

ANÁLISIS DE IMPACTOS EN LA TARIFA DE COBRO POR CONGESTIÓN EN MADRID UTILIZANDO LA DINÁMICA DE SISTEMAS

Luis Ángel Guzmán García

laguzman@caminos.upm.es

Estudiante Doctorado Universidad Politécnica de Madrid. Investigador Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT-UPM) +33 91 336 52 34

Daniel de la Hoz

daniel.delahoz@upm.es

Profesor Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Investigador Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT-UPM) +33 91 336 52 36

Paul Pfaffenbichler

paul.pfaffenbichler@ivv.tuwien.ac.at

Univ. Ass. Dipl. Technische Universität Wien Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik Gußhausstr +43 (1) 58 801 231 14

RESUMEN

Madrid, desde hace unos años tiene implementado un sistema de cobro por estacionamiento en su centro urbano (almendra central). Esta medida ha tenido gran influencia sobre el aparcamiento ordenado dentro de esta área. Su influencia sobre la demanda vehicular también ha sido notable pero quizás insuficiente desde el punto de vista medioambiental y de congestión. Con base en esta situación inicial, y utilizando un modelo de usos del suelo y transporte basado en sistemas dinámicos, se pretende realizar un análisis del impacto que tendría la implementación de nuevas estrategias de gestión de la demanda como por ejemplo el cobro de una tarifa por congestión o contaminación (peaje) por ingresar al centro de la ciudad, un aumento en el precio del estacionamiento en combinación con la medida anterior. Estas estrategias darán como resultado distintos escenarios que podrán compararse.

Este estudio tiene como objetivo principal estimar a medio y largo plazo el impacto sobre la movilidad y el cambio en los usos del suelo que el cobro de una tarifa adicional a la del estacionamiento regulado (o una combinación de ambos) tiene sobre la zona central de la ciudad y de la región en general. Como primera medida, se modeló y optimizó una tarifa para el valor a implementar en el peaje de acuerdo con unos objetivos fijados previamente como son la reducción de emisiones de CO₂ y del uso del vehículo privado dentro de la zona de estudio. Adicionalmente, se realizó un análisis multivariable de sensibilidad sobre las políticas implementadas y su variación en el precio. En este análisis de sensibilidad, se desarrolla un proceso de modificar las hipótesis de los valores de las tarifas en el modelo y examinar la variabilidad de los resultados.

PALABRAS CLAVES: peajes urbanos, tarifas por congestión, sistemas dinámicos.

1. INTRODUCCIÓN

La entrada de un nuevo vehículo en una zona ya saturada por el tráfico impone retrasos sobre los demás vehículos. Este nuevo usuario se ve afectado por la propia congestión que él mismo está ayudando a generar. Los beneficios que este nuevo usuario de la infraestructura de transporte deriva de su viaje son ampliamente superados por el perjuicio colectivo, lo que en teoría sería que socialmente dicho viaje no debería haberse realizado. De esta manera, las políticas de gestión de demanda, en este caso la implementación de cobros por circulación, adecúan los niveles de demanda a las infraestructuras (oferta) existentes. Los motivos principales comunes a todas estas políticas pueden resumirse en:

- La necesidad de dar una respuesta a la congestión vehicular creciente.
- El compromiso de reducir la contaminación en el medio ambiente urbano.
- La exigencia de financiar los nuevos requerimientos de infraestructuras y servicios de transporte público.
- Que los habitantes perciban una mejora de la calidad urbana.

En la actualidad, la movilidad dentro del centro de las ciudades se caracteriza generalmente por una serie de efectos externos como la congestión (aumento de tiempos de desplazamiento y mayores emisiones de contaminantes), ruido, mayor riesgo de accidentes, efectos barrera, entre otros. Con el uso creciente del vehículo privado en la actualidad, se están presentando tendencias marcadas hacia una localización de actividades cada vez más dispersas, lo que ha acentuado el nivel de impacto de dichos efectos externos (Banister D. et al, 1997). En este contexto, teniendo presentes estos efectos, y algunos otros más, los mecanismos de mercado se muestran insuficientes para alcanzar asignaciones de recursos eficientes, por lo que se hace necesaria la intervención a través de distintas medidas que pueden englobarse por su naturaleza en dos bloques: políticas de oferta y políticas de demanda.

Las políticas de oferta en general, se refieren a adecuar las infraestructuras a la demanda existente, política que incentiva claramente el círculo vicioso del transporte (IRIS Plan, 1998). Por su parte, las políticas de demanda se centran en adecuar los niveles de demanda a las infraestructuras (oferta) existentes. Políticas de este tipo serían, entre otras, la fijación de peajes (*road-pricing*). Tradicionalmente, el empleo de medidas que pudieran incidir sobre la demanda asociada a los costes de transporte no tenía otro objetivo aparte del puramente recaudatorio (impuestos sobre el combustible, por ejemplo) o de financiación de la construcción y mantenimiento de infraestructuras (peajes en autopistas). En los últimos años se ha tomado conciencia en que estas medidas responden a nuevas consideraciones como la congestión.

Teniendo en cuenta esta situación, lo que se encuentra tras este objetivo es gestionar la demanda en el centro de Madrid con el fin de obtener un descenso en los niveles de contaminación, dar prioridad a modos de transporte diferentes al vehículo privado y fomentar una concentración de actividades para así evitar la tendencia cada vez más creciente de hacer viajes más largos, donde el transporte público es poco competitivo, es decir, una gestión enfocada hacia la sostenibilidad del transporte.

En este artículo, se analiza el efecto que diferentes medidas de gestión de la demanda, como la implementación de peajes urbanos y un aumento en el cobro por estacionamiento, y su variación de tarifa, tendrán sobre la movilidad de la Comunidad de Madrid y particularmente sobre su centro urbano.

El modelo de usos del suelo y transporte que se utilizó en este estudio, MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator), es un modelo dinámico desarrollado dentro de un marco centrado en la sostenibilidad e incluye ciclos de retroalimentación entre los submodelos de transporte y usos de suelo, así como los más importantes modos de transporte (Pfaffenbichler P. 2003 y 2008). En el modelo MARS, en el coste asociado a cada viaje se incluyen los tiempos de recorrido y de espera, y los costes de operación del vehículo por kilómetro recorrido, incluyendo los costes de estacionamiento y combustible y tarifa, en el caso del transporte público. De esta manera se introducirán en el modelo los costes adicionales analizados en este estudio. Para ello, además de tener en cuenta la movilidad, se incluyen otros elementos como la contaminación (emisiones CO₂) y la localización de actividades (puestos de empleo).

Para llevar a cabo el proceso de optimización, se utilizaron dos objetivos en concreto: la reducción de emisiones de CO₂ y del uso del vehículo privado en la almendra central de Madrid. Este proceso de optimización consiste en variar automáticamente las variables del modelo elegidas y compararlas con los valores objetivos en el año t , por medio del método de los mínimos cuadrados y así hacer el mejor ajuste posible. Posteriormente, con la tarifa óptima estimada se realizará un análisis de sensibilidad. En cuanto al análisis sobre la variación de la tarifa se realizará un tipo de simulación, llamada de Montecarlo, también conocida como Simulación de Sensibilidad Multivariable (MVSS). El método de análisis de sensibilidad multivariable de Montecarlo trabaja probando un conjunto de números dentro de un cierto rango. Para realizar un análisis multivariable, muestrea la distribución para cada parámetro especificado y los valores resultantes se usan en una simulación.

La Comunidad de Madrid se encuentra dividida en cuatro grandes zonas geográficas o coronas, que se cuentan de adentro hacia afuera: el municipio de Madrid se divide en la almendra central y en la periferia (coronas 1 y 2, respectivamente) y el resto de la región está formada por la corona metropolitana y finalmente por la regional. La localización de la zona en donde se pretende aplicar un cobro por ingreso se puede observar en la Figura 1, así como el resto de la configuración regional.

2. EL MODELO MARS

Las investigaciones de las últimas décadas han mostrado que los usos del suelo y la configuración de los sistemas de transporte están íntimamente relacionados de forma dinámica, por lo tanto es necesario integrar los usos del suelo y los modelos de transporte con el fin de determinar el funcionamiento de las estrategias y políticas urbanas. En la literatura existe una gran variedad de modelos de transporte y/o usos del suelo (Wegener M., 2003).

