

SIMULACIÓN DE POLÍTICAS DE GESTIÓN DINÁMICAS DE APARCAMIENTO MEDIANTE UN MODELO DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

Andrés Rodríguez Gutiérrez

Universidad de Cantabria

Rubén Cordera Piñera

Universidad de Cantabria

Borja Alonso Oreña

Universidad de Cantabria

Juan Benavente Ponce

Universidad de Cantabria

RESUMEN

A nivel mundial existen experiencias prácticas de políticas de gestión del aparcamiento en la calle basadas en tarifas dinámicas (San Francisco, Los Ángeles y otras ciudades) que han permitido administrar de forma más eficiente los espacios de parking y reducir el número de vehículos en busca de un espacio libre. Para ello, el presente trabajo analiza el impacto que podrían tener, en el comportamiento de los usuarios, diferentes políticas de gestión del aparcamiento en la vía pública.

Para simular los efectos de las distintas políticas, se ha creado un modelo de aparcamiento basado en un submodelo de elección de lugar de aparcamiento y en un submodelo de búsqueda de plaza de aparcamiento. Los parámetros de los submodelos han sido estimados con datos recolectados en un área del centro de la ciudad de Santander (España) y mediante una encuesta de preferencias declaradas respondida por usuarios de aparcamiento.

El modelo ha sido implementado en el software de simulación Aimsun, construyendo una API personalizada programada en Python 3.7. Este modelo ha permitido simular varias políticas centradas en la tarificación de los espacios de aparcamiento en la calle de forma dinámica con actualizaciones de la tarifa en intervalos cortos de tiempo de entre 5 y 15 minutos.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al amplio uso de los vehículos privados, la oferta de aparcamiento es un componente clave en la generación de la congestión del tráfico y los altos niveles de contaminación atmosférica en las zonas urbanas.

En el pasado, la planificación y el desarrollo de políticas de aparcamiento tenían como objetivo ofrecer el mayor número de plazas de aparcamiento posible para facilitar el uso de los vehículos privados. Sin embargo, la búsqueda de plazas de aparcamiento se ha convertido en una dificultad para la mayoría de los usuarios de vehículos privados y en un problema importante que afecta a los sistemas de transporte en las ciudades. La planificación y gestión del transporte se ha enfrentado a varios retos en las últimas décadas.

La mayoría de las ciudades pretenden desincentivar el uso del vehículo privado y promover los modos de transporte no motorizados para la movilidad dentro de las zonas urbanas. Las administraciones públicas tratan de crear zonas peatonales y verdes que puedan dar lugar a ciudades más sostenibles, vivas y seguras. El número de plazas de aparcamiento disponibles en las ciudades se está reduciendo, y el suelo destinado a las actuales plazas de aparcamiento se está utilizando para otros fines con el fin de promover modos de movilidad alternativos y espacios públicos habitables. Por ello, la gestión de las plazas de aparcamiento se ha convertido en un factor esencial para conseguir sistemas de transporte eficientes.

La oferta de aparcamiento en la calle en las zonas urbanas conlleva varias consecuencias negativas. Según un estudio realizado por Shoup (2006), el proceso de búsqueda de aparcamiento representa aproximadamente el 30% del tráfico total en las zonas urbanas. Esta investigación concluyó que la búsqueda de aparcamiento dura entre 3,3 y 14 minutos en las ciudades estadounidenses. Por lo tanto, la búsqueda de aparcamiento conlleva un aumento considerable del tiempo total de viaje de todos los usuarios, no sólo de los que buscan aparcamiento, y un aumento del tráfico y la congestión.

Además, según la RAC Foundation (2012), los vehículos privados están aparcados el 80% del tiempo. Esto significa que hay una ocupación muy ineficiente e infrautilizada del suelo, especialmente en los centros de las ciudades, que de otro modo podría utilizarse para fines más eficientes, como carriles adicionales para el transporte público.

La búsqueda de aparcamiento contribuye a generar tráfico y congestión en las zonas urbanas. Esto conlleva un aumento considerable del tiempo total de viaje de todos los usuarios del transporte y la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. La aplicación de políticas de aparcamiento puede ayudar a gestionar la demanda y reducir los problemas derivados del estacionamiento.

Este estudio pretende explorar y comparar diversas políticas de estacionamiento, especialmente en lo que respecta a la tarificación dinámica del estacionamiento y la limitación de la duración de la estancia en el mismo, para concluir qué medidas de restricción del estacionamiento son más favorables para reducir el impacto sobre el tráfico y el medio ambiente. En primer lugar, se va a hacer un repaso al estado actual de la práctica en cuanto a modelos de aparcamiento y sistemas de tarificación dinámica.

A continuación, se describirá la metodología del modelo de aparcamiento diseñado y, posteriormente se realizará una aplicación práctica describiendo los principales resultados obtenidos para finalmente establecer las conclusiones del estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

La mayoría de las políticas de aparcamiento se basan en estrategias que pretenden desincentivar el uso del vehículo privado (Buehler et al., 2017; Nurdden et al., 2007). Como se ha mencionado anteriormente, las administraciones públicas utilizan estrategias y políticas de aparcamiento para regular y gestionar la demanda y la oferta de aparcamiento.

