

INTEGRACIÓN DE ESTRATEGIAS DE TRANSPORTE URBANAS: EVIDENCIA DE SINERGIAS

Luis A. Guzmán

Investigador Ph.D. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Daniel de la Hoz

Ph.D. consultor independiente, Santander, España

Andrés Monzón

Catedrático Departamento de Transportes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

Siempre se ha apoyado el principio que defiende la integración de políticas de transporte urbano, sin embargo, hay poca evidencia de los beneficios obtenidos a través de dicha integración en el largo plazo.

El concepto de estrategias de transporte integradas no es nuevo. Numerosas autoridades de transporte europeas los vienen desarrollando desde los años 90. La propia Conferencia Europea de Ministros de Transporte (ECMT) las recoge como un elemento clave en su primer documento sobre transporte y sostenibilidad (ECMT, 1995). Sin embargo, en la definición y diseño de estrategias integradas existe una limitación importante, puesto que por lo general no se contempla el diseño de forma holística, sino como una suma individual de actuaciones. Esta aproximación elimina, por indeterminación, las potenciales sinergias (positivas y negativas) existentes entre las diferentes iniciativas que pudieran implementarse.

A la vista de lo anterior surge una cuestión a resolver que es la comprensión de cómo combinar mejor la gran variedad de instrumentos y medidas que pueden configurarse en un plan de movilidad sostenible con el objetivo de alcanzar un objetivo determinado.

En el presente trabajo se estudian las potenciales sinergias que podrían producirse al combinar diferentes medidas. Esto permite maximizar la utilidad de las actuaciones programadas y optimizar el diseño de las estrategias para alcanzar un objetivo concreto de movilidad. Para ello se propone un método de evaluación que integra un modelo dinámico de usos del suelo y transporte que simula escenarios a largo plazo, un mecanismo de evaluación de escenarios que mide la utilidad de las actuaciones a implementar y un módulo de optimización que permite diseñar las actuaciones de tal forma que maximice una función de utilidad previamente definida.

Esta investigación presenta la combinación de dos tipos de medidas: el cobro de una tasa de congestión por ingresar al centro de Madrid y la variación de la oferta (frecuencia) de transporte público (TP). Se han seleccionado estas medidas puesto que las potenciales sinergias entre este tipo de medidas son muy importantes. En particular las políticas que combinan las políticas de "push" o de "palo" que hacen los viajes en coche sean menos atractivos y las políticas de "pull" o de "zanahoria" que hacen el transporte público más atractivo, son comúnmente aceptadas como las más provechosas.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de vida en las ciudades depende mayormente del sistema de transporte. La mayoría de los habitantes de una zona urbana se desplaza diariamente, así sea localmente. Para sostener una economía eficiente y equitativa, es necesario disponer de un sistema de transporte de similares características, ya que los actuales modelos de ciudad, con un creciente uso y dependencia del vehículo privado conducen a escenarios cada vez más insostenibles desde todos los puntos de vista: económicos, sociales y ambientales.

Modificar esta tendencia es un objetivo claro, pero para eso es importante identificar, de forma resumida y simplificada, los aspectos claves que condicionan el diagnóstico y la misión-visión de los objetivos a plantearse en una zona urbana, así como el diseño de las actuaciones y las propuestas que inviertan la tendencia de insostenibilidad existente.

Uno de esos elementos importantes es el sistema de transporte. Éste no se concibe como un elemento aislado, sino que representa un sistema dentro de una realidad compleja urbana. Ya desde el momento en que el transporte se define como una actividad derivada, es decir, como un mecanismo para satisfacer un conjunto de necesidades, cualquier actividad relacionada con su planificación, gestión, análisis, o caracterización es conducida a contemplar esta realidad compleja en el que la configuración del territorio, su ordenación y uso urbano, es un elemento clave. La estrecha y directa relación entre el sistema de transporte y el sistema de actividades urbanas (Manheim, 1979), es el origen del equilibrio inestable entre oferta y demanda y entre servicios y requerimientos de movilidad. Así, la sostenibilidad traducida en términos de políticas para la movilidad urbana, exige una perspectiva holística del problema, en la que la planificación del transporte, los usos del suelo y el medioambiente no sean ya por más tiempo llevados a cabo de una forma aislada (ECMT, 2001).

La integración de estrategias de transporte ha sido promovida como un enfoque más realista y eficaz para resolver los problemas actuales de las zonas urbanas. Esto podría reducir significativamente la magnitud de los problemas de transporte en una zona urbana (Hull, 2008). Aunque una solución podría involucrar una medida aislada, varias investigaciones dicen que medidas de esta naturaleza no son suficientes para alcanzar la sostenibilidad (May, et al., 2001; van Wee, 2002; Geerlings y Stead, 2003).

Un buen programa de políticas urbanas que sea eficiente, coordinado y que maximice sus resultados, se debe componer de elementos que trabajen juntos para producir efectos acumulados positivos a largo plazo. Estos efectos deberían lograr un equilibrio entre los objetivos ambientales, sociales y económicos. Si bien es de interés examinar las contribuciones de distintas medidas en el logro de objetivos de planificación (eficiencia, equidad, integración, entre otros), es aún más relevante estudiar sus efectos combinados.

Este enfoque integrado se debe centrar en combinar diferentes medidas de transporte en paquetes equilibrados, en cuanto modos de transporte, zonas de aplicación e impactos sobre los usuarios y el ambiente, ya que un área urbana es un sistema complejo, con múltiples interacciones entre sus subsistemas. Por esto, es de esperar que combinaciones coordinadas de medidas complementarias, puedan dar lugar a efectos sinérgicos, entendidos éstos de tal forma que los resultados de estrategias integradas sean mayores que la suma de los efectos individuales de cada una de las medidas involucradas. Estos efectos han de ser potenciados en caso de ser positivos, o minimizados en caso de ser

negativos. La consideración de sinergias puede mejorar en gran medida la eficiencia de las medidas por lo que su consideración y evaluación se aborda en la presente investigación.

La dificultad, desde la perspectiva de la investigación, es comprender cómo diferentes paquetes de medidas interactúan entre sí: si son una simple suma de efectos, o existen sinergias de algún tipo; y, posteriormente identificar las combinaciones más exitosas (Tighty May, 2006).

Estas preguntas han sido abordadas por varias investigaciones anteriores (Mayy Roberts, 1995; Fowkes, et al., 1998; Mayy Still, 2000; Shepherd, et al., 2006; Zhang, et al., 2006; May, et al., 2008); y en algunos proyectos europeos como PROSPECTS (Minken, et al., 2003), PROPOLIS (Lautso, et al., 2004) y SPECTRUM (Grant-Muller, 2005), donde han habido importantes avances en el diseño de estrategias integradas. Ellos han realizado simulaciones para varias ciudades europeas y han encontrado efectos de sinergias obtenidas a través de la combinación de medidas relacionadas con *pricing* el transporte público (TP). Estas combinaciones tienen un gran potencial de mejorar la calidad ambiental, económica y social de una zona urbana. El único requisito importante es que deben tener un impacto a nivel estratégico (May, et al., 2006).

