

---

## CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ELECCIÓN DE CONDUCTORES Y RUTAS EN UN ESTACIONAMIENTO PARA UNA SUBRUTINA DE SIMULACIÓN

Félix Andrés Caicedo Murillo, Jorge Vargas Villegas  
Escuela de Ingeniería de Transporte e Instituto de Estadística  
Grupo de Configuración de Redes (CORE-PUCV)  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Tel. +56 32 2273744; Fax: +56 32 2218854  
E-mail: [felix.caicedo@ucv.cl](mailto:felix.caicedo@ucv.cl), [jvargas\\_nat@hotmail.com](mailto:jvargas_nat@hotmail.com)

### RESUMEN

Elegir una zona para buscar plazas libres, elegir un camino para desplazarse hacia la zona elegida y en ella elegir una plaza para aparcar son tres procesos distintos. En este artículo se estudia solamente el segundo proceso, y se presenta un procedimiento para generar rutas que representan los desplazamientos de conductores en un estacionamiento. Su utilidad se enmarca en el ámbito de las simulaciones, con directa aplicabilidad en la evaluación de configuraciones de sistemas de control de acceso. Para crear rutas es necesario zonificar, identificar el destino, los puntos de toma de decisión, el sentido de avance que seguirá el conductor, las alternativas disponibles y la utilidad de cada alternativa. Para calibrar el modelo se diseñó un experimento de preferencias declaradas, con lo cual se generaron 1000 rutas para un mismo par de origen-destino. La totalidad de las rutas creadas convergen en el destino, permiten explicar desplazamientos realizados en dos dimensiones, y en comparación con el camino de menor costo son 12% más costosas y usan 3,7 veces más conexiones.

*Palabras clave:* *Parking, Preferencia declarada, Simulación*

### ABSTRACT

Choosing a parking lot, choosing a displacement path towards the chosen parking lot and choosing free spaces in the parking lot are three different processes. This article focuses in the second process, and presents a methodology useful to create routes for cars in parking facilities simulation tools. These procedures are useful in the field of micro-simulations, with direct applications in evaluating the performance of new parking access control and revenue system configurations. In order to animate vehicles in the simulations is necessary to define zones, destinies, decision spots, direction sense for drivers and discrete alternatives. The utility function considers perceived costs related to displacements and other attributes such as visibility and inertia -which are related to the infrastructure and driver behaviour.

A declared preference experiment was designed, in order to calibrate the choice model. It was later used to create 1000 driving routes using the same pair of origin-destination. As a result of this exercise, all the routes created converged; these routes are useful to study displacements in two dimensions; and in comparison with Dijkstra's less cost path, the routes created are 12% more costly and use 3.7 more links.

*Keywords:* *Parking behaviour, Stated preference, Simulations*

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las líneas de investigación que actualmente desarrolla el Grupo de Configuración de Redes (CORE) se enfoca en el estudio de sistemas de control de acceso y recaudación en estacionamientos (PARC), particularmente en la definición de zonas dentro de los niveles de estacionamiento en una edificación. La adquisición e instalación de sistemas PARC modernos implica usualmente un alto costo, sin embargo, es posible generar experiencias de usuarios similares a las de estos sistemas mediante nuevos planteamientos. De esta forma, se espera que uno de estos nuevos sistemas PARC (sin ser de nivel 2) indique en la entrada del estacionamiento la cantidad de espacios disponibles en cada zona (como si fuera de nivel 4); (ver Caicedo, 2005; Caicedo, 2009). En el sistema propuesto el algoritmo principal, que detecta el paso de vehículos y lee sus patentes, no sabe hacia qué zona específica van los conductores pues maneja asociaciones de patente leída/equipo/tiempo. En todo caso, se espera que este algoritmo tome decisiones y en base a los antecedentes recopilados asuma en dónde se encuentra aparcado cada vehículo que ha sido registrado. Para probar el desempeño de este algoritmo se ha optado por adaptar la herramienta de simulación de Caicedo (2005) para que, de forma simultánea, se ejecute una subrutina que represente el análisis inteligente que realiza el sistema con los registros de lecturas de patentes (e.g.: localización del lector, con cuáles zonas está comunicado, el tiempo esperado para salir de la zona, etc.). Esta última subrutina es la encargada de preparar la información sobre la disponibilidad, y su importancia radica en que ésta es la información que utilizan los conductores que llegan al estacionamiento para decidir. Dado que se trata de un proyecto que ejecuta por etapas, y en cada una de ellas se generan conocimientos valiosos, se preparó un artículo específico sobre la calibración de un modelo de elección de conductores desplazándose dentro de un estacionamiento, en búsqueda de módulos o espacios libres. Los hallazgos que surgieron en este proceso se explican a continuación.