En primer lugar, una de las estrategias más comunes para reducir la demanda de aparcamiento en las grandes ciudades es el peaje por conducir dentro de la ciudad. Aunque no es una política directa de aparcamiento, tiene un gran impacto en la demanda de estacionamiento. Los precios de los peajes pueden ser más bien fijos; basados en el horario, por lo que varían en función de la hora del día, siendo considerablemente más altos durante los periodos punta; o dinámicos. Por ejemplo, en 2003, la ciudad de Londres introdujo una tasa de congestión de 5 libras diarias por circular por la Inner Ring Road (Blow et al., 2003). Esta estrategia pretendía reducir el tráfico en la zona en un 15%.

En segundo lugar, otra estrategia de aparcamiento habitual es la denominada Park and Ride, que pretende descongestionar los centros urbanos mediante la implantación de aparcamientos en las afueras de las ciudades. Estos aparcamientos están conectados con el transporte público, que transporta a los usuarios al centro de la ciudad. Por ejemplo, la ciudad de Barcelona implementó una estrategia de Park and Ride para descongestionar y reducir las emisiones en la ciudad (Vila Serrano, 2019). En la actualidad hay aproximadamente 1500 plazas de aparcamiento en tres áreas de Park and Ride en las afueras de la ciudad, en los barrios de Besòs, Sarrià y La Ciudad de la Justicia, que se encuentran cerca de las estaciones de tren.

En tercer lugar, la limitación del tiempo de estacionamiento es otra estrategia que restringe el tiempo de estacionamiento para desalentar el estacionamiento de larga duración y promover la rotación del estacionamiento. Los periodos más cortos restringen las actividades de los usuarios, mientras que los periodos más largos fomentan la accesibilidad al aparcamiento para los habitantes de la zona de influencia. Las investigaciones recomiendan que las zonas comerciales establezcan un estacionamiento limitado a corto plazo en el 10-30% de las plazas de aparcamiento para aumentar la actividad de los negocios (Litman, 2020). Al mejorar la rotación de los aparcamientos, los administradores pueden favorecer a los negocios de la zona al aumentar el tránsito y la accesibilidad de los clientes. Aunque la limitación de tiempo es una estrategia eficaz, es difícil de aplicar debido a que los usuarios tienden a trasladar sus vehículos a otras plazas de aparcamiento una vez alcanzada la limitación de tiempo (Simićević et al., 2013).

En cuarto lugar, otras estrategias comunes de regulación del estacionamiento son (Litman, 2016): (i) limitación del acceso al estacionamiento en determinadas zonas solo para residentes u otros usuarios permitidos (vehículos de servicios públicos, usuarios de corta duración, etc.), (ii) restricción del estacionamiento en vías arteriales durante periodos de alta demanda para facilitar el tráfico, (iii) limitación del periodo de tiempo a determinadas horas del día en función del uso deseado del estacionamiento durante cada periodo de tiempo, etc.

Por último, el pago por estacionamiento es otra estrategia común de estacionamiento, en la que un usuario paga por ocupar una plaza de aparcamiento. Esta estrategia puede definirse como tarificación del aparcamiento (Shoup, 2017). El peaje del aparcamiento puede producir múltiples cambios en el sistema de transporte, como la reducción de la propiedad del coche privado, el cambio a modos de transporte activos, la modificación de la ubicación del aparcamiento, los cambios en el horario de transporte, la modificación de la duración de la estancia en el aparcamiento, la reducción del tiempo de viaje de los usuarios (Litman, 2010).

También se suele aplicar para lograr uno o varios de los siguientes objetivos: reducir la congestión del tráfico, disminuir los tiempos de búsqueda de aparcamiento, lograr la tasa de disponibilidad de aparcamiento deseada, aumentar los ingresos derivados de los impuestos de aparcamiento, etc.

En cuanto a políticas de precios, se pueden establecer 2 tipos de medias de gestión. Las tasas estáticas que son una de las tarifas más comunes de aparcamiento. Estas suelen aplicarse durante un periodo de tiempo establecido durante el día cuando se prevé que la demanda del aparcamiento sea mayor. El problema suele ser la infravaloración del precio del aparcamiento dando lugar a pérdidas de bienestar (Arnott & Inci, 2006).

Por otro lado, las tarifas dinámicas permiten adaptar el precio del aparcamiento para lograr una tasa de ocupación óptima. Estas políticas permiten una gestión de precios dinámica en base a la ocupación, sin alterar prácticamente la infraestructura existente, lo que las hace muy atractivas de implantar por los múltiples beneficios que ofrecen. Mediante la gestión de precios se alcanzan unas ratios bastante exitosas también en la reducción de tráfico de cruce y plazas libres ofertadas (Millard-Ball et al., 2014).

Finalmente, en lo que a modelos de aparcamiento se refiere, se ha realizado una comparativa de los principales modelos desarrollados en los últimos años Tabla 1.