En esta investigación se discute un enfoque alternativo basado en un proceso de optimización, frente a escenarios pre-establecidos. El método propuesto facilita el proceso de diseño de medidas a través de un proceso de maximización del bienestar de la sociedad, representada en una función objetivo (FO) basada en una aproximación de análisis coste-beneficio (CBA). Con ello se busca una combinación de medidas que maximice dicho bienestar dentro de un entorno dinámico de usos del suelo y transporte (modelo dinámico de usos del suelo y transporte, *Land-Use and Transport Interaction*, por sus siglas en inglés, modelo LUTI).

En este estudio se pretenden describir las posibles sinergias que generarían dos medidas específicas de transporte: la implementación de un cobro por congestión a los vehículos de pasajeros para ingresar al centro de la ciudad y el cambio en la oferta del TP, en este caso, el aumento o disminución de la frecuencia de paso de los autobuses en la Comunidad de Madrid. Como puede verse se ha combinado una medida “*push*” que restringe el uso del coche, con una medida “*pull*” que favorece el transporte público. La combinación de ambos tipos de medidas está comúnmente aceptada como las más exitosas para invertir los patrones y hábitos de movilidad existentes.

2. LAS SINERGIAS: SOSTENIBILIDAD E INTEGRACIÓN

Las medidas de transporte pueden interactuar entre sí de diferentes formas. Según la forma en que lo hagan a lo largo del tiempo, se verá si la integración ha sido la adecuada y si se alcanzan escenarios sostenibles. En el proyecto europeo SPECTRUM-D4 (Mayeres, et al., 2003) se identifican y definen cuatro diferentes formas en que las sinergias se pueden presentar: complementariedad, aditividad, sinergia y sustitución perfecta. Una definición precisa de cada uno de estos tipos de sinergia también puede verse en May, et al., (2006).

En este caso, el término ‘sinergia’ se usa de forma general para describir los efectos positivos de la interacción de diferentes medidas. Dentro de este concepto, el principio más importante de la aplicación de un conjunto de medidas será obtener un rendimiento superior, en donde la suma global de los beneficios sea mayor que la suma individual de los beneficios de cada medida. Este concepto debe surgir de la complementariedad de las

medidas aplicadas. Así que la búsqueda de sinergias debe ser un objetivo en sí mismo de los planificadores y reguladores(Santos, et al., 2010).

Los puntos clave en la búsqueda de sinergias son: 1) encontrar la forma de identificar una combinación óptima de las medidas a probar, dado que en su mayoría, estas medidas pueden cambiar según su forma de implementación y; 2) cuántas medidas serán suficientes y necesarias para lograr la mayor eficiencia, equidad y el máximo desempeño, en este caso, del sistema de transporte?Adicionalmente, otros autores dicen que también es importante la forma de identificar sus restricciones y limitaciones(May, et al., 2006), es decir, restricciones financieras o limitaciones legales, por ejemplo.

Este estudio se ha centrado en responder el primer punto, utilizando un mecanismo de optimización que interactúa de forma dinámica con el modelo LUTI. Una vez seleccionadas las medidas a implementar, el método planteado permite la optimización conjunta de la estrategia escogida, teniendo como objetivo principal maximizar la FO, evidenciando la presencia de sinergias. Para poder evaluar a qué nivel se producen sinergias entre las medidas, se han diseñado escenarios donde se optimizan las iniciativas de manera individual y luego se comparan con los resultados de una optimización conjunta y coordinada, utilizando los resultados óptimos individuales y los óptimos conjuntos.

El segundo punto es más difícil de contestar, debido al gran número y tipología de medidas existentes. Sin embargo, algunos autores ven indicios que a medida que se integran más medidas, el posible beneficio se incrementa dramáticamente (Wood, 2007)puesto que el número de relaciones potencialmente sinérgicas se incrementa notablemente.

3. EVALUACIÓN DE UNA ESTRATEGIA INTEGRADA

El problema del análisis y evaluación de la existencia de sinergias, es el gran número de diferentes tipos de medidas que pueden ser utilizadas para ello, con el inconveniente que es muy difícil establecer en qué proporción, cada medida contribuye a lograr los objetivos o, si cierta combinación de medidas puede o alcanzarlos. Como resultado de esto, es difícil tener la certeza de la forma en que cada combinación va a interactuar en general y mucho menos prever sus impactos potenciales, además de los ganadores y perdedores en cada escenario.

Además de esta complejidad, están las múltiples facetas de los sistemas de transporte y sus conexiones e interacciones con otros sub-sistemas (social, ambiental, la localización de actividades), por lo que una modelización estática (en un solo periodo de tiempo) y los procesos tradicionales de optimización pueden tener limitaciones, también debido al carácter dinámico de muchas de estas variables y su impacto dentro del sistema urbano a largo plazo.

Por lo tanto, se propone utilizar un enfoque alternativo de evaluación y optimización basado en los sistemas dinámicos (SD). El método propuesto utiliza el concepto de diagramas de ciclos causales (CLDs) definidos en la dinámica de sistemas, el cual es la base de la definición y explicación de las relaciones *causa y efecto* de las variables de los modelos de transporte y usos del suelo. El método consiste en un modelo LUTI propuesto y en un procedimiento de optimización, los cuales se presentan a continuación. También se ha desarrollado un enfoque de evaluación dinámico y alternativo CBA el cual está basado en los logros alcanzados por ciertos indicadores con respecto al objetivo planteado (maximizar el bienestar social).

3.1 El Modelo Estratégico MARS-Madrid

El modelo dinámico de transporte y usos del suelo utilizado en esta investigación está basado en el modelo *Metropolitan Activity Relocation Simulator* (MARS)(Pfaffenbichler, 2008).MARS-Madrid es un modelo estratégico, dinámico, que integra los sistemas de usos del suelo y transporte y fue diseñado para simular y evaluar diversas políticas urbanas en el tiempo. Este modelo trabaja con un nivel de agregación importante y hace evaluaciones a largo plazo. Fue desarrollado como una alternativa al tradicional modelo de cuatro etapas, proporcionando un ahorro de tiempo ya que se omite el paso de asignación, y trabaja con relaciones de velocidad-intensidad (pares O-D) en lugar de una red completa.MARS-Madrid incluye un modelo de transporte que simula los patrones de viajes de la población con la localización de su vivienda y puesto de trabajo. Un modelo de desarrollo de viviendas, de localización y generación de puestos de trabajo y un modelo de consumo de combustible y de emisiones también están incluidos.En la Tabla 1 se muestra una descripción del modelo MARS-Madrid en términos de oferta y demanda.