La tendencia actual en la modelación de usos del suelo y transporte está caracterizada por una gran desagregación, incluso por debajo del nivel de hogar. Este modelo tan detallado, independientemente de su atractivo teórico, es inapropiado para identificar estrategias sostenibles. A pesar de la mayor capacidad de procesamiento de datos de los ordenadores, la evaluación de los modelos puede tardar mucho debido al gran número de variables que deben ser consideradas. Por otro lado, es necesario disponer de una gran cantidad de información, incluso se debe recurrir a estimar datos para alimentar el modelo según su nivel de desagregación. Los requerimientos de información son una de las razones por las cuales el uso de modelos integrados de usos del suelo y transporte, no es tan extendido.

MARS, es un rápido modelo de interacción entre el uso del suelo y el transporte que trabaja con un nivel de agregación importante. Este modelo incluye ciclos de retroalimentación entre los submodelos de transporte y usos de suelo. También incluye los más importantes modos de transporte. Una gran ventaja de este modelo en la actualidad es que trabaja bajo un software de sistemas dinámicos conocido como Vensim® lo que lo hace transparente y bajo una programación orientada a objetos que facilita su desarrollo y comprensión (Pfaffenbichler et al, 2007). Es importante aclarar que MARS no es un modelo de equilibrio.

El principio básico con el que trabaja el modelo consiste en que la población y las actividades son sistemas “auto organizables”, tal como se puede apreciar en la Figura 2. Como se ve esta figura, MARS consta de dos submodelos: el de transporte y el de usos del suelo. Estas dos partes están relacionadas por un intervalo de tiempo (*time lag*), lo que permite que cada submodelo trabaje en dos escalas de tiempo diferentes. Esto significa que al haber cambios en el sistema de transporte, éstos tendrán un impacto sobre el sistema de usos del suelo después de un periodo de tiempo t ; a su vez, si hay cambios en el sistema de usos del suelo, estos causarán reacciones inmediatas en el sistema de transporte.

El concepto sobre el que se basa el modelo MARS, Diagramas de Flujo Causales o (Casual Loop Diagrams, CLD) es la base de la definición y explicación de las relaciones causa-efecto de las variables del modelo. Así, por ejemplo, en la Figura 3, se muestra parte del modelo de transporte en el que se pueden ver las variables que afectan al número de viajes en vehículo privado, generándose diferentes ciclos o bucles. Un bucle negativo (B1) indica que la generación de viajes en coche está vinculado con la atractividad de la zona para ir en coche, que a su vez depende del tiempo de búsqueda de aparcamiento en cada zona, el cual a su vez depende así mismo de la demanda existente en la zona. Este bucle negativo es un bucle de naturaleza equilibradora. El bucle B2 representa el efecto de la congestión y su influencia sobre la velocidad. El Bucle B3 actúa sobre el coste del desplazamiento. Estos bucles siguen teniendo una naturaleza que hace tender al sistema al equilibrio. Pero el bucle B4 sin embargo es de naturaleza desestabilizadora, puesto que el mayor uso del coche, aumentan la congestión también para otros modos de transporte que comparten vía con éste de tal forma que repercute en una *desutilidad* de los modos alternativos, y por tanto una mayor atractividad del coche, lo que a su vez causa un mayor uso del mismo. Relaciones CLD similares se han desarrollado para los diferentes subsistemas del modelo. Su simplicidad y familiaridad de uso han sido elementos importantes de cara a establecer un modelo transparente y escalable.

2.1.1. Características Principales del Modelo

La hipótesis principal de MARS es que la movilidad es sólo un medio de satisfacer unas necesidades, pero no es una necesidad en sí misma. Adicionalmente supone que la gente tiene un presupuesto de tiempo de viaje disponible para gastar en desplazarse, ya que estudios empíricos han demostrado que el tiempo destinado a viajar permanece constante a lo largo del tiempo y entre zonas. Bajo estos conceptos, el modelo trabaja además con los siguientes parámetros:

- MARS trabaja con dos grupos de personas: personas en hogares con y sin coche.
- Hay dos tipos de viajes: trabajo (*commuting*) y otros (resto de viajes).

- Tres o cuatro modos de transporte: “slow¹”, transporte público y coche; “slow”, transporte público, coche y motos; “slow”, bus, “rail²” y coche.
- El número de viajes totales de trabajo se distribuye por zonas y por modos de transporte.
- El tiempo empleado en los viajes de trabajo se extrae del presupuesto de viaje. El tiempo restante, MARS supone que queda libre para realizar el resto de actividades.

Como ya se mencionó, el modelo de transporte está conformado por viajes de *commuting* y por los que no lo son, incluyendo modos no mecanizados. Los modelos de consumo energético y emisiones son dependientes de la velocidad. El modelo de usos del suelo considera criterios de localización residencial y de empleo, tales como la accesibilidad, el suelo disponible, el precio y la cantidad de zonas verdes. El modelo de transporte MARS fue calibrado y probado para la ciudad de Madrid (ver Figura 4).

Este modelo estratégico de transporte utiliza una red de transporte muy simplificada, donde la red es agregada, de forma que sólo existe un arco por cada par de origen-destino (OD). La consecuencia es que no existe la etapa de asignación de rutas, puesto que se supone que existe una única ruta entre cada par de zonas. Para el modelo de distribución zonal y modal de MARS, se utiliza una combinación de la analogía de la ley de la gravedad y de la ley de Kirchoff's de la ingeniería eléctrica (ecuación (1)). La producción de viajes P_i , es distribuida entre las zonas disponibles j y los modos m de acuerdo con la relación entre la atractividad de cada zona (A_j), la impedancia ($f(t,c)$) de cada par O-D y la sumatoria de la atractividad de todos los destinos y sus impedancias.

$$T_{ij}^m = \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{mj} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{Commuting} + \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{mj} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{Otros} \quad (1)$$

$T_{ij}^m =$	Número de viajes en el modo m que van del origen i al destino j
$P_i =$	Producción de viajes en el origen i
$A_j =$	Atractividad de una zona en el destino j
$t_{ij}^m =$	Tiempo de viaje en el modo m para ir de i a j [min]
$c_{ij}^m =$	Coste del viaje en el modo m para ir de i a j [€]
$f(t_{ij}^m, c_{ij}^m) =$	Factor de fricción en el modo m para ir de i a j [min]

MARS permite la aplicación de diversas estrategias. Las estrategias pueden ser medidas o instrumentos políticos que se espera que tengan un significativo impacto sobre los indicadores u objetivos, o bien en un área importante de la ciudad (Shepherd et al, 2007).

Para una mayor descripción del modelo MARS ver (Pfaffenbichler P, Emberger G, and Shepherd S. 2008) y (Pfaffenbichler P. 2003 y 2008).

2.1.2. Incorporación de los Nuevos Costes de Transporte Dentro del Modelo

En este caso en particular, los costes asociados a la tarifa de peaje y de estacionamiento van incluidos directamente en el coste asociado al uso del vehículo privado. Estos costes van

¹ MARS trabaja los peatones y las bicicletas de forma agregada bajo este modo.

² Bus se refiere a un sistema de transporte público de vías compartidas con el tráfico normal y “rail” es un sistema con plataforma reservada, por ejemplo, el metro y el bus VAO (carriles de alta ocupación).

dentro del factor de fricción (impedancia), el cual es una función que depende además de los tiempos de viaje, incluidas las percepciones subjetivas de los usuarios del sistema según las diferentes partes del viaje y como ya se mencionó, sus costes. Los parámetros de fricción usados en MARS fueron desarrollados por el *Institute of Transport Science, Aachen University of Technology* y tienen una forma exponencial. El factor de fricción para el vehículo privado dentro del modelo tiene la forma dada por la ecuación (2).

$$f(t_{ij}^C, c_{ij}^C) = (t_{il}^w * FS_{il}^w + t_{ij}^{dr} + t_{jj}^{ps} * FS_{jj}^{ps} + t_{jj}^w * FS_{jj}^w) * FS_{ij}^C + {}^k Z_{ij}^C \quad (2)$$

donde,

- t_{ij}^w = Tiempo de caminata del origen i al aparcamiento I [min]
- FS_{il}^w = Valor subjetivo de tiempo desde el origen i al aparcamiento I
- t_{ij}^{dr} = Tiempo de recorrido desde el aparcamiento I hasta el destino j [min]
- t_{jj}^{ps} = Tiempo de búsqueda de aparcamiento J [min]
- FS_{jj}^{ps} = Valor subjetivo del tiempo de búsqueda de aparcamiento J
- t_{jj}^w = Tiempo de caminata el aparcamiento J hasta el destino j [min]
- FS_{jj}^w = Valor subjetivo del tiempo desde el aparcamiento J hasta el destino j
- FS_{ij}^C = Valor subjetivo adicional por percepción del tiempo de i a j
- ${}^k Z_{ij}^C$ = Costes de viaje desde i hasta j causados por el componente k [min]