Modelo	Tipo	Propósito	Método	Tratamiento del espacio	Modo de búsqueda	Software	Referencia
PARK-SIM	Micró	Simulación de elección de aparcamiento dentro de un lote	Eventos discretos	SI	Gestión de colas	CAD	Young and Thompson (1987); Young and Weng (2005)
SUSTAPARK	Micró	Simulación de aparcamiento en la calle y fuera de la calle	Agentes/automatas celulares	SI	Maximización de la utilidad desde 200m a destino	JAVA sobre ArcGIS	Spitaels and Maerivoet (2008); Steenberghen et al. (2012)
AGENT-BASED PARKING MODEL	Micró	Simulación de aparcamiento en la calle	Agentes	SI	Asignación de radio de búsqueda y aumento progresivo del radio en función de la disponibilidad	MATLAB y MATSim	Waraich and Axhausen (2012)
PARK-ANALYST	Desagregado	Cálculo de la dinámica temporal de la búsqueda de aparcamiento	Solución analítica	NO	hasta llegar a destino maximizando la utilidad y la expectativa de plazas en destino	-	Levy et al. (2013)
PARK-AGENT 1 y 2	Micró	Simulación de aparcamiento en la calle (versión 1) y también fuera de la calle (versión 2)	Agentes	SI	Asigna un tiempo definido tras no encontrar plaza de aparcamiento	Visual Basic/ C programado sobre ArcGIS	Benenson et al. (2008)

Tabla 1 Análisis de diferentes modelos de aparcamiento

3. METODOLOGÍA

A partir del análisis del estado del arte, se ha constatado la escasez de estudios en la literatura internacional sobre el análisis del impacto de la aplicación de diferentes políticas de aparcamiento en la vía pública. Por ello, se ha diseñado un modelo de aparcamiento que permita paliar las carencias de aquellos modelos desarrollados en el estado del arte.

3.1 Modelo de utilidad de plaza

El modelo, basado en agentes desarrollado se codificó en Python 3.7 y 2.7, requerido por la API de Aimsun, y se integró en Aimsun a través de la API proporcionada por este software. Aimsun permite modelar el comportamiento individual de los usuarios dentro de una red de tráfico basándose en diferentes teorías microscópicas de comportamiento, como (i) el seguimiento de coches, (ii) el cambio de carril y (iii) la aceptación de huecos.

El modelo permite simular el comportamiento de los usuarios a la hora de buscar una plaza de aparcamiento vacía en diferentes situaciones, políticas de precios de aparcamiento, porcentaje de usuarios informados, tasas de ocupación, etc. El modelo ayuda a establecer y analizar el efecto de diferentes políticas de tarificación, principalmente estáticas y dinámicas.

Para la definición de los parámetros de entrada se realizó un modelo logit multinomial que define las utilidades de cada una de las alternativas de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$V(Libre) = \beta_0 + \beta_{TD}TD_{Libre} + \beta_{TB}TB_{Libre} + \beta_{OCU}OCU_{Libre} \quad (1)$$

$$V(Calle) = \beta_0 + \beta_{TD}TD_{Calle} + \beta_{TB}TB_{Calle} + \beta_{OCU}OCU_{Calle} + \beta_{TAR}TAR_{Calle} + \beta_{TMAX}TMAX_{Calle} \quad (2)$$

$$V(Sub) = \beta_0 + \beta_{TD}TD_{Sub} + \beta_{TB}TB_{Sub} + \beta_{OCU}OCU_{Sub} + \beta_{TAR}TAR_{Sub} \quad (3)$$

Según esta especificación, la elección de aparcar pagando en la calle depende de la tarifa del aparcamiento (TAR), del tiempo a destino (TD), del tiempo de búsqueda (TB), de la ocupación de las plazas (OCU) y del tiempo máximo posible de estancia ($TMAX$). La alternativa aparcamiento libre depende del tiempo de búsqueda (TB), del tiempo al destino (TD) y de la ocupación de las plazas libres (OCU). En el caso de la elección de aparcamiento privado fuera de la calle (parking subterráneo), la elección dependería de la tarifa (TAR), el tiempo al destino (TD), el tiempo de búsqueda (TB) y la ocupación de las plazas (OCU).

En el segundo nivel de elección de sección de aparcamiento, la elección depende de la utilidad que se derive por aparcar en una sección según la siguiente expresión:

$$V(seccion) = \beta_{TD}TD_{seccion} + \beta_{TB}TB_{seccion} + \beta_{OCU}OCU_{seccion} + \beta_{TAR}TAR_{seccion} + \beta_{TMAX}TMAX_{seccion} \quad (4)$$

Con parámetros y variables similares a las presentadas en la elección de tipo de aparcamiento.

$$V(\text{seccion}) = \beta_{TD}TD_{\text{seccion}} + \beta_{TB}(\gamma_{\text{usuario}}TB_{\text{seccion}} + TB_{\text{acumulado}}) + \beta_{OCU}OCU_{\text{seccion}} + \beta_{TAR}TAR_{\text{seccion}} + \beta_{TMAX}TMAX_{\text{seccion}} \quad (5)$$

La introducción del parámetro dummy γ_{usuario} permite considerar un tiempo de búsqueda esperado igual a 0 en el caso de que el usuario esté informado y sepa que en esa sección encontrará sitio. Por otro lado, las variables (OCU_{seccion}) y (TAR_{seccion}) mediante su modificación, adoptando valores en tiempo real o estándar de la red basados en históricos, permiten introducir las variaciones que afectan a los diferentes usuarios informados o no informados teniendo en cuenta su comportamiento en el modelo.

Por lo tanto, la elección de sección para aparcar depende de la tarifa (TAR), el tiempo a destino (TD), el tiempo de búsqueda de aparcamiento (TB), la ocupación de la sección (OCU) y el tiempo máximo de estancia permitido ($TMAX$) así como del ya mencionado tipo de usuario (γ_{usuario}).

