment with environmental cost functions. *Journal of Transportation Engineering – ASCE*, 124, 16–22
30. Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, J. & E.A. Breunnesse. (2010). Variable speed limits for area-wide reduction of emissions. In Proc. of the 13th International IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 507–510). Funchal, Portugal.
31. Hoffmann-Leichter. (1997). Untersuchung der Auswirkung der Verkehrsbeeinflussungs anlage auf der A5 Freidberg – Frankfurt auf Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Reisezeit, *Hessischen Landesamtes für Straßen – und Verkehrswesen*. Falkensee Germany.
32. Fildes, B.N. & S.J. Lee. (1993). The speed review: Road environment, Behavior, Speed limits, Enforcement and Crashes, (pp. 33–34). Monash University, Accident Research Centre.
33. Wegman, V., Aarts, L. & C. Bax. (2008). Advancing sustainable safety: National road safety outlook for The Netherlands for 2005–2020. *Safety Science*, 46(2), 323–343.
34. Rakha, H., Van Aerde, M., Ahn, K. & A.A. Trani. (2000). Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1738(1), 56–67.
35. El-Shawarby, I., Ahn, K. & H. Rakha. (2005). Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 10(1), 13–30.
36. Joumard, R., Jost, P., Hickman, J. & D. Hassel. (1995). Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration. *Science of the Total Environment*, 169(1–3), 167–174.
37. Ding, Y. & H. Rakha. (2002). Trip-based explanatory variables for estimating vehicle fuel consumption and emission rates. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2(5), 61–77.
38. Smit, R., Smokers, R. & E. Rabe. (2007) A New Modelling Approach for Road Traffic Emissions: VERSIT+. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 12(6), 414–422.