En lo referente a los costes que componen el factor de fricción (ecuación (2)), éstos están compuestos principalmente por los costes de operación y de aparcamiento tal como se muestra en la ecuación (3). En el escenario base, solo se incluyen los costes de estacionamiento existentes, en los demás escenarios, se tiene en cuenta el factor adicional dado por la tarifa del peaje.

$${}^k Z_{ij}^C = \frac{peaje_{cij} + parking_{cij}}{\alpha_{fuel} * \alpha_{parking} * Ing_i * F.O} + \frac{operación_{cij}}{\alpha_{fuel} * Ing_i * F.O} \quad (3)$$

donde,

- ${}^k c_{ij}$ = Costes por ir de i a j causados por el componente k [€/viaje]
- ${}^k \alpha$ = Factor de disponibilidad a pagar (0.43 para el combustible y 0.769 para el estacionamiento o peaje)
- Ing_i = Ingreso por hogar [€/min]
- F.O. = Factor de ocupación del coche [personas/coche]

Así, una vez estimados los nuevos factores de fricción según cada escenario, se vuelve a simular el modelo con estos nuevos parámetros. En cuanto a la calibración del modelo para el caso de Madrid, en la Figura 4 se puede observar la calibración para la totalidad de viajes del modelo.

3. METODOLOGÍA

Como primera medida se estimó una tasa de peaje óptima persiguiendo dos objetivos iniciales: la reducción de un 50% de toneladas de CO₂ (respecto al 2004) emitidas Madrid para el año 2050³ (Ayuntamiento de Madrid, 2008) y la reducción del uso del vehículo privado en un 10% para el año horizonte. Posteriormente y obtenido el valor de la tasa de cobro, se estudiará el comportamiento de la movilidad bajo diferentes escenarios de gestión de la demanda, así como la sensibilidad de los usuarios a la tarifa por acceder a la zona de

³ Como en el modelo solo se evalúa a 30 años, este valor objetivo se obtuvo por interpolación.

estudio y su impacto sobre diferentes variables, teniendo en cuenta que desde el año 0 en el modelo se incluye el cobro por estacionamiento y en el año 1 se implementaría el peaje. Los escenarios a evaluar son los siguientes (Tabla 1):

- Escenario Base (E0). Se simula el modelo bajo las condiciones actuales. No se supone ninguna intervención sobre la gestión de la demanda. Ya se tiene implementado el cobro por estacionamiento (zonas SER, ver Figura 1).
- Escenario 1 (E1). Se implementa el cobro de una tarifa por ingresar al centro de Madrid (ver Figura 1). Se estableció esta tarifa en la óptima hallada en el punto anterior y solo se cobra a los vehículos que deseen ingresar a la almendra. No para los que salgan de ella, ni para los viajes dentro de ella. Su rango de variación de precio será entre 0 y 100%, según el valor por año dado en la Tabla 1.
- Escenario 2 (E2). Se parte del Escenario 1 con la diferencia que el rango de variación de tarifas en las zonas dentro de la almendra será entre -50 y 100%, con respecto a su valor original dado por el Escenario base (E0).

Al realizar este análisis por medio de un modelo dinámico, según los resultados obtenidos en la modelación, se podría determinar cuál sería la variación del rango tarifario a cobrar a los usuarios del vehículo privado, con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, dados por diferentes indicadores.

3.1. Formulación de Indicadores de Evaluación

Existen dos problemas básicos que se presentan al momento de implementar una medida de *road pricing*. El primero es definir la zona y el segundo, cuánto se debería cobrar. En cuanto al primer problema, se definió como la zona de implementación la almendra central de Madrid (Figura 1). En cuanto al segundo, se hizo un ejercicio de optimización que resultó en el cobro de una tarifa escalonada creciente, es decir, para el año 1 se empieza cobrando 1 € y sucesivamente se eleva esta cifra hasta 9 € en el año 30.

Esto con el fin de lograr una mejor movilidad en el centro (mayor uso del transporte público) y una disminución de la contaminación. Paralelamente se analizará el efecto que estos incrementos en los costes tendrán sobre la localización de actividades, en este caso de ubicación de residentes y puestos de empleo. También se estudiará el efecto que estas medidas tendrían sobre la generación de viajes desde y hacia la almendra.

En MARS en este caso, los vehículos pagan el peaje solo cuando viajan a la almendra central desde fuera de ella, no en otro caso. De esta manera, a continuación se realizará una breve descripción de los diferentes indicadores con los que se desean evaluar los diferentes escenarios modelados, así como su sensibilidad a los cambios de tarifas del peaje y de los estacionamientos.

- Viajes dentro y hacia la almendra
- Emisiones de CO₂
- Distribución modal
- Localización de residentes y puestos de trabajo

El objetivo tradicional de un diseño de un sistema urbano de peaje, es tratar de maximizar el “beneficio neto” que obtendría la sociedad (May et al, 2000) y (Vold A. 2005). Esto sería el bienestar total de la sociedad menos los costes del sistema. Este paso, está contemplado para

una siguiente publicación donde se abarque la optimización basada en maximizar este beneficio.

3.2. Optimización

La optimización es un concepto relativamente nuevo en el análisis integrado de estrategias de usos del suelo y transporte. Esto significa usar un modelo integrado de usos del suelo y transporte con el fin de maximizar una función objetivo o tratar de alcanzar unos valores objetivo en ciertos indicadores que en este caso son las emisiones de CO₂ y la distribución modal en la almendra de Madrid. Las variables pueden ajustarse para encontrar el valor máximo de dicho objetivo según las políticas implementadas.

Esta es una muy buena manera de elegir la mejor estrategia. Comparando las estrategias óptimas bajo diferentes escenarios, con diferentes supuestos acerca de limitaciones y objetivos, o incluso bajo diferentes suposiciones de valores y unidades en la función objetivo, se puede lograr una nueva y mejor comprensión acerca de las interacciones involucradas en la formulación de estrategias.

La optimización se realiza partiendo de un escenario base, es decir, de un conjunto de supuestos dentro del modelo de usos del suelo y transporte. La estrategia óptima puede ser probada comparando su robustez y eficiencia bajo otros escenarios (PROSPECTS 2003). Una futura posibilidad puede ser utilizar la optimización para tratar de encontrar la estrategia con el mayor valor esperado de una función objetivo dada, teniendo en cuenta que los resultados serían diferentes según el escenario asumido. En este caso en particular solo se evaluará una estrategia sencilla, la cual consiste en calcular una tarifa de peaje de ingreso a la almendra, basándose en alcanzar unos objetivos como son la reducción de las emisiones de CO₂ y una disminución de 10% en el uso del vehículo privado con respecto al año 2004.

3.3. Incertidumbres en el Modelo. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad tienen por finalidad mostrar los efectos que sobre los indicadores de movilidad escogidos, tendría una variación o cambio en el valor de la tarifa de peaje combinada con las de estacionamiento en el centro de la ciudad (por ejemplo una menor emisión de contaminantes dentro de la almendra, etc.), y a la vez mostrar la holgura con que se cuenta para su realización ante eventuales variaciones de tales variables en el modelo (Watling D. y Clark S. 2006).

El análisis de sensibilidad es un resumen que muestra los valores de los indicadores objetivos (numeral 3.1) para cualquier porcentaje de cambio previsible en cada una de las variables más relevantes de estudio. La gráfica resultante permite ver fácilmente las holguras con que se cuenta para variaciones de cada una de las variables.

Para este caso, se realizó un análisis de incertidumbres multivariable en el caso del Escenario 2, donde se varían las tarifas de las zonas (distritos) que conforman la almendra central de Madrid y la tarifa de peaje. En el caso del Escenario 1, solo varía la tarifa de peaje. Ver Tabla 1.

Este análisis se realizará utilizando el método Montecarlo o simulación Montecarlo, donde se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones basadas en el muestreo sistemático de variables aleatorias. Por lo tanto es un proceso de cálculo que utiliza números

aleatorios para derivar una salida, por lo que en vez de tener entradas con puntos dados, se asignan distribuciones de probabilidad a alguna o todas las variables de entrada. Esto generará una distribución de probabilidad para una salida después de una corrida de la simulación.

En este caso, se realizaron repetidas simulaciones donde se variaron los valores de tarifas de peaje y coste de estacionamiento (según cada caso) en cada simulación. Este procedimiento es de gran ayuda para entender el comportamiento de los límites de dichas variables y probar la eficacia de las medidas aplicadas en el modelo.