Finalmente, la elección conjunta de tipo y sección de aparcamiento consiste en la especificación de un modelo Logit Jerárquico (HL) en la que la utilidad de la alternativa aparcar en la calle depende de la utilidad máxima esperada de las alternativas que están relacionadas con ella, es decir, de las distintas posibilidades de aparcamiento en las secciones. Estas dos elecciones encadenadas se pueden esquematizar tal y como se muestra en la Figura 1. En este caso, la utilidad de aparcar en la calle vendría dada por la utilidad máxima esperada (EMU), es decir:

$$V(\text{Calle}) = \frac{1}{\lambda}EMU = \frac{1}{\lambda} \ln\{\sum_i e^{[\lambda V(\text{seccion}_i)]}\} \quad (6)$$

En la que λ es el parámetro de escala de la distribución de los términos de error dentro del nido e i son el conjunto de secciones agrupadas dentro de la alternativa aparcar en la calle (o cierto subconjunto de ellas), las cuales pueden presentar un cierto nivel de correlación.

Este segundo tipo de modelización mediante LH permite que las distintas secciones de aparcamiento, en las que se puede aparcar en la calle, pueden presentar cierto nivel de correlación al tener características comunes tanto en su utilidad sistemática como en sus errores aleatorios.

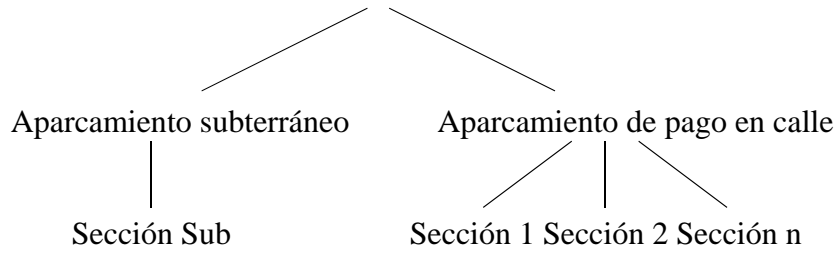


Figura 1 Modelo de elección de tipología y sección de aparcamiento

3.2 Modelo de búsqueda de aparcamiento

El modelo de búsqueda de aparcamiento, como se ha dicho, es un modelo basado en agentes, que, a diferencia de otros, tiene en cuenta diversos factores para asignar distintas utilidades a cada una de las secciones. Para la ejecución del modelo con cada uno de los vehículos se sigue la siguiente secuencia Figura 2

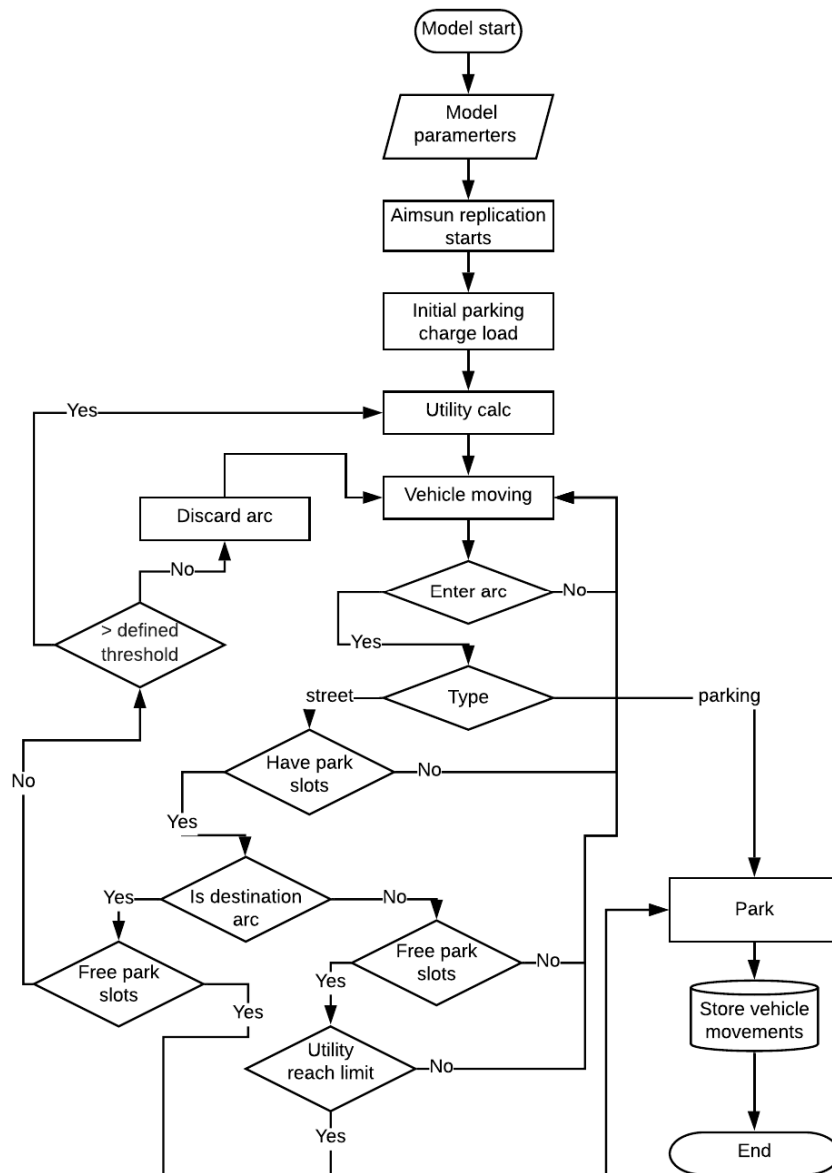


Figura 2 Funcionamiento del modelo de búsqueda

Además de los datos de demanda y oferta de aparcamiento, el modelo requiere la introducción de diversos parámetros del modelo y variables de restricción relacionadas con las políticas de aparcamiento, que se pretenden analizar en el presente estudio. Estos parámetros de entrada del modelo se enumeran la Tabla 2