Características	MARS Madrid
Número de zonas	90
Modos de transporte	Coche, transporte público, caminar
Efectos de congestión	Curvas específicas de intensidad-velocidad
Costes generalizados	Tiempo de recorrido, tiempos de espera, acceso y salida, tiempos de búsqueda de parking, tarifas
Propósitos de viaje	Movilidad obligada y no obligada (<i>commuting</i> y <i>others</i>)
Características del hogar	Residentes empleados, nivel de motorización, ingreso medio por hogar
Elección de ruta	No
Elección de modo y destino	Simultáneo
Respuesta de la demanda	Viajes movilidad obligada inelástica. Presupuesto de tiempo de viaje
Respuesta de los usos del suelo	Si

Tabla 1 - Características Principales del Modelo MARS-Madrid

El modelo asume que los usos del suelo no es una constante, sino que es parte de un sistema dinámico que está influenciado por las infraestructuras de transporte. El proceso de interacción es simulado entre los sistemas de transporte y usos del suelo a lo largo de un periodo de 30 años. En este caso, el periodo de estudio es 2004-2034.

El desarrollo de este modelo empezó 12 años atrás, financiado parcialmente por proyectos de investigación europeos (OPTIMA, FATIMA, PROSPECTS). A la fecha, este modelo a sido probado en varias ciudades europeas (Edimburgo, Helsinki, Leeds, Madrid, Oslo, Estocolmo, Bari y Viena), en algunas ciudades del sudeste asiático (Chiang Mai y Ubon Ratchathani en Tailandia y Hanoi en Vietnam) (Pfaffenbichler, et al., 2008), además de Washington DC en Estados Unidos (Hardy, 2012). Una completa descripción del modelo y su funcionamiento puede verse en Pfaffenbichler(2008).

3.2 El Proceso de Optimización

El proceso de optimización aquí utilizado consiste en buscar la mejor solución a una FO bajo un amplio espacio de valores posibles; es decir, se basa en la búsqueda de parámetros por medio de sucesivas iteraciones directas a través de un rango definido, con el fin de

encontrar los valores óptimos de dichos parámetros. Este procedimiento permite optimizar la FO variando uno o más parámetros definidos previamente por medio del algoritmo de Powell (Powell, 1964), sin utilizar derivadas parciales.

Para problemas cuadráticos, este método asegura la convergencia en un número finito de iteraciones, buscando un mínimo local de una función para un conjunto de vectores lineales independientes sin utilizar derivadas y conocido como uno de los métodos de direcciones conjugadas. Además, el método se basa en el uso de una función cuadrática, por lo cual cuenta con una base teórica sólida. De acuerdo con Rendery Bersini (1994), este método es el más preciso cuando se tiene la necesidad de un número de evaluaciones de la FO de varias iteraciones. El desarrollo completo del algoritmo modificado de Powell puede verse en Press, et al., (2007).

Básicamente, el proceso de optimización consiste en encontrar los valores de las medidas probadas que hagan que el modelo maximice la FO, en este caso el bienestar social. En un modelo complejo y con varias medidas a optimizar, esto tomaría mucho tiempo. Sin embargo con esta propuesta, el proceso de optimización varía automáticamente, dentro de un rango predeterminado, los valores de las medidas probadas y busca el mejor ajuste posible, en un muy razonable periodo de tiempo. Este procedimiento de optimización usado es similar al presentado en Guzmán, et al., (2011).

3.3 Evaluación CBA

Para evaluar los impactos de una estrategia, la planificación del transporte generalmente utiliza un enfoque CBA o un análisis multicriterio (Shiftan, et al., 2003), aunque tradicionalmente dichas estrategias se han evaluado mediante CBAs estáticos, de forma discreta y en un mismo periodo de tiempo (Shepherd, et al., 2006).

También existen algunas críticas a este método de evaluación: algunos autores dicen que análisis de este tipo pueden causar ciertas tensiones y frustraciones si son utilizados en planes integrados de transporte y usos del suelo (Beukers, et al., 2012), especialmente en la valoración de nuevos proyectos de infraestructuras; aunque sus críticas se centran en la falta de comunicación y desconfianza entre planificadores y economistas. También existen estudios que critican los métodos de cálculo de valoración de elementos cualitativos que son de difícil monetarización, que ignoran los problemas relacionados con la equidad y con la falta de información con las sinergias esperadas (van Wee, 2007) y no incluyen suficiente información sobre los ganadores y perdedores. Para tratar de subsanar la mayor parte de estos inconvenientes, en este estudio se ha tenido en cuenta la equidad (definida como la relación entre costes de transporte e ingreso por hogar, medida en forma de coeficiente de Gini) y se ha clasificado la sociedad en cuatro agentes diferentes, con el fin de identificar claramente a los ganadores y perdedores de la estrategia empleada: usuarios y operadores del sistema, administración y externalidades.

En esta investigación se hará una evaluación y optimización a largo plazo, la cual describe muy bien los efectos que mutuamente se causan entre sí a nivel macro, los usuarios del sistema de transporte, debido a que realizan actividades conjuntas, produciendo efectos de naturaleza positiva o negativa (Dolly Jansson, 2005). Evaluaciones CBA son utilizadas en muchos países como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con los sistemas de transporte (Damarty Roy, 2009). Sin embargo, somos conscientes de las limitaciones de este tipo de análisis desde el punto de vista ético (van Wee, 2012), particularmente en sus estimaciones en el largo plazo.

Este método de evaluación permite medir los cambios en los costes percibidos por los usuarios debido a cambios en el sistema de transporte. Estos costes son generalmente asociados a los cambios en los costes monetarios en los que se incurre al realizar un viaje (tarifas de TP, peajes, combustibles, etc.).

La FO(ΔW , ecuación 1) tiene en cuenta los cambios relativos de costes debido a la estrategia implementada con respecto a un escenario de referencia (*do-nothing*). Esta función está definida por los siguientes elementos: el cambio en el excedente del consumidor (ΔU_{ij}), del cual incluye los costes (o ahorros) en dinero y los ahorros en tiempo de viaje de los usuarios del sistema, derivados de la aplicación de una estrategia de transporte. Los beneficios/costes de los operadores del sistema (ΔO_{ij}), los cuales están asociados a los ingresos por tarifas de transporte público y cobros al uso del coche. Los cambios en los beneficios de la administración (ΔG_{ij}), que incluyen impuestos al combustible y costes del mantenimiento de la red vial. Finalmente, están las externalidades (ΔE_{ij}), en donde se incluyen los beneficios por la reducción de accidentes, emisión de gases de efecto invernadero (CO_2) y la calidad del aire (NO_x and PM_{10}).

Al estimar el total de los beneficios de los usuarios del sistema por medio de la ‘regla de la mitad’ (Sugden, 1999), se obtienen resultados razonables, siempre y cuando los cambios producidos por las estrategias afecten a los costes generalizados del sistema. Este procedimiento es la forma más utilizada para estimar el beneficio de los usuarios en proyectos de transporte (Jara-Díaz, 2007).