## 2. RUTAS Y RECORRIDOS QUE SIGUEN LOS CONDUCTORES

El estudio del comportamiento de conductores que buscan un lugar para aparcar, bien sea en un estacionamiento subterráneo (Caicedo, 2005) o en uno de superficie (ver Finch Station TTC Parking Lot en [www.youtube.com](http://www.youtube.com)) muestra un patrón común: existe poca interacción entre vehículos y la densidad de éstos en los pasillos tiende a cero. La velocidad de conducción en un estacionamiento puede estar regulada por la situación en la que se encuentra el conductor: buscando o abandonando; y en todo caso, se trata de velocidades que rara vez superan los 20 kph, debido a la configuración de los pasillos de un estacionamiento y la distancia entre los módulos. Considerando que el ingreso al estacionamiento es controlado por la disponibilidad de espacios, a excepción de los períodos de abandono masivo, o de diseños de accesos disfuncionales (que pueden bloquear la salida de vehículos), no se dan condiciones que conduzcan al congestionamiento. En las subrutinas de Caicedo (2005) se asume que entre orígenes y destinos (en ese caso, niveles de garaje), los conductores circulan por los caminos más convenientes (el de menor tiempo de recorrido: Dijkstra); una vez que llegan al destino inicia el proceso de búsqueda, plaza a plaza, dentro de cada módulo del estacionamiento. Dentro de un nivel de garaje la utilización de caminos cortos en las subrutinas es válida como supuesto, por ejemplo, cuando los clientes realizan con regularidad un trayecto y el estacionamiento está muy

bien señalizado. Sin embargo, la credibilidad de evaluar un sistema como este, en entornos simulados en los que los conductores no se equivocan y circulan por los caminos más cortos será siempre cuestionable fuera del ámbito de los consultores y los investigadores.

Desde el punto de vista de la infraestructura (y muy simplista por cierto), un estacionamiento es gran cúmulo de pasillos (unos tienen estacionamientos y otros permiten solamente circular), unidos por intersecciones. Sus similitudes con la red vial urbana son tales que todo estacionamiento de uso masivo cuenta con señales de “ceda el paso”, “cebras”, límites de velocidad, prohibición de giros, etc. Supóngase, entonces, que todo trayecto entre una zona de origen y una zona de destino (dentro de un estacionamiento) tiene una o más intersecciones con prioridad definida, que aún para conductores experimentados y conociedores se constituirán como puntos de decisión. Frente a una señal de “ceda el paso” y siempre que sea permitido, el conductor rápidamente tendrá que decidir si continua en tramo recto, gira a la derecha o gira a la izquierda teniendo presente el destino hacia el cual se dirige. Un observador contempla y se pregunta ¿Qué opción tomará el conductor? ¿Será siempre el mismo? Analizando la ruta que resulta al tomar decisiones sucesivas ¿es ésta distinta del camino más corto? Si este ejercicio se repite 1000 veces ¿qué se obtiene?