Variables de entrada del modelo
Tiempo de maniobra de aparcamiento (s)
Tiempo mínimo de estacionamiento (s)
Tiempo máximo de estacionamiento (s)
Ocupación inicial (%)
Rangos de tarifas (€)
Rangos de ocupación (%)
Tarifa estándar en la calle (€)
Tasa estándar fuera de la vía pública (€)
Búsqueda del tiempo de aparcamiento: media y desviación (s)
Máxima utilidad relativa
Tiempo de actualización de la tasa (s)
Porcentaje de usuarios informados (%)

Tabla 2 Variables de entrada requeridas por el modelo

4. APLICACIÓN PRÁCTICA

Para la aplicación del modelo DYNAPARK en un ámbito de estudio real se ha procedido a la modelización de un área de la ciudad de Santander, simulando los escenarios descritos en la Tabla 3.

	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Aplica modelo aparcamiento		X	X
Aplica tarifa fija		X	
Aplica tarifa dinámica			X
Aplica tarifa actual		X	X

Tabla 3 Escenarios ejecutados

Para la aplicación de los cinco escenarios descritos se ha seleccionado un área céntrica de la ciudad de Santander que está ubicada en la zona oriental del centro urbano (Figura 3). El motivo de elección del área viene motivado por la existencia dentro de la misma de:

- Aparcamientos regulados de pago en la calle.
- Aparcamientos privados.
- Aparcamientos privados, de pago, de uso público fuera de la calle.



Figura 3 Área de estudio

Con el objetivo de extraer los parámetros del modelo se realizó una encuesta de preferencias declaradas a usuarios habituales y no habituales de esta zona de aparcamiento. Obteniéndose los parámetros presentes en la Tabla 4

Variable	Parámetro	Z
Tarifa (€/h)	-0.95057	-4.88
Tiempo de Búsqueda (min)	-0.07261	-0.68
Tiempo a destino (min)	-0.07761	-1.15
Ocupación (%)	0.00707	0.71
Tiempo máximo de estancia (h)	0.52876	2.90
Constante Subterráneo	2.59822	4.58
Nido Calle	0.68133	2.79
Log-Likelihood	-69.515	
Log-Likelihood (Null)	-138.629	
Log-Likelihood (Constantes)	-136.591	
McFadden Pseudo R-squared	0.4985	

Tabla 4 Parámetros estimados para el modelo de elección de tipología de aparcamiento y utilidad

El valor elegido para los parámetros de entrada del modelo se ha establecido en base a varios criterios, se muestra en la Tabla 5. Algunos datos de entrada, como el tiempo máximo de estacionamiento y la tarifa general, se han extraído de las ordenanzas municipales que regulan el estacionamiento (Santander, 2014). Otros parámetros, como el precio por hora de los aparcamientos subterráneos, vienen dados por los gestores de éstos y son de conocimiento público. Por otro lado, las crecientes fuentes de información disponibles hoy en día de manera online han permitido la extracción de otros datos, como el tiempo medio de estacionamiento de los vehículos que ha sido obtenido a través de un análisis de los datos del portal de Open data de Santander (Santander, 2021).

Variable	Unidades	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Tiempo parada de estacionamiento	seg.		22.3	22.3
Tiempo mínimo estacionamiento	seg.		300	300
Tiempo máximo estacionamiento	seg.		7200	7200
Ocupación inicial	%		95	95
Rangos tarifa aparcamiento on-street	€h	No se aplica el modelo, cada usuario acude a su centroide final y encuentra aparcamiento	En el caso de aplicación de la tarifa actual no es necesario aplicar tarifas dinámicas	[0.5,1,1.75]
Rangos ocupación on-street	%			[60,80,100]
Tarifa genérica on-street	€h		0.75	0.75
Tarifa aparcamiento off-street	€h		1.60	1.60
Tiempo de búsqueda medio	seg.		240	240
Tiempo de búsqueda desviación	seg.		120	120
Utilidad mínima relativa	%		90	90
Tiempo actualización tarifas	min.		15	15
Usuarios informados	%		No aplica	50

Tabla 5 Parámetros de entrada al modelo de búsqueda de aparcamiento

5. RESULTADOS

Se han realizado 15 simulaciones para cada uno de los escenarios propuestos lo cual permite eliminar la aleatoriedad de los resultados de realizar un número reducido de ejecuciones del modelo. Para poder comparar los resultados obtenidos de forma numérica, se han analizado varios parámetros de salida de la microsimulación como son: consumo de combustible, cola media generada, densidad de vehículos, distancia total viajada por los vehículos, flujo, tiempo de viaje, vehículos dentro de la red, velocidad y emisiones generadas, parámetros todos ellos que nos permiten tener una visión concreta para comparar los escenarios.