Los resultados se expresarán por el Valor Actual Neto (VAN) de la estrategia implementada, utilizando una tasa social de descuento $r=4.8\%$ (Souto Nieves, 2003), según la siguiente ecuación:

$$\Delta W = \sum_{t=0}^{30} \sum_{ij} [1/(1+r)^t] \cdot [\Delta U_{ij}(t) + \Delta O_{ij}(t) + \Delta G_{ij}(t) + \Delta E_{ij}(t)] \quad (1)$$

Donde además de las variables ya explicadas, se tiene i y j que representan el origen y destino de los viajes, respectivamente. El modo de transporte m está implícitamente incluido en la función.

4.LA REGIÓN DE MADRID

Madrid es una región de aproximadamente 8.000 km^2 , con 6.458.684 habitantes en el 2010. El centro de la ciudad tiene una extensión de 55 km^2 y cerca de un millón habitantes. Adicionalmente la región de Madrid está conformada por cuatro anillos o coronas tal como se puede ver en la Fig. 1: centro (almendra), periferia, corona metropolitana y corona regional.

El modelo MARS-Madrid representa toda el área descrita anteriormente, con 90 zonas que cubren toda la provincia. Las proyecciones externas, como el crecimiento económico, la evolución de la población y de la economía se han estimado con información del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (INE, 2010). El año de inicio de las simulaciones es el 2004.

En la actualidad, en el centro de Madrid existe una tarifa de aparcamiento para todos los usuarios de coche que vayan a esta zona, incluyendo a los residentes.

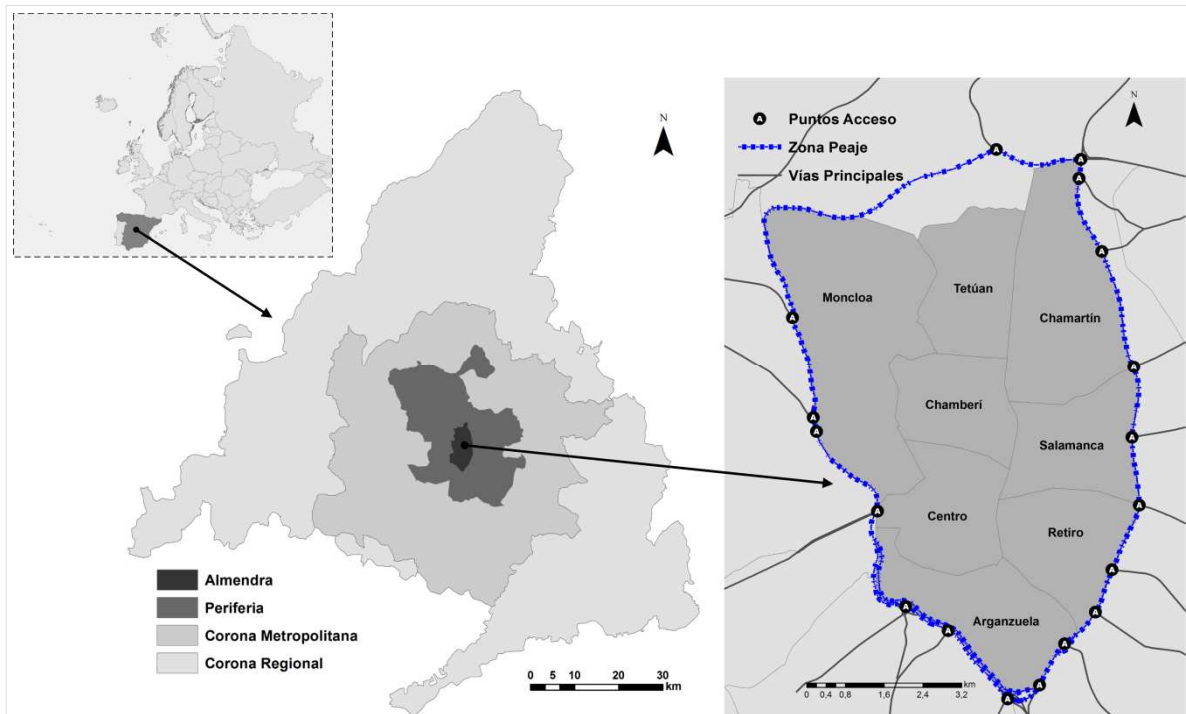


Fig. 1 - Zona de Estudio – Madrid

4.1 Implementación de Medidas

Las medidas serán aplicadas de forma continua a lo largo de todo el periodo de evaluación, a partir del año 2010 ($t=6$). Estas medidas continuas, en el caso general, pueden ser aplicadas en cualquier periodo ($t = 0, \dots, 30$). En este caso, para una sola medida habría en teoría 30 valores dentro de la solución óptima. Sin embargo, de acuerdo con Emberger, et al., (2008), una política óptima debe ser:

- Fácilmente comprensible y;
- Fácil de presentar a los encargados de la toma de decisiones.

La introducción de este “perfil de medidas”, permite disponer de los valores de cada medida a lo largo del tiempo. En este caso, por cada medida, se tendrán dos puntos a optimizar en el tiempo: X_C y X_L para los valores a corto y largo plazo, respectivamente. Por lo tanto, es necesario definir el año de implementación t_C y el periodo final de optimización t_L . Entonces, si se define X_C y X_L como los valores óptimos de cada medida, los valores medios de cada medida se pueden establecer interpolando de forma lineal entre estos valores.

Las medidas escogidas y aplicadas en el presente caso de estudio son:

- Cobro de una tasa por congestión: esta medida pretende restringir el acceso de los vehículos privados al centro de Madrid, con el fin de reducir la contaminación y congestión, además de promover un cambio modal. La zona seleccionada como zona de prueba es el área comprendida al interior del anillo de circunvalación conocido como M-30 (ver Fig. 1). Además, esta medida se ha optimizado en dos periodos diferentes del día: hora punta y hora valle.
- Variación de la oferta del transporte público: la variación de dicha oferta (en este caso, autobuses) consistirá en aumentar o disminuir, en forma porcentual, la frecuencia de los servicios teniendo como punto de comparación la operación del escenario de

referencia. En concordancia con esta variación, los costes de operación cambiarán en la misma proporción en que se aumente o disminuya la frecuencia del servicio, teniendo en cuenta los costes fijos y variables.

La implementación de estas medidas será en forma gradual, año a año, desde el año inicial t_C (2010) hasta alcanzar en el final del periodo de evaluación t_L (2034), el valor óptimo X_L .