Hasta ahora se han realizado experimentos en hojas de cálculo para modelar la geometría de un estacionamiento, e.g.: módulos, pasillos, restricciones físicas, conexiones, etc. Con esto fue posible incorporar el algoritmo de Dijkstra para calcular caminos cortos. Posteriormente se realizó la calibración de un modelo Logit de comportamiento para crear rutas, incorporando puntos de decisión. Los modelos Logit han sido utilizados para explicar las decisiones de conductores en temas de estacionamiento (ver Lambe, 1996; Hensher y King, 2001; Thompson et al., 2001). Hay referencias en las que se reportan resultados obtenidos con herramientas de simulación que representan el proceso de búsqueda (Polak y Axhausen, 1989; Caicedo et al., 2006); sin embargo, Bonsall y Palmer (2002) utilizaron una herramienta de simulación en la que los conductores recorren las calles de la ciudad en busca de estacionamiento y también se enfocan en la respuesta de los conductores al recibir información dinámica de la disponibilidad en estacionamientos. Del experimento realizado por (Collura et al., 1989) se concluyó que los conductores siguen una regla de decisión simple: la reducción del tiempo esperado de viaje, sin prestar tanta atención a la información (sobre disponibilidad) que preparan los operadores.

Debe recordarse que este artículo se estudia el comportamiento tal y como ocurre en un estacionamiento subterráneo. En la estructura de decisión propuesta para representar a conductores frente a un punto de decisión, la utilidad determinística es la siguiente:

$$V_{qj} = \theta_j + \beta_j \alpha_q t_{jd} + \gamma_j \delta_j \quad (1)$$

donde,

$j=1, 2, 3$  son opciones de girar a la izquierda, continuar recto y girar a la derecha respectivamente

$t_{jd}$ , es el atributo del costo desde el lugar en que se toma la decisión hasta el destino  $d$ .

Este atributo es considerado ( $\alpha_q=1$ ) cuando el conductor  $q$  conoce el estacionamiento (sino  $\alpha_q=0$ )

$\gamma_j$ , es un parámetro relacionado con la orientación; está acompañado de la atributo  $\delta_j$ , que por defecto es cero en todas las alternativas, pero toma el valor de 1 en la alternativa  $j$  cuando es posible visualizar el destino  $d$  en la dirección  $j$ .

$\beta_j$ , es el parámetro que pondera al costo  $t$  en la dirección  $j$

$\theta_j$ , es el parámetro constante de cada alternativa, que representa la tendencia natural a continuar recto o girar (izquierda/derecha)

En otra referencia (Thompson y Richardson, 1996) se estudiaron las alternativas puntuales (girar a la izquierda, girar a la derecha, continuar, o girar en “U”), también para estacionamientos en superficie, dentro de una estructura jerárquica, pues dentro de cada alternativa se agrupaban los estacionamientos a los que conduce la realización de cada maniobra. En este caso el destino es único, (Eq. 1) describe un modelo MNL simple, que fue calibrado después de diseñar un experimento de preferencias declaradas; dicho experimento se describe en la siguiente sección.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología abordada tiene como punto de partida el diseño de un experimento de preferencias declaradas (PD), continúa con la realización del experimento, la estimación de parámetros, y finalmente considera la creación de rutas con el modelo calibrado y los resultados gráficos.

#### 3.1. Obtención de parámetros a-priori

Para diseñar un experimento de preferencias declaradas (PD) es necesario contar con parámetros a-priori; estos pueden encontrarse en estudios previos o artículos, sin embargo en este caso los parámetros fueron obtenidos en un ejercicio de clase de un curso de pregrado. A los estudiantes se les planteó una situación de elección, partiendo de una figura que presenta un automóvil en un estacionamiento detenido en una intersección, justo antes de una señal “ceda el paso”; frente al automóvil había tres señales indicando la dirección que deben seguir para llegar a la salida, sin embargo la salida no se veía en la figura. A los participantes se les invitó a imaginar que estaban dentro del vehículo, en busca de la salida pues ya habían terminado con la actividad que motivó el viaje; también se les pidió indicar dónde creían que estaba la salida, cuánto tiempo necesitarán para llegar a la salida (girando o continuando) y finalmente debían elegir una opción para avanzar -la figura 1 aparece en la versión definitiva.