Para poder valorar las emisiones de contaminantes se ha usado el modelo descrito por el estudio de Lizasoain-Arteaga et al. (2020). Los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores se muestran en la tabla 6. En dicha tabla se muestran algunos resultados desagregados para los coches en tránsito y los coches que aparcen identificados como “park”.

Indicador	Unidades	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Cola Media - Coche	veh	7.02	22.49	16.59
Cola Media - Coche- park	veh	1.25	24.9	14.1
Consumo de Combustible - Coche	l	167.87	201.71	193.14
Consumo de Combustible - Coche- park	l	29.16	107.51	79.1
Densidad - Todos	veh/km	4.23	27.1	26.29
Densidad - Coche	veh/km	3.65	6.06	5.21
Densidad - Coche- park	veh/km	0.58	21.05	21.09
Distancia Total de Viaje - Todos	km	1056.95	1228.45	1199.76
Distancia Total de Viaje - Coche	km	925.28	920.71	936.17
Distancia Total de Viaje - Coche- park	km	131.67	307.74	263.59
Emisión - Coche - CO2	g	323719.01	384119.86	371121.39
Emisión - Coche - PM	g	99.05	113.53	111.22
Emisión - Coche- park - CO2	g	79239.64	242598.53	184244.02
Emisión - Coche- park - PM	g	29.21	71.95	59.03
Tiempo de Demora - Coche	seg/km	46.8	114.66	88.42
Tiempo de Demora - Coche- park	seg/km	57.25	242.24	212.69
Tiempo de Viaje - Coche	seg/km	116	183.84	157.62
Tiempo de Viaje - Coche- park	seg/km	128.62	312.56	282.49

Tabla 6 Resultados para los 3 escenarios simulados

Como era de esperar se producen 2 efectos. Por un lado, el escenario 1 muestra unos resultados teóricamente más beneficiosos en todos los factores que se han extraído. Sin embargo, en este escenario se ha excluido el tráfico de búsqueda de aparcamiento, por lo que sus resultados no son realistas. Por tanto, queda demostrada la influencia del tráfico generado por la búsqueda de aparcamiento (Shoup, 2005) tal y como se refleja en el incremento de los indicadores en los escenarios 2, y 3 respecto al escenario 1.

Comparando los resultados de los diversos escenarios con el escenario 1, se ve como algunos factores, como el tiempo que los coches permanecen en la red, aumentan significativamente hasta un 26%.

Evidentemente un aumento en el número de vehículos conllevará el consiguiente aumento del consumo de combustible, que se ha estimado en el entorno del 63%, provocando asimismo un aumento promedio del 60% en las emisiones reales que se producen durante el periodo estudiado en la zona. Estos resultados demuestran, por tanto, la relevancia de añadir una capa extra a la microsimulación de vehículos en las ciudades para tener en cuenta todas las maniobras que se llevan a cabo debido al aparcamiento y búsqueda de este. Un aspecto que respalda los estudios realizados sobre la gran influencia del tráfico de búsqueda de aparcamiento en la movilidad de las ciudades.

Una vez demostrada la influencia de los itinerarios de búsqueda y las maniobras de aparcamiento en las simulaciones, es posible analizar los resultados de aplicar un sistema de tarificación dinámica respecto a un sistema de cobro por uso tradicional mediante la comparativa de los escenarios 2 (tarifa actual) y 3. La tabla 7 contiene las variables de salida de la simulación como resultado de aplicar tarifas de forma dinámica. En dicha tabla se comparan los resultados obtenidos en el escenario 3 respecto al 2, donde las diferencias son aún mayores en cuanto a diferenciación de políticas. Todos los indicadores estudiados presentan datos más beneficiosos en el caso de aplicación de tarifas dinámicas y más aún en el caso de tener tarifas máximas más elevadas.

Parámetro	Var. 2/3 (%)	Parámetro	Var. 2/3 (%)
Cola Media - Todos	-35.2	Emisión IEM - Todos - CO2	-11.4
Consumo de Combustible - Todos	-12	Emisión IEM - Todos - PM	-8.2
Consumo de Combustible - Coche- park	-26.4	Tiempo de Demora - Todos	-22.7
Distancia Total de Viaje - Coche- park	-14.3	Tiempo de Viaje - Todos	-14.2

Tabla 7 Comparativa de resultados entre los escenarios 2/3

Es muy llamativa la diferencia que se produce en la variación de las colas medias y en el claro descenso entre escenarios de los consumos de combustible, especialmente de los usuarios que deciden aparcar en la zona. La existencia de usuarios informados, dentro de los escenarios dinámicos, facilita una buena distribución de las plazas, favoreciendo las reducciones observadas.

Al introducir tarifas dinámicas se producen 2 fenómenos, por un lado, la reducción del consumo de combustible y por otro de las emisiones.

Cuantificado el ahorro para esta zona en el caso más significativo, supondría un consumo de 24,40 litros menos de combustible cada hora, un ahorro de unos 0.10€ para cada usuario y aparcamiento en el caso analizado. En niveles de contaminantes supondría una reducción importante de emisiones de CO_2 y otros contaminantes a la atmósfera debido a la disminución del tráfico de paso, tanto al introducir tarifas dinámicas como al subir las tarifas.