4.2 Optimización de Escenarios

Para este estudio, los escenarios a evaluar son:

- Peaje. En el escenario [P], se buscará una tarifa de peaje urbano óptima para ingresar a la almendra central de Madrid (Fig. 1), de tal manera que se cumpla con el objetivo de maximizar el bienestar social definido por la ecuación (1).
- Variación frecuencia autobuses. Este escenario [B], buscará el nivel óptimo de cambio de frecuencias respecto al nivel del escenario de referencia que maximice la misma función objetivo.
- Escenario combinado condicionado. Este escenario [P+B]', evalúa de forma conjunta las medidas anteriormente optimizadas, simulando un escenario combinado pero tomando como valores óptimos los hallados en los escenarios individuales. Como se ha dicho, se tienen en cuenta sólo los valores óptimos individuales hallados en [P] y [B] aunque se implementan simultáneamente.
- Escenario combinado optimizado. En el escenario [P+B], lo que se busca es la optimización conjunta de ambas medidas, actuando integradamente de tal forma que se maximicen las sinergias existentes entre ellas y por tanto se alcancen las mayores cotas de bienestar social posible, dadas las condiciones iniciales.

En la Tabla 2 se muestran las medidas probadas (aisladas e integradas), la zona de aplicación y los años inicial y final de optimización en los cuatro escenarios descritos anteriormente.

Escenario	Medida		Zona	Año inicio	Año fin
	Peaje	Frec. Bus			
Do-nothing	n/a	n/a	n/a	n/a	2034
[P]	Si	No	Centro	2010	2034
[B]	No	Si	Región	2010	2034
[P+B]'	Si	Si	Centro/Región	2010	2034
[P+B]	Si	Si	Centro/Región	2010	2034

Tabla 2 -Escenarios a Evaluar

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SINERGIAS

En la Tabla 3 se presentan los resultados hallados para cada escenario y se basan en el VAN de la FO durante los 30 años del periodo de evaluación.

El valor óptimo del peaje en hora valle en todos los escenarios se asume cero, al no haber un nivel de congestión importante en este periodo. Esto implica que los potenciales beneficios de ahorro de tiempo por congestión, que es el factor más importante en un análisis coste-beneficio (Sallingy Leleur, 2011), son muy bajos, por lo que el coste a introducir es cercano a cero.

Escenario	Medida	Rango optimización	Diseño Óptimo	
			t_C (2010)	t_L (2034)
[P]	Peaje hora punta	€ 0 – 8	€ 1	€ 2
	Peaje hora valle *	€ 0 – 8	€ 0	€ 0
	Frecuencia bus	n/a	n/a	n/a
[B]	Peaje hora punta	n/a	n/a	n/a
	Peaje hora valle *	n/a	n/a	n/a
	Frecuencia bus	-50% a +200%	0%	60%
[P+B]' **	Peaje hora punta	€ 0 – 8	€ 1	€ 2
	Peaje hora valle *	€ 0 – 8	€ 0	€ 0
	Frecuencia bus	-50% a +200%	0%	60%
[P+B]	Peaje hora punta	€ 0 – 8	€ 1	€ 4
	Peaje hora valle *	€ 0 – 8	€ 0	€ 0
	Frecuencia bus	-50% a +200%	0%	100%

* Para el valor del peaje en la hora valle, el resultado óptimo es cero, coincidiendo con los resultados presentados en May, et al., (2006) y Shepherd, et al., (2006).

** No es un escenario óptimo en su conjunto. Nótese que los valores óptimos son los mismos que en los dos escenarios anteriores [P] y [B].

Tabla 3 - Resultados del Proceso de Optimización

La Tabla 4 muestra las variaciones alcanzadas en algunos de los principales indicadores generales de transporte y equidad para los escenarios estudiados, mientras que la Tabla 5 muestra los resultados de la evaluación CBA. Para facilitar la visualización de las interacciones que se producen entre ambas medidas, se han añadido las diferencias existentes entre los escenarios combinados [P+B]' y [P+B] con la suma de los efectos de los escenarios individuales [P]+[B]. Estas diferencias aportan información sobre las potenciales sinergias que se producen en los indicadores seleccionados, entre las medidas propuestas.

Escenario	Cambios relativos al escenario de referencia, año 2034 [%]							
	Uso coche	Uso TP	Vel. coche	Vel. TP	Dist. viaje coche	Dist. Viaje TP	Emisiones CO ₂	Gini
[P]	-0.28	+0.43	+1.65	+0.74	+0.37	+0.06	-0.05	+1.96
[B]	-7.37	+11.02	+4.72	+14.03	-0.42	-6.39	+1.05	-17.30
[P]+[B]	-7.66	+11.44	+6.37	+14.76	-0.05	-6.33	+1.00	-15.34
[P+B]'	-7.68	+11.47	+6.47	+14.92	-0.08	-6.31	+0.99	-15.86
[P+B]	-9.62	+14.37	+8.58	+19.42	+0.16	-8.91	+2.80	-15.54
[P+B]' - ([P]+[B])	-0.02	+0.03	+0.10	+0.16	-0.03	+0.02	-0.01	-0.52
[P+B] - ([P]+[B])	-1.96	+2.93	+2.21	+4.66	+0.21	-2.58	+1.80	-0.19

Tabla 4 – Evidencia de Sinergias en Algunos Indicadores en Madrid

Según los resultados de la Tabla 4, se puede observar como el resultado óptimo del escenario de peaje [P], produce una ligera reducción en el uso del coche en el marco regional (no en el área central donde el efecto es importante). Dicha reducción del uso del coche se traduce en un ligero aumento del uso del transporte público. En relación a las velocidades, puede apreciarse como esta medida produce una mejora generalizada tanto en usuarios de coche como de transporte público debido a la transferencia modal esperada en las áreas de mayor congestión. Este escenario [P] causa un incremento en las distancias de

desplazamiento. Sin embargo, ese incremento de distancias y velocidades no provoca un aumento de las emisiones. Por el contrario, las emisiones de CO₂ se ven reducidas debido a un menor uso del vehículo privado.

Por el contrario, el escenario óptimo de servicio de transporte público [B] ocasiona un mayor impacto en el reparto modal y en el uso del vehículo privado debido principalmente a que la medida afecta a toda región y no sólo a una determinada área. Esta transferencia modal provoca un aumento importante en las velocidades de recorrido. Además, pese a ese incremento de velocidades, las distancias medias de desplazamiento se ven reducidas. Hay un proceso de contracción en la demanda hacia relaciones de mayor proximidad facilitadas por el uso del TP con un aumento de la frecuencia de paso.

Respecto a la equidad social, el escenario [B] provoca un aumento significativo en el indicador GINI sobre el coste del transporte según los ingresos, lo que significa que este escenario es mucho más equitativo que el escenario de comparación *do-nothing*.

En los escenarios combinados, al observar las diferencias que se producen con respecto a la suma de efectos de escenarios con medidas individuales, se puede apreciar como en ambos casos existen diferencias. En el caso concreto de aplicar las medidas óptimas individuales en un escenario combinado (escenario condicionado [P+B]'), se puede observar como todos los indicadores mejoran. Se usa menos el coche y más el transporte público, se alcanza una mayor velocidad en la movilidad en TP y coche, se reducen las distancias en vehículo privado, se reducen las emisiones y se alcanza un escenario ligeramente más equitativo.