#### 3.2. Diseño del experimento PD

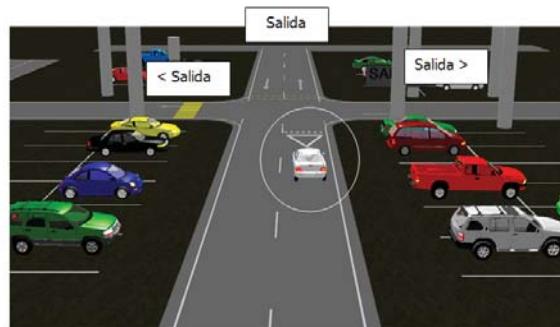
Con el experimento piloto descrito anteriormente se estimaron los parámetros a-priori y se definieron los niveles de atributos, requeridos para diseñar un cuestionario de preferencias de claradas minimizando el D-error (Bliemer y Rose, 2005). Una vez diseñado el cuestionario (ver Anexo), y aprovechando que el 21 de noviembre de 2008 se realizó la primera edición del Seminario Regional Valparaíso OR ([www.inf.ucv.cl/valparaisoOR](http://www.inf.ucv.cl/valparaisoOR)), los asistentes al seminario fueron invitados a responderlo y con sus respuestas se calibró el modelo de elección. Los parámetros estimados se presentan en la Tabla 1. En relación con esta etapa, la estimación se realizó utilizando el software DCM 1.1 (Elkof y Weeks, 2005). El público estaba compuesto por estudiantes de profesores, investigadores, estudiantes de magister y estudiantes de pregrado, con

lo cual es posible describir a los participantes como personas adultas, mayores de edad. En su mayoría eran hombres, pero como se aprecia en la Tabla 1 y la Ecuación (1) en la estimación de parámetros no se consideraron atributos relacionados con la edad o el sexo. Finalmente, los parámetros de la Tabla 1 ponen en evidencia que el proceso de conducción está influenciado significativamente por tendencias, siendo la más fuerte de todas la de continuar recto.

### 3.3. Rutas generadas para las simulaciones

Para apoyar la descripción de los pasos seguidos, que permiten crear las rutas realizadas por un conductor en las simulaciones, se modeló un estacionamiento pequeño y que a-priori se ha dividido en nueve zonas. Debe tenerse en cuenta que las rutas que se estudian en esta sección están relacionadas con un destino dentro del estacionamiento relacionado con una de las grandes cadenas del centro comercial. Los destinos se no varían, y se eligen previamente en base a la utilidad de cada zona de estacionamiento (ver Anexo y Sección 4).

El esquema que se presenta en la Figura 2(a) representa el primer subterráneo del estacionamiento de un centro comercial, en el que por medio de tachones se restringe la circulación interna. Algunos de estos elementos de restricción física, al igual que muros y paredes perimetrales aparecen representados mediante líneas de color gris. En la misma figura, las líneas gruesas de color azul representan el circuito principal, que comunican las zonas de estacionamiento y además permite que los autos se desplacen por todo el recinto; por otro lado, las líneas gruesas de color blanco representan de forma esquemática que, una vez dentro de una zona, existen vías secundarias que permiten llegar a los módulos de estacionamiento. En la práctica, cada una de estas zonas está asociada a una gran cadena de tiendas del centro comercial, contando con puertas principales, ascensores o escaleras eléctricas que comunican directamente con ellas. Utilizando el color fucsia se han representado las zonas de estacionamiento, y como ejemplo, una de ellas ha sido achurada para representar la zona objetivo de un conductor que se dirige a una de las grandes cadenas del centro comercial (asociada a dicha zona); finalmente, en la parte inferior central de la figura se presenta de forma esquemática la rampa de acceso (usando un achurado inclinado a 45° con colores amarillo y negro), que proviene desde el nivel de la calle. De acuerdo con la orientación de la figura, todo vehículo que ingrese por la rampa puede continuar en dirección sur-norte, o bien girar a la derecha. En este estacionamiento no existen vías diagonales, así que las intersecciones tienen forma de cruz o de “T”.