Para poder realizar una simulación multivariable, es necesario suponer una distribución estadística para las variables que se quieren cambiar. La distribución a escoger debe estar basada en la naturaleza del modelo y de dichos parámetros. Estos parámetros deben estar acotados dentro de un rango de valores. Para este ejercicio se supuso que los valores de las tarifas están uniformemente distribuidos, es decir, que cada valor tiene la misma probabilidad de ser escogido como cualquier otro dentro del rango.

4. RESULTADOS – CASOS DE ESTUDIO

Se ha tratado de estudiar la implementación de una política impositiva directamente aplicada sobre los usuarios del vehículo privado como una política de transporte y analizar su impacto; no sólo su efecto o eficacia sobre la movilidad en general y el reparto modal, sino también el cambio a largo plazo de sobre otras variables como las emisiones de CO₂ y las pautas de localización residencial y de empleos. El estudio se ha realizado bajo tres escenarios diferentes, con la intención de sentar una base para posteriores desarrollos de implementación y optimización de este tipo de medidas de gestión de la demanda.

Con el fin de presentar los resultados, éstos se dividieron en cuatro grupos diferentes que hacen referencia a las zonas origen y destino del área de estudio:

- Almendra – Almendra (A-A)
- Almendra – Fuera (A-F)
- Fuera – Almendra (F-A)
- Fuera – Fuera (F-F)

Donde en la región llamada “fuera” se agrupan las tres coronas restantes: periferia, metropolitana y regional.

4.1. Escenarios

El ejercicio de optimización se realizó comparando dos variables: las emisiones de CO₂ y la distribución modal del vehículo privado en el centro de Madrid. Los objetivos, para la ciudad de Madrid, fueron la reducción de 34% y 10% respectivamente, en cada indicador en el año final de evaluación (2034). El proceso se realizó por medio de la aproximación entre las variables del modelo y los valores objetivos, utilizando diferencias por mínimos cuadrados. El resultado obtenido (en precios constantes) para el valor del peaje en cualquier periodo de tiempo t , se muestra en la ecuación (4). Se suma 1 (1 €), porque se consideró como el valor del peaje en el año 1.

$$Peaje_t = 0.276(t - 1) + 1 \quad (4)$$

donde,

$t =$ Periodo de tiempo [año]
 $\text{Peaje}_t =$ Coste del peaje en el año t [€]

Una vez obtenida y aplicada la tarifa de peaje, se procede a analizar los diferentes escenarios propuestos.

Como era de esperarse, la demanda de viajes desde y hacia el centro de Madrid es afectada por el cobro del peaje y por el incremento en las tarifas por estacionamiento. Con respecto a los viajes internos a la almendra (Figura 5), el total de viajes motorizados aumenta ligeramente en el escenario E1, pero disminuye cerca de un 5% en el escenario E2, respecto al escenario base. En cuanto a los viajes en coche, estas diferencias son aún más notorias: en el E2 el uso del coche disminuye más de 24%. Es notorio el impacto que tendría el aumento del cobro por estacionamiento.

Por otro lado, en la Figura 6 se observan los mismos datos anteriores, con la diferencia que en este caso son los viajes que se dirigen hacia el centro desde afuera. En este caso el impacto del peaje es mucho mayor: en el E1 los viajes totales y en coche disminuyen cerca de 18% y 52% respectivamente. En el E2, donde se suma el efecto del cobro de estacionamiento, la reducción llega a 19% y 56%, respectivamente.

La pérdida de demanda hacia el centro que se produce debido a la implementación de las medidas es compensada por la realización de más viajes hacia fuera de la almendra. Por ejemplo los viajes en coche aumentan un 5% aprox. en las coronas externas, respecto al escenario base. Por otro lado, la generación de viajes F-F en coche aumenta entre 30 y 40% (según el escenario), mientras que los viajes que salen de la almendra crecen cerca de un 35%.

Las medidas aplicadas no producen un efecto de concentración urbana importante como podría esperarse, como se puede observar en la Figura 13, aunque la demanda de viajes sí que tiende a disminuir. Esto indica que se produce un cambio modal importante dentro de esta zona. También se observa el rápido y gran crecimiento de las zonas externas (tanto en población como en empleo), fenómeno que es impulsado al instalar restricciones de acceso al centro de la ciudad, entre otros fenómenos.

En la Figura 7 se puede observar la distribución modal (uso del vehículo privado) dentro de la almendra (A-A) y de los viajes que la tienen como destino (F-A). Al aumentar el coste de estacionar, se logra reducir el uso del coche del 16.5% a cerca del 13%. Al reducirse la proporción de usuarios del coche, la congestión baja, pero las distancias medias de recorrido en los escenarios E1 y E2 tienden a aumentar un poco (20%). Este nuevo nivel de equilibrio se debe a que recorrer mayores distancias se ve compensado por el incremento del ahorro de tiempo en coche frente al transporte público (teniendo en cuenta el coste del viaje).

Las emisiones de CO₂ en los diferentes ámbitos analizados, presentan un comportamiento similar al de la demanda de viajes, tal como se puede observar en la Figura 8. Es claro que dentro de la almendra se consigue el propósito de disminuir las emisiones de estos contaminantes, pero se debe tener en cuenta que no se están eliminando, solo se está

trasladando el problema a otras zonas de la región, ya que la demanda presenta una tendencia creciente constante.

4.2. Sensibilidad

Debido a las características particulares del caso de estudio, no todas las variables son sensibles al aumento en los costes de viaje por ingresar a la almendra o estacionar dentro de ella. Por esta razón las mayores variabilidades se presentan en los indicadores que se encuentran en el par OD "Fuera-Almendra", ya que como se sabe, estos son los usuarios que deben pagar la tarifa de peaje. Las tarifas por estacionamiento afectan a estos mismos usuarios y también a los que residen dentro de la zona de estudio. Los rangos de variación y los valores iniciales se muestran en la Tabla 1.

En cualquier año, la mitad de las simulaciones se presentan dentro del intervalo de confianza de 50%, las tres cuartas partes dentro del intervalo de 75% y así sucesivamente. Con este ejercicio se pretende investigar la incertidumbre que rodea la implementación de cobros por congestión. Es claro que según la medida que se tome, ésta causa cambios de comportamiento en los usuarios de una forma casi inmediata.

En la Figura 9 se muestran las incertidumbres asociadas a los viajes en coche generados fuera de la almendra y cuyo destino es el centro, así como su evolución a lo largo del tiempo en los escenarios E1 y E2. En la Figura 10, se muestran las incertidumbres de la distribución modal del coche en la relación OD "fuera-almendra". Se observa que en ambos indicadores y escenarios, los límites exteriores de las incertidumbres (450.000 y 220.000 viajes para la Figura 9 y 33% y 15% de uso del coche para la Figura 10, aproximadamente) son asimétricos respecto a la simulación original (línea continua), lo que significa que los usuarios son mucho más sensibles a un aumento del coste para ir hacia el centro, y que no necesariamente al bajar dicho coste se producirán más viajes.

En la Figura 11, están las emisiones de CO₂ asociadas al uso del coche. Solo se presenta esta relación OD, debido a que como ya se mencionó con anterioridad, esta es la relación en donde se presenta la variabilidad de los parámetros, en las otras relaciones OD no existe variaciones significativas, ya que estos usuarios no son afectados por las tarifas implementadas. Sea cual sea el escenario, las emisiones presentan una tendencia decreciente con el tiempo, al igual que los viajes F-A, esto se debe al proceso de descentralización y dispersión que está viviendo la Comunidad de Madrid (Monzón, A. y De la Hoz D. 2006; Guzmán y De la Hoz D. 2008), la cual se ve acentuada por medidas que restringen aún más el acceso al centro.

Dos cosas se pueden extraer de estos gráficos: primero, la incertidumbre aumenta a lo largo del tiempo (un resultado esperado debido menor fiabilidad de resultados a medida que pasan los años). Segundo, los percentiles no están igualmente espaciados: a un mayor precio, los viajes con destino al centro o el uso del coche, pueden variar en cerca del 50% (con respecto a la media), pero no responden de igual manera si el precio disminuyera, ya que su variación sería menor. Lo que sí es claro que entre más parámetros cambien, mayor será la incertidumbre.