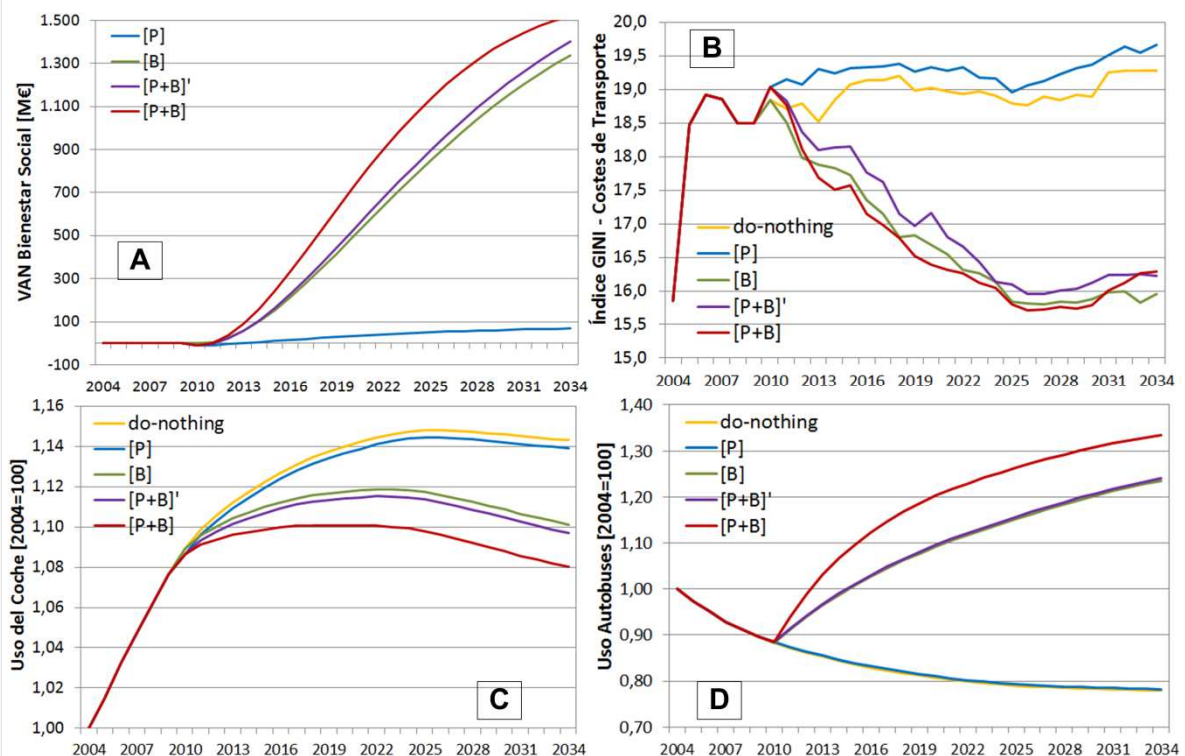


Fig. 2—Indicadores de Transporte

Dichos efectos se ven amplificados, en el caso de la optimización combinada de ambas medidas. Este escenario óptimo [P+B] produce un cambio importante en los patrones de movilidad (reparto modal, contención en el incremento de la distancia en vehículo privado,

mejora de los servicios de proximidad de TP reduciendo la distancia media de desplazamiento, mejora del indicador de equidad). Sin embargo, este escenario provoca un sensible aumento de las emisiones de CO₂ debido a la mayor demanda resultante, principalmente de TP.

A la vista de estos resultados, puede comprobarse la capacidad de generar sinergias entre ambas medidas en los cambios de patrones de movilidad y orden general del sistema urbano en donde se aplican estrategias de forma integrada.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de algunos indicadores a lo largo del tiempo: a) función objetivo (bienestar social); b) índice de equidad en costes de transporte/ingresos por hogar (donde 0 es la igualdad perfecta); c y d) uso del coche y autobús, respectivamente.

Los efectos contemplados anteriormente también se representan en los valores de la función objetivo (Tabla 5). Las sinergias, que han sido definidas anteriormente, se muestran aquí con un signo positivo (+) en las dos últimas columnas donde se muestran las diferencias de los escenarios combinados [P+B]' y [P+B] con respecto a la suma de los impactos de los escenarios individuales [P] y [B].

En los resultados discriminados por agentes de la Tabla 5, se observa que utilizando los resultados óptimos de las medidas aisladas (donde se obtienen resultados positivos en la FO, para cada uno de ellos), en el escenario [P+B]' se produce una reducción del bienestar social. Sin embargo, es interesante ver los impactos de este escenario en cada uno de los agentes evaluados: este escenario ([P+B]') produce una mejora sobre la suma de efectos individuales [P]+[B] en los beneficios sobre los usuarios, sobre la administración y sobre las externalidades. Sin embargo, estas sinergias positivas no superan las pérdidas obtenidas por los operadores derivadas principalmente de una menor recaudación por peajes y aparcamientos. Esto significa que este escenario combinado produce una reestructuración en la movilidad, no sólo en el cambio modal, sino en los patrones territoriales, de tal forma que en el escenario combinado condicionado a los valores óptimos individuales, los individuos potencialmente afectados por el peaje al centro urbano son menores que en los escenarios individuales.

Por el contrario, en el escenario [P+B] las dos medidas se optimizan de forma conjunta para maximizar las sinergias potenciales entre ellas (la sinergia total hallada es de +112 M€).

Los efectos sinérgicos de los escenarios estudiados dan a entender que en general hay sinergia pura, al menos en lo que al resultado final [P+B] se refiere. Al estudiar en detalle los resultados de cada agente del sistema, vemos que los usuarios del sistema son los grandes beneficiarios de implementar esta estrategia al obtener, además de altos beneficios en escenarios con medidas aisladas, sinergias puras en el escenario integrado. Un resultado a destacar es que los beneficios de los usuarios de TP debido a las sinergias en ahorros de tiempo, son más del 120% que en los usuarios de coche.

En el caso de los operadores, se evidencian sinergias en las tarifas y en el cobro del peaje; pero como se espera, al restringir el ingreso de los coches al centro de la ciudad (que es donde se cobra el parking), hay menos coches que en total pagan menos por aparcar. En cuanto a los costes de operación, al doblar la oferta de autobuses, éstos aumentan de forma

similar. Es importante reseñar que se pone en práctica la transferencia de recursos obtenidos por el cobro de peaje a financiar la operación del TP. Al tener esto en cuenta, el resultado final es positivo y además queda la evidencia de sinergias puras.