**Figura 1.** Vehículo de color blanco dirigiéndose hacia la salida.

**Tabla 1. Estimación de parámetros**

	Coeficiente	Error estándar	Valor-t	Prob-t
Recto ( $\theta_2$ )	3.3388	0.0170	196.	0.000
Derecha ( $\theta_3$ )	1.1002	0.0172	64.0	0.000
T-búsqueda ( $\beta$ )	-1.9589	0.1746	-11.2	0.002
Orientación ( $\gamma$ )	4.1281	0.0179	230.	0.000

Nota: el número de encuestas fue 79x9 y la verosimilitud -217,6. En la estimación de parámetros  $\theta_1 = 0$  y se asume que en el ejercicio los participantes conocen el estacionamiento,  $\alpha_q=1$ .

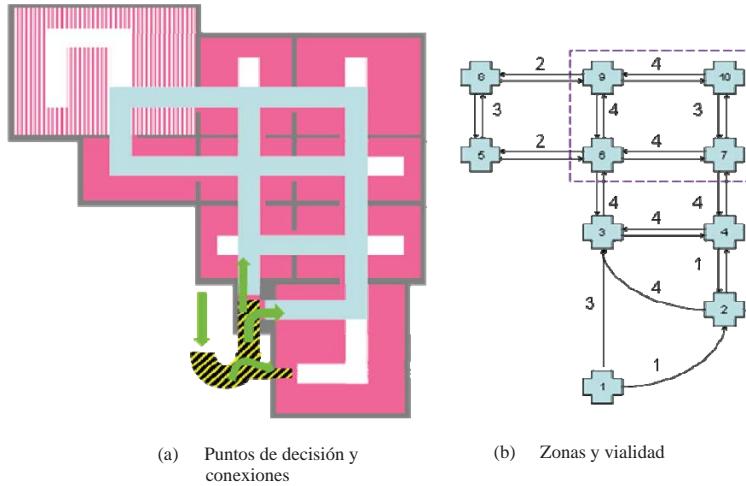
La Figura 2(b) se preparó para representar las zonas del estacionamiento mediante los nodos numerados; también representan los puntos de decisión dentro de cada zona y los tiempos percibidos para cada conexión. Los arcos representan, además de las conexiones entre las zonas de estacionamiento, los sistemas de detección que las vinculan; de esta forma el arco direccionado 8-9 representaría el equipo encargado de registrar autos que salen de la zona 8 y van hacia la zona 9, usando el carril derecho en dirección oeste-este. Particularmente este esquema permite saber en cada punto de decisión, conociendo el sentido de avance y el destino final del conductor, cuál de las zonas está comunicada al girar a la derecha, girar a la izquierda o continuar recto –cuando esté permitido. Finalmente, el cuadro de líneas discontinuas representa las zonas en donde se presentan indicaciones para llegar a la zona 8 (como en un supermercado).

Como bien podrá intuir el lector, el objetivo de trabajar con tiempos percibidos se relaciona con el desconocimiento natural de los conductores, en relación con las distancias entre nodos. Pero considerando que los arcos tienen costo, es posible calcular los caminos más cortos para todos los desplazamientos que tienen una zona de origen y una zona de destino.

Son más numerosas y evidentes las razones que desestiman el uso de caminos cortos en una simulación del comportamiento de usuarios en un estacionamiento, que las que lo avalan. Entre las primeras se encuentra las siguientes:

- Un estacionamiento pobemente señalizado, conductores que no miran las señales, estresados o los que ingresan por primera vez podrían perderse fácilmente.
- Incluso los conductores regulares o habituados pueden distraerse. Los sistemas de navegación típicos, que los vehículos nuevos incorporan de fábrica están preparados para guiar a un conductor, que viene siguiendo un camino sugerido pero se pierde.
- Ante eventos como un vehículo mal estacionado, un carrito de compras a medio camino, una zona que está siendo pintada, etc., un conductor improvisará.
- Un conductor podrá identificar caminos familiares y frecuentes, pero posiblemente no le interesa (o no tiene tiempo para) hacer cálculos relacionados con la distancia recorrida o el tiempo invertido entre desplazamientos.
- Invertir en la búsqueda de un espacio libre tiempos inferiores a 1 minuto suena razonable (refiriéndose al proceso que incluye los desplazamientos, ver Caicedo, 2005), por lo tanto... ¿qué sentido tiene optimizar el proceso? Dicho tiempo está relacionado con la disponibilidad de espacios. Solo en situaciones de escasez el tiempo de búsqueda aumenta; y en dicho caso, la prioridad es encontrar un espacio.