5. CONCLUSIONES

A lo largo de la evaluación del ejercicio, la implementación de un peaje puede llegar a disminuir en cerca de 18% la cantidad de viajes que tengan como destino la almendra de Madrid. Esta medida en combinación con un aumento de tarifas de estacionamiento, puede reducir los viajes en un 5% adicional, ya que esta medida (en E2) también afecta a los usuarios de vehículo privado que residen dentro de la almendra. Pero si se miran solamente los viajes en vehículo privado, estas reducciones pueden llegar a ser del 52% y 56%, respectivamente, lo que quiere decir que los viajes en coche descenderían a más de la mitad. El solo aumento en la tarifa del peaje sería muy significativo sobre los viajeros que se dirigen hacia la almendra en coche (reducciones de cerca del 50%), lo que hace que muchos viajes se trasladen hacia las zonas externas de la región.

Dentro de la almendra central, parece ser se presenta un efecto limitado al hacer el análisis solo por la instalación del peaje. Sin embargo, al variar las tarifas de estacionamiento, si que se observa un gran efecto, de cerca de una reducción de 23% en los viajes en coche y en las emisiones de CO₂. En la Figura 12 se puede observar que en el E1, donde solo se implementa la medida del peaje, poco o nada ocurre con los usuarios del vehículo privado, es decir, su sensibilidad es casi nula al cobro de una tarifa por ingresar al centro. Pero en el E2, donde además del peaje se aumentan las tarifas de estacionamiento, se nota que si existe una gran sensibilidad por parte de los usuarios a esta medida. Según el aumento de la tarifa, los viajes realizados en coche pueden tener una variación de hasta el 25%, respecto al E0. Esto conduce a que utilizar las tarifas de estacionamiento como un medio de gestionar la demanda puede ser un medio efectivo según el objetivo que se desee.

En cuanto a la localización de actividades, se percibe poca interacción con los efectos asociados a la implementación del peaje. Madrid viene presentando una tendencia creciente a la dispersión de actividades y el aumento del coste de ingresar al centro parece ser que contribuye a impulsar pautas de movilidad más difusas en las zonas periféricas. La población presenta altos crecimientos en las zonas externas de la región (entre 130 y 360% aproximadamente), pero es en los puestos de empleo donde el crecimiento es espectacular (entre 560% y 1.300% en las dos coronas más externas), mientras que los empleos en la almendra tienden a mantenerse (Figura 13).

En este caso, se observa que existe una baja interacción entre demanda y la oferta del sistema de transporte y la estructura urbana (localización de actividades). Este comportamiento, claro está, se ve afectado por otro tipo de componente, como la localización residencial, las dinámicas sociales, demográficas o culturales, la configuración espacial (tamaño, usos del suelo, sistemas de transporte, diseño urbano) y los cambios en las pautas de actividad individual. Pero en todo caso pone en énfasis, sobre todo de cara al crecimiento que va a desarrollarse en los próximos años de nuestras áreas urbanas que es necesario afrontar el problema de la movilidad bajo una articulación de los sistemas de transporte y la configuración espacial (tamaño, localización de usos del suelo, diseño urbano, entre otros elementos).

Al analizar todos los resultados obtenidos, la demanda (y todos los efectos que ésta acarrea) cuyo destino es el centro de la ciudad, está disminuyendo en el tiempo y el implementar medidas de cobro solo hace que ésta disminuya más rápido. La demanda que el centro está perdiendo la está absorbiendo otras zonas más periféricas de la región, lo que lleva a pensar que se está produciendo un efecto de dispersión que a la larga hará a la región más

desequilibrada, con viajes más largos y mayor dependencia del vehículo privado. Entonces, es claro que una estrategia óptima no debe consistir en la aplicación de medidas aisladas, sino que por el contrario, debe ser una combinación de ellas que incluyan temas y áreas multidisciplinarias.

La aplicación de una medida de gestión de la demanda, en este caso la instalación de un peaje, tiene efectos directos sobre los patrones de viaje de la población y muy bajos sobre los usos del suelo y sus actividades. El incremento en el coste de usar el vehículo privado para desplazarse hacia el centro tiene el efecto principal de disuadir a usar este modo de transporte y es inmediato. Sin embargo, una estrategia óptima en esta dirección no solo sería crear o incrementar las tarifas del peaje (o de los estacionamientos), sino también combinarlas con otro tipo de medidas, como por ejemplo un aumento en las frecuencias del transporte público, el incentivo a modos alternativos (no motorizados) y otras medidas disuasorias, como la creación de modalidades como el *park & ride*, para los viajeros de fuera de la almendra. Todas estas medidas se enfocarían en la misma dirección: viajes más cortos en coche, más usuarios del transporte público, menor contaminación y en general una reducción en la dispersión de actividades.

6. REFERENCIAS

Ayuntamiento de Madrid, 2008. Plan de Uso Sostenible de la Energía y Prevención del Cambio Climático de la Ciudad de Madrid.

Banister D., Watson, S. And Wood, C. (1997). Sustainable cities, transport, energy and urban form. *Environment and Planning B*. Vol 24, P 125-143.

Cervero R. (1995). Planned communities self-containment and commuting: a cross-national perspective. *Urban Studies*. Vol. 32, P 1135-1161.

Connors R. et al (2007). Sensitivity analysis of the variable demand probit stochastic user equilibrium with multiple user-classes. *Transportation Research Part B*. 41 P 593-615

De Palma A. et al (2005). Congestion pricing on a road network: a study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. *Transportation Research Part A*. Vol 39, P 588-611.

Guzmán García L.A. y De la Hoz D. (2008). Dispersión Urbana. Estudio de la Comunidad de Madrid por Corredores y su Dependencia del Centro. *VIII Congreso de Ingeniería de Transporte*. A Coruña, España 2008.

Hunt J. D., Kriger D. S. y Miller E. J. (2005). Current Operational Urban Land-use–Transport Modelling Frameworks: A Review. *Transport Reviews*. Vol. 25, No. 3 P 329-376.

IRIS Plan (1998). *Regional Mobility Plan*. Ministry of the Region of Brussels, Ovale, Bruselas.

Iturriaga I. y Galarraga X. (2002). Peajes urbanos con objetivos medioambientales. *Ekonomiaz No. 49*, 1º Cuatrimestre.

Kunsch P y Springael J. (2008). Simulation with system dynamics and fuzzy reasoning of a tax policy to reduce CO₂ emissions in the residential sector. *European Journal of Operational Research*. Vol 185, P 1285-1299.

May T. (2000), "The subtle equations of urban mobility". *Interview in RTD Info* 27. September 2000, p. 27.

Monzón, A. y De la Hoz D. (2006). La Movilidad y la Eficiencia Económica. Especial aplicación a la Ciudad de Madrid. *Revista del Instituto de Estudios Económicos Nos. 1 y 2*.

Papola N. et al (2002). Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand. *Transportation Research Part B*. Vol. 36, P 779-798.

Pfaffenbichler, P. (2008). MARS - Metropolitan Activity Relocation Simulator - A Systems Dynamics based Land Use and Transport Interaction Model, *Book, Verlag Dr. Mueller, Saarbruecken*.

Pfaffenbichler, P., Emberger, G., and Shepherd, S. (2008). "The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS." *Journal of Networks and Spatial Economics* (8), 183-200.

Pfaffenbichler, P., Haller, R., Emberger, G., and Pontikakis, E. (2007), "Prediction of land use and transport changes in dynamic environments – modelling the bipolar Vienna – Bratislava metropolitan region." *10th International Scientific Conference MOBILITA '07*, Bratislava.

Pfaffenbichler, P., Ibesich, N., and Emberger, G. (2006). "Can decision making processes benefit from a user friendly land use and transport interaction model?" *Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, Jos P. van Leeuwen and Harry J.P. Timmermans, eds., Springer, Dordrecht, pp. 3-17.

Pfaffenbichler, P., Monzon, A., Pardeiro, A., and Vieira, P. (2006). "Development of a Hierarchical Approach to Assess the Impacts of Transport Policies - The Madrid case study." *Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, J. van Leeuwen and H. Timmermans, eds., Springer, Dordrecht, 19 - 35.

Pfaffenbichler P. (2003). *The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)*. Tesis Doctoral.

Quinto Programa Marco Unión Europea (1998-2003). *Procedures for Recommending Optimal Sustainable Planning of European City Transport Systems*, PROSPECTS.

Rose S. (1998). Valuation of interaction real options in a toll road infrastructure project. *The Quarterly Review of Economics and Finance*. Vol 38, P 711-723.

Shepherd, S., Shires, J., Pfaffenbichler, P., and Emberger, G. (2007), "Improving the capabilities and use of strategic decision making tools." *11th World Conference on Transport Research (WCTR)*, Berkeley.

Sumalee A. et al (2005). Comparison of judgmental and optimal road pricing cordons. *Transport Policy*. Vol 12, P 384-390.