En contraprestación, el modelo arroja que los usuarios aparcarían más lejos del destino, incrementando sus tiempos de acceso a la actividad para la que se desplazaban debido a la variabilidad de tarifas. Entre el escenario 3 dinámico y el escenario 2 actual se produce una diferencia de distancias en acceso a destino de 25 metros, siendo 155.78m para el escenario dinámico y de 130.03 para la situación actual. Este aumento de distancia es debido al mayor peso que tiene entre los usuarios aparcar en plazas más baratas y libres, al estar presentes las tarifas dinámicas, penalizando en cierta medida la cercanía con el destino final, pero mostrando unos resultados globales muy positivos en relación al resto de variables.

Por otro lado, empleando los datos de las 15 iteraciones para cada uno de los escenarios, se han extraído, mediante el empleo de la API del software de microsimulación y el empleo del lenguaje de programación Python, resultados comparativos de los usuarios que aparcan de los escenarios 2 y 3 en función del tipo de usuario tal y como se refleja en la tabla 8. Cabe destacar que el escenario 2 no contempla la diferenciación entre usuarios informados o no, por lo que se ofrece el conjunto de los resultados.

Parámetro Tipo usuario	Esc. 2	Esc. 3		
	Conjunto	Informado	No Informado	Conjunto
Distancia recorrida media	1163.92	650.31 (-44.13)	1258.16 (8.1)	943.86 (-18.91)
Distancia a destino media (m)	130.03	183.66 (41.24)	125.93 (-3.15)	155.78 (19.8)
Promedio de Intentos de aparcamiento	3.43	1.01 (-70.55)	3.78 (10.2)	2.35 (-31.49)
Tiempo de búsqueda medio (min)	9.00	3.66 (-59.33)	7.32 (-18.67)	5.43 (-39.67)
Usuarios de aparcamiento off-street (%)	21.91	34.63 (58.06)	15.72 (-28.25)	25.5 (16.39)
Usuarios que aparcan en una sección diferente a la de máxima utilidad (%)	33.61	14.4 (-57.16)	36.58 (8.84)	25.11 (-25.29)

Tabla 8 Resultados de distintos indicadores en los escenarios con usuarios que aparcan (Entre paréntesis el porcentaje de variación respecto al Escenario 2)

Los indicadores ponen en evidencia la diferencia existente dentro de los mismos escenarios entre los tipos de usuario. En primer lugar, la distancia media recorrida por cada usuario desciende entre los escenarios dinámicos y con tarificación estática, e incluso se reduce un 48% entre usuarios informados y no informados en el escenario 3.

Estrechamente relacionado con la distancia recorrida, se puede analizar el promedio de intentos de aparcamiento, es decir, el número de veces que cada usuario intenta aparcar en una plaza en la calle. Este indicador baja significativamente en el conjunto de los usuarios, siendo inferior a 1, o en torno a 1, en el caso de tarificación dinámica más barata para usuarios informados, quienes en la mayor parte de los casos acuden directamente a plazas vacías o a aparcamientos privados, cuyo uso también refleja una clara variación. Se observa además un rechazo muy grande al uso del aparcamiento de pago fuera de la calle por su elevada tarifa, en el caso de usuarios no informados mientras que los usuarios informados, hacen un mayor uso de este. Otro de los indicadores relacionados es el tiempo de búsqueda, que se sitúa en torno a los 10 minutos en el caso del sistema sin tarificación dinámica, tiempo similar al de la encuesta realizada por el estudio de Antolín (2019).

Cabe destacar el aumento de la distancia al destino final de los usuarios informados, en parte por el uso del aparcamiento privado fuera de la calle y por acudir a zonas de aparcamiento más alejadas por el menor precio de estas.

5. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha propuesto un modelo escalable de elección y búsqueda de aparcamiento basado en agentes. Este modelo se ha implementado en un software de simulación, el cual ha permitido aprovechar todas las características de este tipo de herramientas para la evaluación de distintos escenarios de aparcamiento. Además, el modelo se ha aplicado en un área de estudio concreto con el objetivo de simular escenarios de aparcamiento en la calle sin y con tarificación dinámica basada en la ocupación en tiempo real de los espacios de aparcamiento.

Las simulaciones realizadas han permitido demostrar la influencia del tráfico de búsqueda de aparcamiento, que no tienen en cuenta los softwares de microsimulación del tráfico existentes, en distintos indicadores. Así se ha comprobado que la densidad de tráfico puede incrementarse en torno al 50%, tal y como reflejaba White (2007) en su estudio para la ciudad de New York, un dato que evidencia la necesidad de simular este tipo de tráfico si quieren obtenerse estimaciones realistas.

Los resultados obtenidos verifican las hipótesis de partida respecto a que la introducción de tarifas dinámicas permite obtener mejoras significativas en todos los indicadores analizados reduciéndose las emisiones (-11.4%), el consumo de combustible (-26.4%) y el número de vehículos en el interior de la zona (-30.3%). Se comprueba la influencia evidente de las subidas de precios en los escenarios analizados, pudiéndose constatar que las mayores tarifas producen unos mejores resultados globales en los principales indicadores analizados. La distribución de los usuarios entre diversos modos de aparcamiento con un aumento del uso de aparcamientos privados del 16.4%, favorece la utilización óptima del área urbana destinada al aparcamiento y permite reducir el tráfico de paso.