Sin embargo, conceptos como la intuición de los conductores o contar con una buena señalización en el estacionamiento pueden hacer que los desplazamientos realizados durante el proceso de búsqueda sean más eficientes.



**Figura 2. Representación de un estacionamiento dividido en zonas**

La idea principal, entonces, es generar rutas entre puntos de decisión incorporando rutinas de elección basadas en modelos Logit. En el procedimiento de creación de rutas desde un origen, es necesario identificar (1) el destino, que se considera invariable, (2) los puntos de toma de decisión de todo el estacionamiento, (3) el sentido de avance que seguirá el conductor, (4) las alternativas disponibles, (5) finalmente, la utilidad de cada alternativa.

Los puntos 2 y 3 tienen que ver con el “presente”, básicamente el procedimiento de creación representa un conductor que sabe hacia dónde se dirige (punto 1), y en cada punto de decisión elige realizar una maniobra. Toda decisión que tome tendrá implicaciones, y allí surge el balance. Los puntos 4 y 5 están relacionados con el modelo de elección de la Sección 2; específicamente conviene determinar características relacionadas con la visibilidad del destino desde cada punto de decisión y el costo percibido desde el punto de decisión hasta el destino. En relación al costo percibido, cada nodo está referenciado la sumatoria de costos de los tramos incluidos en el camino más corto; esta información solamente se utiliza como atributo en la toma de decisión. Para evitar la toma de decisiones irracionales, se impide que durante la creación de una ruta se considere como alternativa el nodo asociado al punto de decisión o el último nodo que fue elegido. Con anterioridad se calcularon los caminos más cortos y los costos asociados a cada par de orígenes y destinos. Una vez que se identifican las alternativas y sus atributos, se calculan las probabilidades de elección y se definen intervalos de probabilidad.

Las decisiones se simulan en una hoja de cálculo, apoyándose en una típica función que genera números uniformemente distribuidos [0,1]. La ruta es memorizada en forma de un vector, cuya primera posición es el punto de decisión en el que inicia la ruta, y las demás celdas son los otros puntos de elección visitados; la última posición del vector almacena el destino y se detiene el proceso de creación de rutas. El destino es el único lugar del recorrido (ruta) en donde el conductor buscará un espacio libre –que es otro proceso (ver Caicedo, 2005). Entre las conclusiones de esta sección resalta que, en la totalidad de los experimentos realizados las rutas convergen, es decir, que terminaron en el destino y que en ningún caso fue necesario reiniciar el computador porque la aplicación MS-Excel no respondía. Finalmente, en esta etapa no fue posible dar indicaciones sobre el tamaño del vector que indica la cantidad de puntos de elección visitados.

### 3.4. Análisis de los resultados

Con el objetivo de estudiar los patrones de las rutas creadas, se programó un macro en una hoja de cálculo, para realizar 1000 rutas para el mismo par de origen destino 1-8. Cada una de las rutas creadas fue memorizada y analizada desde tres perspectivas: nodos visitados, conexiones utilizadas y costo de la ruta.

#### 3.4.1. Nodos visitados

En relación con los puntos contenidos en la ruta, y de acuerdo con la información que se presenta en la Tabla 2, las 1000 rutas incluyen los puntos de decisión 1 y 8, que corresponden al origen y al destino. Como era de esperarse, entre las rutas generadas está el camino más corto {1, 3, 6, 5, 8}, sin embargo, puede notarse en la Tabla 2, que el nodo 9 fue visitado el 55% de las ocasiones y el nodo 5 el 45%, porcentajes muy inferiores al los de nodos 3 y 6. Por otro lado, y aunque con porcentajes muy pequeños (10%-16%) los nodos 2, 4, 7 y 10 también fueron visitados. La información presentada en la Tabla 2 también puede entenderse como el resultado de un proceso de calibración, que indica la probabilidad de circular por la zona  $i$ , cuando el destino es el nodo 8 y el desplazamiento se realiza desde el nodo 1,  $Y_{oid}$ .