Escenario	[P]	[B]	[P+B]'	[P+B]	[P+B]'- ([P]+[B])	[P+B]- ([P]+[B])
FO	68.27	1,338.55	1,402.15	1,518.57	-4.67	+111.75
Beneficio usuarios						
<i>Ahorros de tiempo</i>						
Usuarios coche	216.22	820.73	1,025.97	1,343.93	-10.98	+306.98
Usuarios TP	65.53	1,404.22	1,480.92	2,148.66	+11.17	+678.91
<i>Ahorros dinero</i>						
Usuarios coche	-871.19	30.76	-830.25	-1,257.15	+10.18	-416.72
Usuarios TP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total beneficio usuarios	-589.45	2,255.72	1,676.64	2,235.44	+10.36	+569.17
Beneficio operadores						
Tarifas	20.81	650.72	674.71	953.68	+3.19	+282.16
Tarifas parking	-147.09	-33.06	-177.81	-248.76	+2.35	-68.61
Tarifas peaje	836.24	0.00	814.55	1,176.93	-21.69	340.69
Costes de operación	0.00	-1,393.89	-1,393.89	-2,326.18	0.00	-932.28
Total beneficio op.	709.96	-776.24	-82.43	-444.32	-16.15	--378.04
Beneficio administración						
Impuestos combustible	-2.35	-96.44	-99.02	-117.04	-0.24	-18.26
Mantenimiento vial	-2.49	13.92	11.71	12.53	+0.28	+1.10
Total beneficios admin.	-4.83	-82.52	-87.32	-104.51	+0.03	-17.16
Externalidades						
Accidentes	-48.41	-53.39	-100.82	-147.85	+0.97	-46.06
Beneficios ambient.	1.00	-5.03	-3.92	-20.19	+0.11	-16.16
Total externalidades	-47.41	-58.41	-104.74	-168.04	+1.08	-62.22

Tabla 5– Resultados CBA, Función Objetivo y Posibles Sinergias con Respecto al Escenario de Referencia (VAN M€)

Después de ver estos resultados, la búsqueda de una sinergia de orden mayor, es decir, una que beneficie a todos por igual (estrategias gana-gana), puede llegar a ser más atractivo. En cierta forma este es el caso de esta investigación, ya que vemos que la magnitud de los beneficios y sinergias positivas es mucho mayor que las pérdidas asumidas por los agentes perdedores (administración y externalidades). Adicionalmente se observa que una estrategia integral tiene un alto impacto sobre el cambio modal buscado (del coche al TP, Fig. 2c y d) y también tiene un impacto importante sobre el índice de equidad usado (Fig. 2b), aunque en este caso, parece ser que el factor más importante es la mejora del acceso al TP (al aumentar su frecuencia), particularmente en las zonas externas de la región.

Por esta razón, las sinergias buscadas deben ser simbióticas, de estilo *ganaⁿ*, donde *n* representa a todos los actores involucrados en el proceso. Esta simbiosis no solo deberá mejorar el entorno urbano, sino mejorar sus impactos mutuamente.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha investigado la contribución de medidas individuales y conjuntas a un objetivo común. También se ha investigado el diseño de estrategias óptimas de transporte.

Se ha comprobado la existencia de sinergias, en donde la suma de los beneficios de escenarios óptimos con medidas integradas es mayor que la suma de los beneficios de otros escenarios óptimos, pero con medidas aisladas.

Las sinergias se pueden obtener a través de medidas complementarias, lo que puede generar recursos para apoyar otros aspectos de la estrategia implementada. La combinación de medidas y la transferencia de recursos económicos entre ellas pueden hacer que éstas se justifiquen o se hagan viables financieramente, algo que de otra forma no sucedería. También puede hacer más fácilmente aceptable por parte de la ciudadanía, medidas poco populares, como los cobros adicionales al uso del coche.

En este trabajo se han evaluado y optimizado dos medidas de transporte para evidenciar sinergias entre ellas. Trabajos en donde se contemplen un conjunto de medidas más amplio, podría dificultar el análisis y estudio de las sinergias, puesto que al usar varias y diferentes medidas, sus efectos pueden solaparse de alguna manera, produciendo sinergias sustitutivas, lo que haría que el proceso de integración y optimización no fuera del todo eficiente.

En consideración con lo anterior, se espera que el uso de modelos integrados basados en la interacción dinámica de los sistemas de transporte sobre los usos del suelo (y viceversa), contribuya a la comprobación de hipótesis sobre el funcionamiento de las sinergias, haciendo más claros los procesos de toma de decisiones, en un entorno complejo donde la interacción entre el transporte, el territorio, el medio ambiente y la economía urbana, es cada vez más importante dentro de una planificación eficiente.

En este caso, al involucrar un proceso de optimización, las sinergias obtenidas por medio del método desarrollado, muestran un mejor desempeño al optimizar escenarios conjuntos que simplemente utilizar los óptimos individuales.

A la vista de todo ello, se muestra la posibilidad de un nuevo concepto de sinergia (maximizar sinergias entre medidas): después de estudiar los resultados obtenidos se podría hablar de sinergias óptimas, donde los beneficios obtenidos de optimizar diferentes medidas dentro de un mismo escenario, además de integrarlas, podría ser el paso siguiente en la planificación urbana de medidas de movilidad sostenible.

Finalmente, la implementación de estrategias sostenibles de transporte y usos del suelo se beneficiarían al ser respaldadas por procesos transparentes que expliquen de la forma más fácil posible la forma en que dichas medidas afectan el uso del suelo y la movilidad urbana y cómo funcionan las sinergias en la práctica. Su buena comprensión y funcionamiento será fundamental para desarrollar la idea de la ciudad del futuro, mientras que por ahora debemos evitar el uso insostenible que se le está dando al suelo urbano y al uso del transporte individual motorizado.

7. REFERENCIAS

1. BEUKERS, Els, BERTOLINI, Luca y BRÖMMELSTROET, Marco T., 2012. Why Cost Benefit Analysis is perceived as a problematic tool for assessment of transport plans: A process perspective. *Transportation Research Part A*, 46(1), pp. 68-78.
2. DAMART, Sébastien y ROY, Bernard, 2009. The uses of cost-benefit analysis in public transportation decision-making in France. *Transport Policy*, 16(4), pp. 200-212.
3. DOLL, Claus y JANSSON, Jan O., 2005. Measuring the Marginal Social Cost of