Además, se ha probado la influencia de la introducción de usuarios informados de las tarifas y las ocupaciones dentro de la red y se ha modelado su comportamiento a través de un parámetro en el modelo de elección de utilidad de plaza. Este análisis ha arrojado unos resultados positivos para el fomento de las políticas de implantación de información al usuario y se han verificado las predicciones realizadas por investigaciones anteriores (Panja et al., 2011). Los resultados obtenidos arrojan mejoras muy significativas para el tiempo de búsqueda, que se reduce en torno al 60% mediante la introducción de tarifas dinámicas. Estas tarifas también han servido para obtener menores tasas de ocupación, con tan solo una hora de simulación.

Con el desarrollo del modelo y la aplicación de tarifas dinámicas se abren un gran abanico de posibilidades de investigación en este campo de estudio para tratar de detectar tarifas óptimas y estudiar, en un futuro, la influencia de nuevas formas de movilidad como la que pueden generar la irrupción de vehículos autónomos y sus capacidades de estacionamiento también autónomo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada mediante el proyecto TRA2017-85853-C2-1-R del Ministerio español de Economía y Competitividad

REFERENCIAS

- ANTOLÍN, G. (2019). Modelos econométricos para el diseño y la gestión de sistemas de estacionamiento regulado bajo nuevas consideraciones para obtener datos y modelar la elección zonal. *Econometric models for the design and management of regulated parking systems under new co*
- ARNOTT, R., & INCI, E. (2006). An integrated model of downtown parking and traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, 60(3), 418-442.
- BENENSON, I., MARTENS, K., & BIRFIR, S. (2008). PARKAGENT: An agent-based model of parking in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6), 431-439.
- BLOW, L., LEICESTER, A., & OLDFIELD, Z. (2003). London's congestion charge.
- BUEHLER, R., PUCHER, J., GERIKE, R., & GÖTSCHI, T. (2017). Reducing car dependence in the heart of Europe: lessons from Germany, Austria, and Switzerland. *Transport Reviews*, 37(1), 4-28.
- FOUNDATION, R. A. C. (2012). *Keeping the Nation Moving*.
- LEVY, N., MARTENS, K., & BENENSON, I. (2013). Exploring cruising using agent-based and analytical models of parking. *Transportmetrica A: Transport Science*, 9(9), 773-797.
- LITMAN, T. (2010). *Evaluating public transit benefits and costs: Best Practices Guidebook*.
- LITMAN, T. (2016). *Parking management: strategies, evaluation and planning*. Victoria Transport Policy Institute Victoria, BC.
- LITMAN, T. (2020). *Pandemic-resilient community planning*. Victoria Transport Policy Institute.
- LIZASOAIN-ARTEAGA, E., INDACOECHEA-VEGA, I., ALONSO, B., & CASTRO-FRESNO, D. (2020). Influence of traffic delay produced during maintenance activities on the life cycle assessment of a road. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120050-120050.

- MILLARD-BALL, A., WEINBERGER, R. R., & HAMPSHIRE, R. C. (2014). Is the curb 80% full or 20% empty? Assessing the impacts of San Francisco's parking pricing experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 63, 76-92.
- NURDDEN, A., RAHMAT, R., & ISMAIL, A. (2007). Effect of transportation policies on modal shift from private car to public transport in Malaysia. *Journal of Applied Sciences*, 7(7), 1013-1018.
- PANJA, B., SCHNEIDER, B., & MEHARIA, P. (2011). Wirelessly sensing open parking spaces: Accounting and management of parking facility. 17th Americas Conference on Information Systems 2011, AMCIS 2011, 3, 2408-2413.
- SANTANDER, A. D. (2014). Ordenanza reguladora estacionamiento Santander. In. Santander: Ayuntamiento de Santander.
- SANTANDER, A. D. (2021). Datos Abiertos Santander. In.
- SHOUP, D. (2017). *The high cost of free parking: Updated edition*. Routledge.
- SHOUP, D. C. (2005). The high cost of free parking. In *Journal of planning education and research* (Vol. 17, pp. 3-20).
- SHOUP, D. C. (2006). Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), 479-486.
- SIMIĆEVIĆ, J., VUKANOVIĆ, S., & MILOSAVLJEVIĆ, N. (2013). The effect of parking charges and time limit to car usage and parking behaviour. *Transport Policy*, 30, 125-131.
- SPITAELS, A. K., & MAERIVOET, S. (2008). An empirical agent-based model of parking behaviour An empirical agent-based model of parking behaviour. *Transport*(July 2008), 1-20.
- STEENBERGHEN, T., DIEUSSAERT, K., MAERIVOET, S., & SPITAELS, K. (2012). Sustapark: An agent-based model for simulating parking search. *URISA Journal*, 24(1), 63-76.
- VILA SERRANO, F. D. B. (2019). Anàlisi social-econòmic de la implantació del Park & Ride a l'àrea metropolitana de Barcelona. Cas pràctic a Castellbisbal Universitat Politècnica de Catalunya].
- WARAICH, R., & AXHAUSEN, K. (2012). Agent-based parking choice model. *Transportation Research Record*(2319), 39-46.
- WHITE, P. (2007). No Vacancy: Park Slope's Parking Problem and how to fix it. In *Transalt.org*.
- YOUNG, W., & THOMPSON, R. (1987). Parksim/1: a Computer Graphics Approach for Parking-Lot Layouts. In *Traffic Engineering and Control* (Vol. 28, pp. 120-123). *Data And Parking Simulation Models, Simulation Approaches in Transportation Analysis* 235-267