Vold A. (2005). Optimal land use and transport planning for the greater Oslo area. *Transportation Research Part A*. Vol 39, P 548-565.

Wegener, M. (2003). Overview of land-use and transport models. *CUPUM03 – The 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*. Sendai, Japan, Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University.

Shepherd, S., Pfaffenbichler, P., Martino, A., Fiorello, D., and Christidis, P. (2008). "The Effect of Oil Prices on transport Policies for Europe." *International Journal of Sustainable Transportation* 2 (1), 19-40.

Shepherd, S., and Pfaffenbichler, P. (2006). "Sustainable transport policies under scarcity of oil supply." *Engineering Sustainability* 159 (2), pp. 63-70.

Watling D. y Clark S. (2006). Applications of sensitivity analysis for probit stochastic network equilibrium. *European Journal of Operational Research*. 175 P 894-911

Figura 1. Comunidad de Madrid, Zona de Implementación del Peaje y Zona de Estacionamiento Regulado (SER)

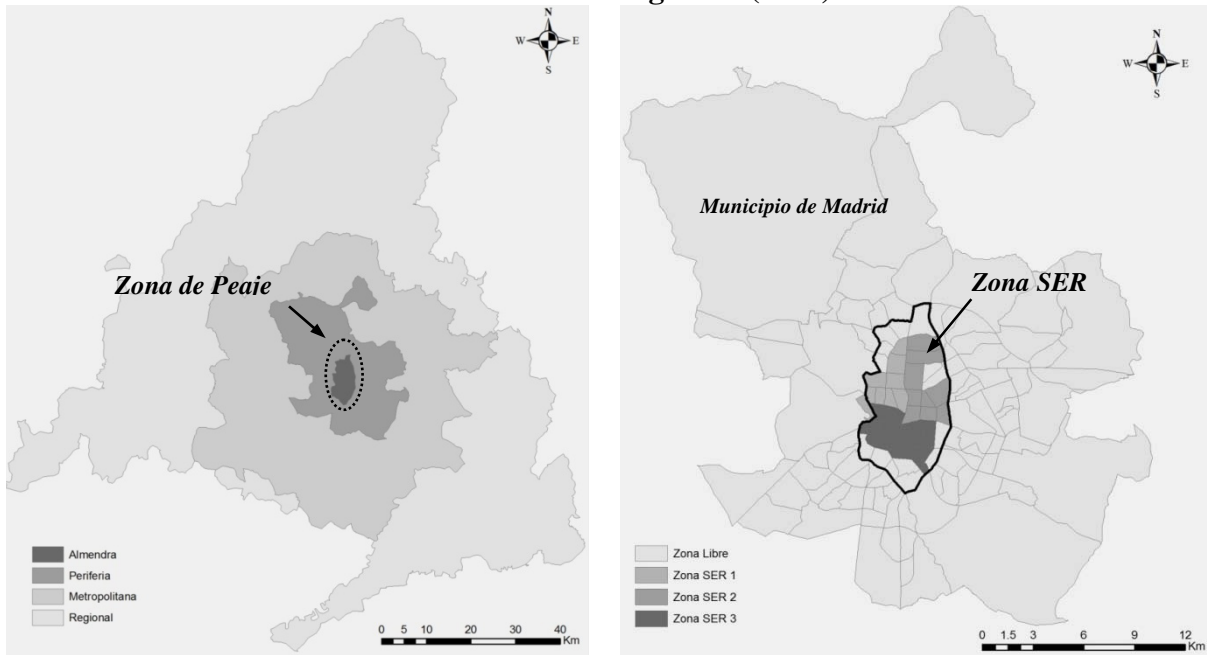


Figura 2. MARS, Modelo de Usos del Suelo y Transporte

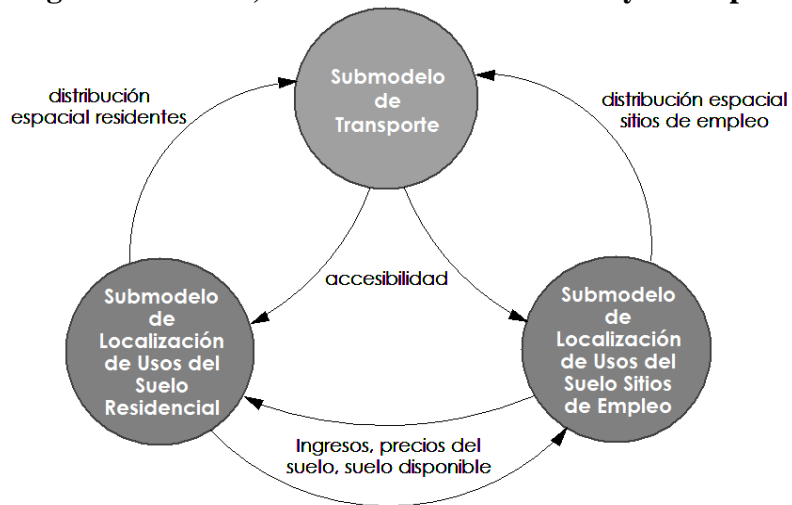


Figura 3. CLD del Modelo de Transporte – Viajes “commuting” en Coche en MARS

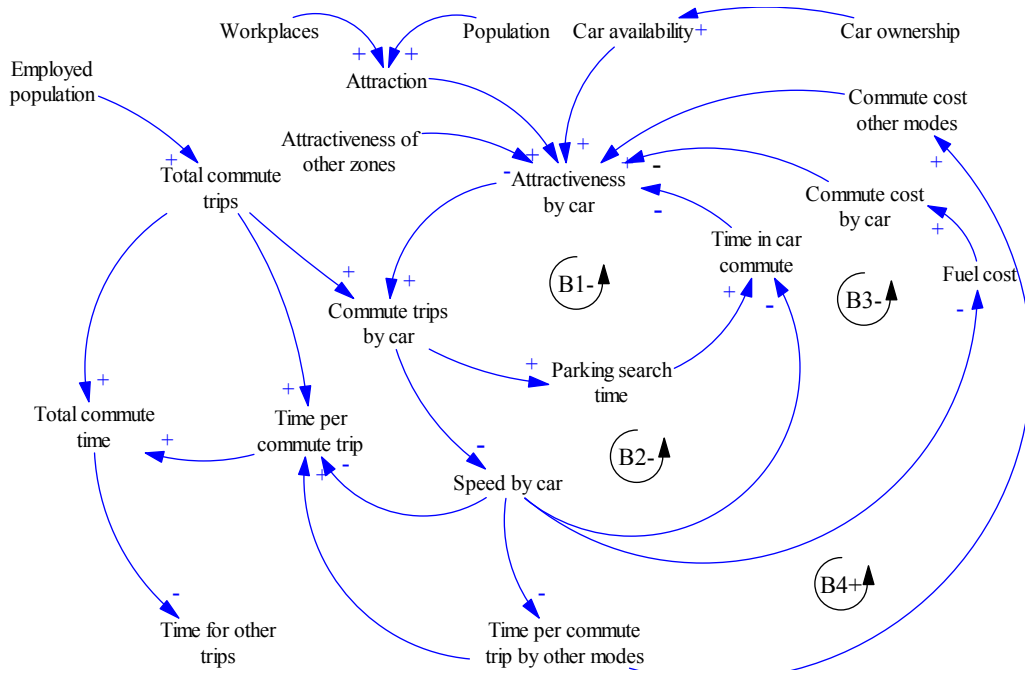
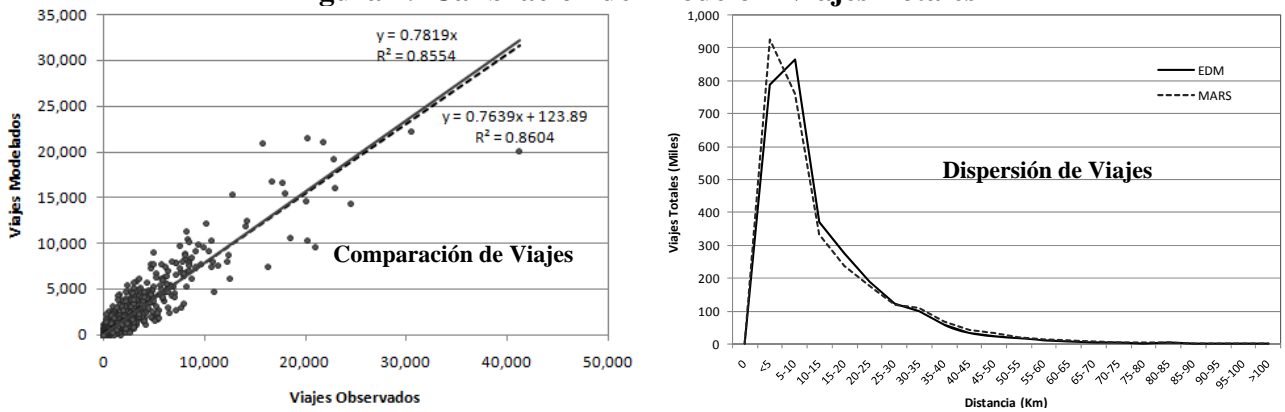


Figura 4. Calibración del Modelo – Viajes Totales



* EDM hace referencia a los viajes observados por la encuesta domiciliaria en Madrid (EDM04).