- Transport. User Costs and Benefits. *Research in Transportation Economics*, 14pp. 125-154.
4. ECMT, 1995. Urban transport and sustainable development. Paris: European Conference of Ministers of Transport/OECD.
 5. ECMT, 2001. Assessing the benefits of transport. Paris: European Conference of Ministers of Transport.
 6. EMBERGER, Günter, SHEPHERD, Simon P. y MAY, Anthony D., 2008. The Effects of Appraisal Methodology on the Specification of Optimal Urban Transport Strategies. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2(1), pp. 58-75.
 7. FOWKES, A. S., BRISTOW, A. L., BONSALL, Peter W. y MAY, Anthony D., 1998. A short-cut method for strategy optimisation using strategic transport models. *Transportation Research Part A*, 32(2), pp. 149-157.
 8. GEERLINGS, Harry y STEAD, Dominic, 2003. The integration of land use planning, transport and environment in European policy and research. *Transport Policy*, 10(3), pp. 187-196.
 9. GRANT-MULLER, Susan, 2005. Study of Policies regarding Economic instruments, Complementing Transport Regulation and the Undertaking of physical Measures. SPECTRUM Project. Leeds: Institute for Transport Studies. ReporteFinal.
 10. GUZMÁN, Luis A., DE LA HOZ, Daniel y MONZÓN, Andrés, (2011). Dynamic Long-Term Optimization Procedure for Pricing Transport Policies Based on Social Welfare Assessment. Transportation Research Board (TRB) 90th Annual Meeting, Washington D.C.
 11. HARDY, Matthew, (2012). Using Open Source Data to Populate, Calibrate and Validate a Simplified Integrated Transportation and Land Use Model. Transportation Research Board (TRB) 91th Annual Meeting, Washington DC.
 12. HULL, Angela, 2008. Policy integration: What will it take to achieve more sustainable transport solutions in cities? *TransportPolicy*, 15(2), pp. 94-103.
 13. INE, (2010). Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. [Página Web del Instituto Nacional de Estadística], Disponible: www.ine.es.
 14. JARA-DÍAZ, Sergio, 2007. *Transport Economic Theory*. 1 edn. Oxford. Elsevier. pp. 140. ISBN: 978-0-08-045028-5.
 15. LAUTSO, Kari; SPIEKERMANN, Klaus; WEGENER, Michael; SHEPPARD, Ian; STEADMAN, Philip; MARTINO, Angelo; DOMINGO, Roberto y GAYDA, Sylvie, 2004. Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability. PROPOLIS Project. Helsinki: European Commission. ReporteFinal.
 16. MANHEIM, Marvin L., 1979. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. Vol1. The MIT Press. p. 674. ISBN-10: 0-262-63289-6.
 17. MAY, Anthony D., KELLY, Charlotte y JOPSON, Ann F., 2008. The development of an option generation tool to identify potential transport policy packages. *Transport Policy*, 15(6), pp. 361-371.
 18. MAY, Anthony D., KELLY, Charlotte y SHEPHERD, Simon P., 2006. The principles of integration in urban transport strategies. *Transport Policy*, 13(4), pp. 319-327.
 19. MAY, Anthony D., SHEPHERD, Simon P., MINKEN, Harald, MARKUSSEN, T., EMBERGER, Günter y PFAFFENBICHLER, Paul C., 2001. The use of response surfaces in specifying transport strategies. *Transport Policy*, 8(4), pp. 267-278.
 20. MAY, Anthony D. and STILL, Ben, 2000. The instruments of transport policy. Working Paper 545. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds.
 21. MAY, Anthony D. y ROBERTS, M., 1995. The design of integrated transport strategies. *Transport Policy*, 2(2), pp. 97-105.

22. MAYERES, I.; PROOST, Stef; EMBERGER, Günter; GRANT-MULLER, Susan; KELLY, Charlotte y MAY, Anthony D., 2003. Synergies and conflicts of transport instrument packages in achieving high level objectives. Study of Policies regarding Economic instruments Complementing Transport Regulation and the Undertaking of physical Measures. Deliverable D4. Leeds: Institute for Transport Studies. SPECTRUM Project.
23. MINKEN, Harald; JONSSON, Daniel; SHEPHERD, Simon P.; JÄRVI, Tuuli; MAY, Anthony D.; PAGE, Matthew; PEARMAN, Alan; PFAFFENBICHLER, Paul C.; TIMMS, Paul M. y VOLD, Arild, 2003. A Methodological Guidebook. PROSPECTS Project. Vol. Deliverable 14. Oslo: Institute of Transport Economics. European Commission. ISBN: 82-480-0313-2.
24. PFAFFENBICHLER, Paul C., 2008. MARS - Metropolitan Activity Relocation Simulator. Saarbrücken. VDM Verlag Dr. Müller. pp. 188. ISBN: 978-3-8364-7104-6.
25. PFAFFENBICHLER, Paul C., EMBERGER, Günter y SHEPHERD, Simon P., 2008. The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS. *Networks and Spatial Economics*, 8(2-3), pp. 183-200.
26. POWELL, M. J. D., 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 7(2), pp. 155-162.
27. PRESS, William H., TEUKOLSKY, Saul A., VETTERLING, William T. y FLANNERY, Brian P., 2007. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd Edition. Cambridge. Cambridge University Press. p. 1248. ISBN: 0-521-88068-8.
28. RENDERS, Jean-Michel y BERSINI, Hugues, (1994). Hybridizing genetic algorithms with hill-climbing methods for global optimization: two possible ways. *IEEE World Congress on Computational Intelligence, Bruxelles. Evolutionary Computation*. pp. 312-317.
29. SALLING, Kim B. y LELEUR, Steen, 2011. Transport appraisal and Monte Carlo simulation by use of the CBA-DK model. *Transport Policy*, 18(1), pp. 236-245.
30. SANTOS, Georgina, BEHRENDT, Hannah y TEYTELBOYM, Alexander, 2010. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), pp. 46-91.
31. SHEPHERD, Simon P., ZHANG, X., EMBERGER, Günter, HUDS, M., MAY, Anthony D. y PAULLEY, Neil, 2006. Designing optimal urban transport strategies: The role of individual policy instruments and the impact of financial constraints. *Transport Policy*, 13(1), pp. 49-65.
32. SHIFTAN, Yoram, KAPLAN, Sigaly y HAKKERT, Shalom, 2003. Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system. *Transportation Research Part D*, 8(5), pp. 323-342.
33. SOUTO NIEVES, Guadalupe, 2003. Tasas de descuento para la evaluación de inversiones públicas: estimaciones para España. Instituto de Estudios Fiscales. No. 8/03. Barcelona: Dirección General de Investigación de la Generalitat de Catalunya. ISSN: 1578-0252.
34. SUGDEN, Robert, 1999. *Developing a consistent cost-benefit framework for multimodal transport appraisal*. London: Report to the Department of the Environment, Transport and the Regions.
35. TIGHT, M. R. y MAY, Anthony D., 2006. Innovation and integration in urban transport policy. *Transport Policy*, 13(4), pp. 281-282.
36. VAN WEE, Bert, 2002. Land use and transport: research and policy challenges. *Journal of Transport Geography*, 10(4), pp. 259-271.
37. VAN WEE, Bert, 2007. Large infrastructure projects: a review of the quality of

- demand forecasts and cost estimations. *Environment and Planning B*, 34(4), pp. 611-625.
38. VAN WEE, Bert, 2012. How suitable is CBA for the ex-ante evaluation of transport projects and policies? A discussion from the perspective of ethics. *Transport Policy*, 19(1), pp. 1-7.
 39. WOOD, John, 2007. Synergy city; planning for a high density, super-symbiotic society. *Landscape and Urban Planning*, 83(1), pp. 77-83.
 40. ZHANG, Xiaoyan, PAULLEY, Neil, HUDSON, Mark y GLYN, R., 2006. A method for the design of optimal transport strategies. *Transport Policy*, 13(4), pp. 329-338.