Figura 5. Viajes Totales y en Coche Dentro de la Almendra

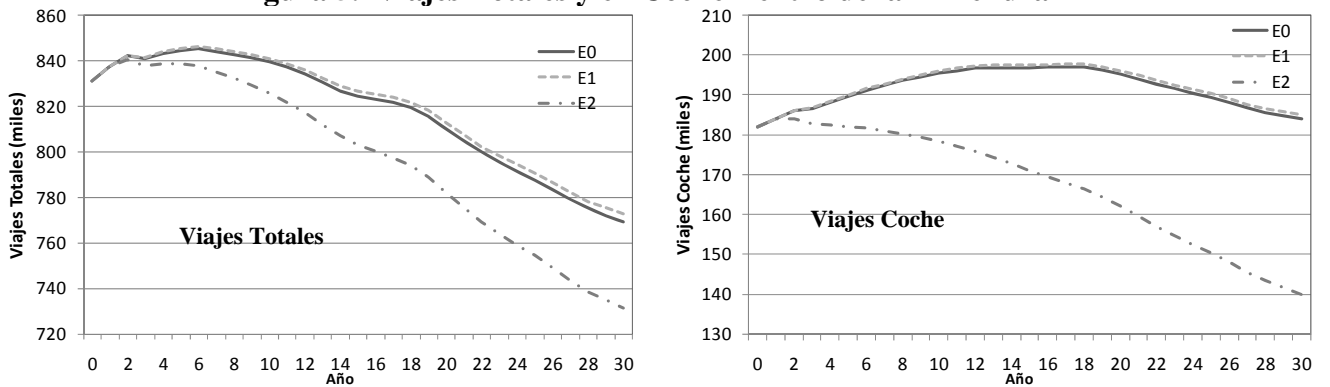


Figura 6. Viajes Totales y en Coche Hacia la Almendra

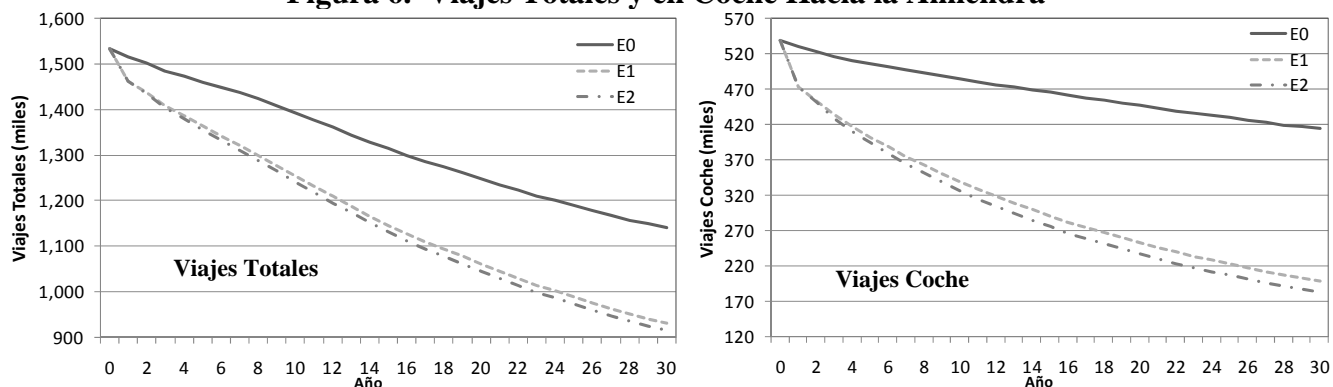


Figura 7. Distribución Modal

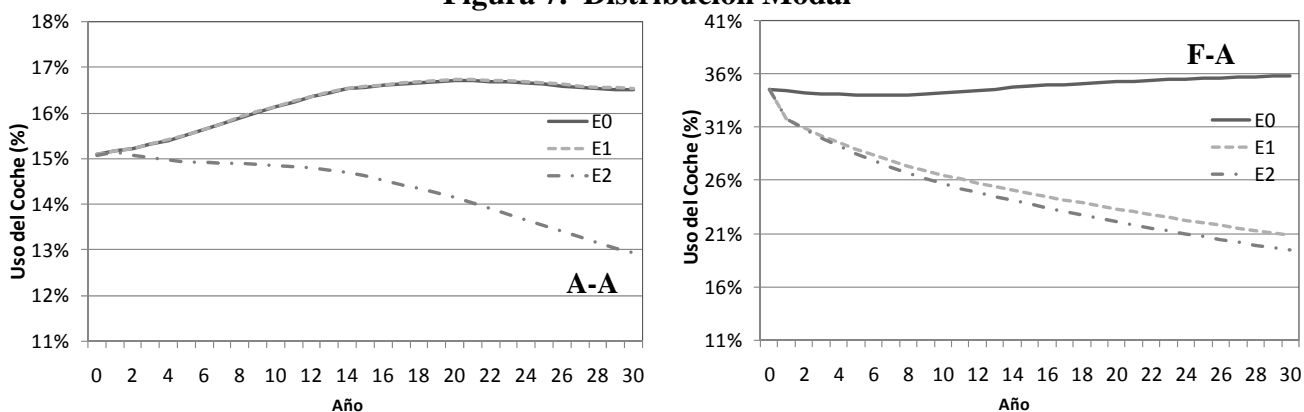


Figura 8. Emisiones de CO₂

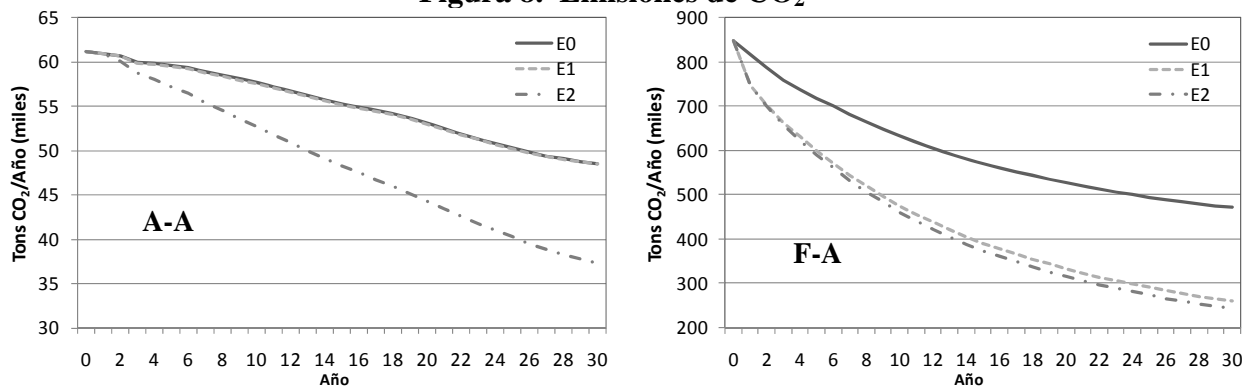


Figura 9. Incertidumbre de Viajes en Coche (Fuera-Almendra)

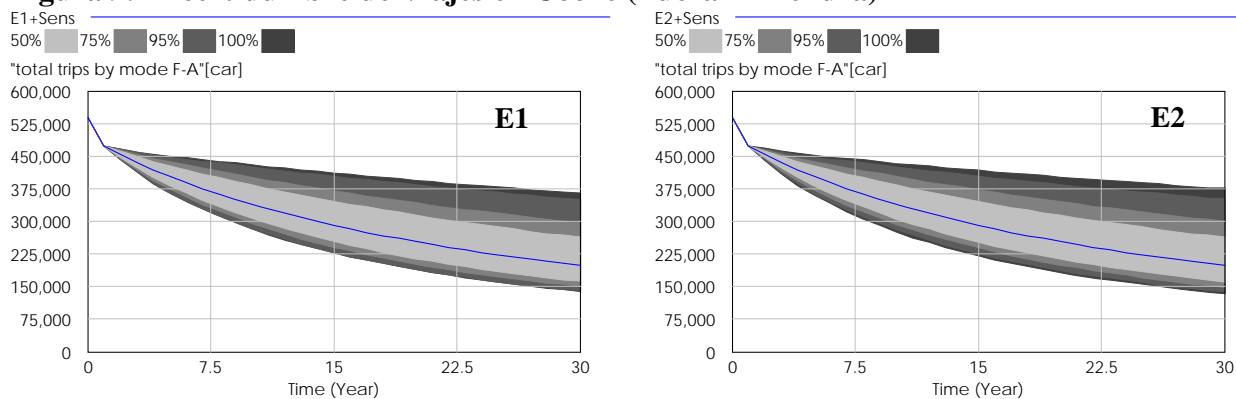


Figura 10. Incertidumbres de la Distribución Modal para el Coche (Fuera-Almendra)

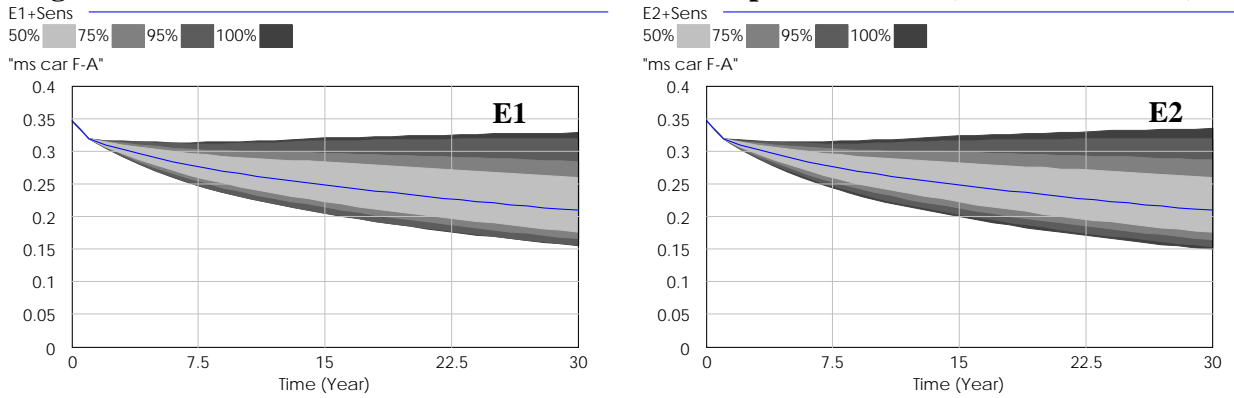


Figura 11. Incertidumbres de las Emisiones de CO₂ del Coche (Fuera-Almendra)

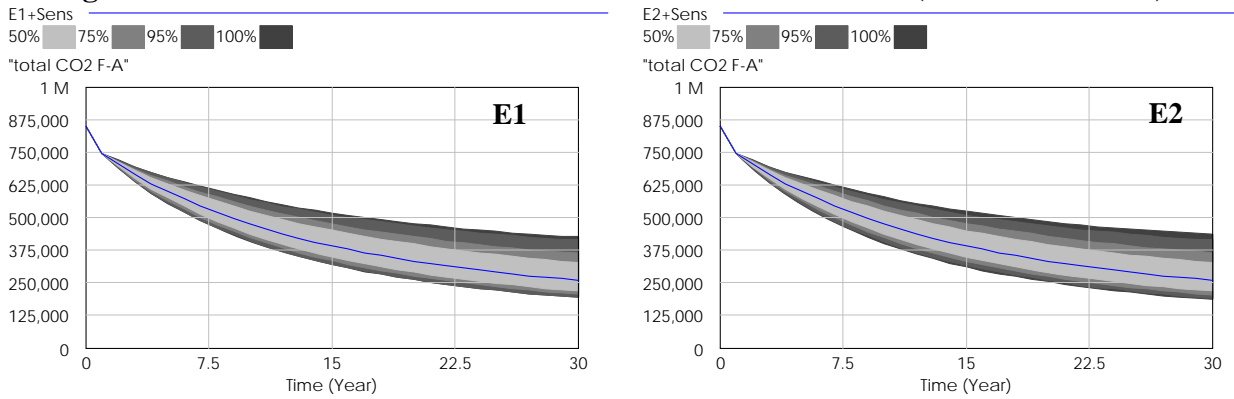


Figura 12. Incertidumbre de Viajes en Coche (dentro de la Almendra)

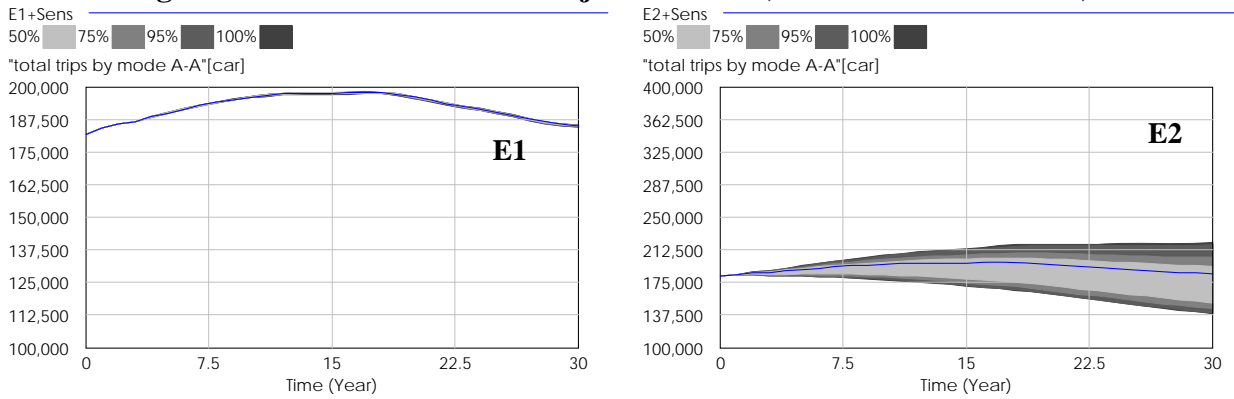


Figura 13. Evolución de la Población y de los Puestos de Empleo por Zonas (30 años)

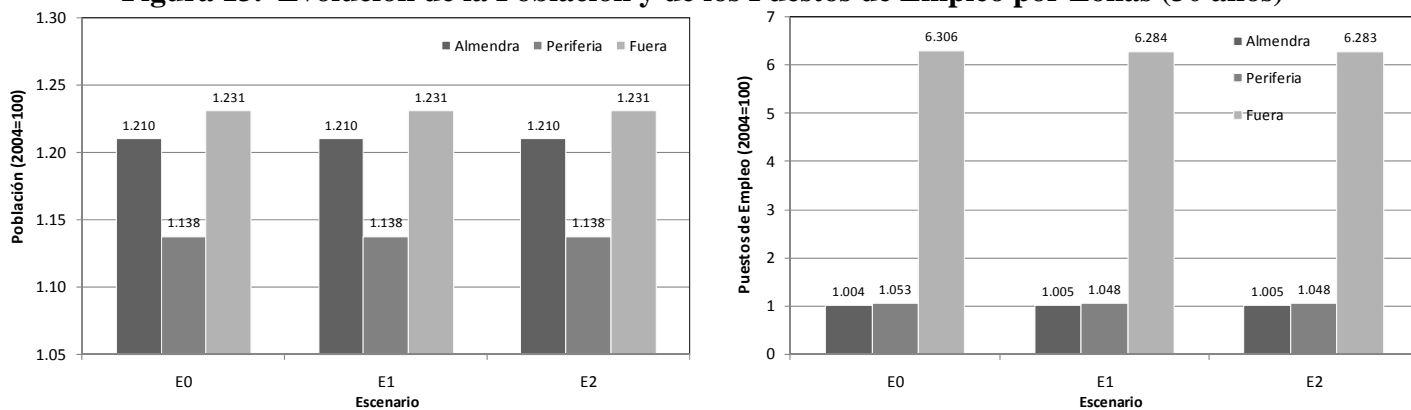


Tabla 1. Escenarios Simulados

Escenario	Peaje		Estacionamientos	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
E0	-	-	Actual*	0%
E1	De 1 a 9 €	0 / 100%	Actual*	0%
E2	De 1 a 9 €	0 / 100%	Actual*	-50 / 100%

* El valor actual varía según la zona SER.