#### 3.4.2. Conexiones utilizadas

Al igual que en la sección anterior, durante el proceso de creación de rutas también es posible analizar las conexiones entre los puntos de decisión; más que una tabla, se ha optado por presentar el resultado del análisis de forma gráfica (ver Figura 3). Para desplazarse entre el nodo 1 y el nodo 8, el camino más corto (descrito en la sección anterior) usa solamente cuatro conexiones, de las 25 conexiones definidas entre las 10 zonas de estacionamiento. Sin embargo, las 1000 rutas creadas utilizan 15 conexiones. Aquellas que no fueron utilizadas las que se conducen hacia el nodo de origen, y conscientemente se alejan del destino final. En todo caso, dicha figura representa el porcentaje esperado de rutas que entre el origen 1 y del destino van a utilizar una conexión específica. Finalmente, en la Figura 3 se hace evidente el efecto de la tendencia a continuar en tramo recto (nodo 6), aún cuando el camino más corto implica un giro a la izquierda. Al utilizar como presentación del análisis de esta sección un formato distinto, por ejemplo, una matriz en la que las celdas representan las conexiones (filas representan el punto de elección y columnas representan la alternativa seleccionada), la suma horizontal de las celdas de una misma fila coincide con los valores presentados para cada nodo en la Tabla 2.

#### 3.4.3. Costos de la ruta

La diferencia entre el costo total del camino más corto con el promedio del costo de las 1000 rutas generadas (al igual que la forma, las visitas a cada nodo y el uso de una conexión específica) también depende del estacionamiento que se esté modelando, del comportamiento de los conductores, de la velocidad de circulación o la visibilidad. Pero como un ejercicio

comparativo, se multiplicaron los porcentajes esperados de rutas que utilizan una conexión específica con el costo de cada una de ellas. Como resultado se obtiene que las rutas creadas Son 12% más costosas que el camino más corto.

**Tabla 2. Porcentaje de ocasiones en las que una ruta incluye un punto de decisión**

Puntos de decisión o zona (i)										
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	I=7	i=8	i=9	i=10
Y <sub>1,i,8</sub>	100%	12%	93%	16%	45%	94%	15%	100%	55%	10%

Nota: punto de inicio u origen (o) en el nodo 1; destino o nodo final (d) en el nodo 8

#### 4. POTENCIALES APLICACIONES

El objetivo principal de las secciones anteriores es generar rutas más reales, distintas al camino más corto –no necesariamente seguido por los conductores en un estacionamiento para llegar al lugar preferido. Aún cuando en este artículo no evalúa el desempeño del sistema PARC descrito en la Sección 1, la sección anterior es crucial para dicho objetivo. Debe tenerse en cuenta que ese se apoya en dispositivos de lectura de patentes y que necesita recopilar información suficiente como para concluir en qué zona del estacionamiento cree que un vehículo ha aparcado. De momento no se cuenta con suficientes antecedentes para indicar el tiempo que el sistema tarda en generar un resultado (un pantallazo); pero si son intervalos de tiempo superiores a 30 segundos ¿qué información debe presentarse durante este periodo?

La respuesta a esta pregunta definió una aplicación potencial y de apoyo que se describe en esta sección.

Un típico sistema PARC de nivel 2 fue instalado en el principal estacionamiento del único centro comercial de la ciudad de Viña de Mar, que cuenta aproximadamente con 800 espacios disponibles. Se trata de un sistema que, mediante un panel de información variable (con siglas en inglés, VMS) justo en la entrada, indica si el estacionamiento está completo o si existen lugares libres; sin embargo, dentro del estacionamiento, cada módulo o pasillo de estacionamientos tiene un “lomo de toro” a inicio y al final, y a cada extremo de este dispositivo de reducción de velocidad se han instalado lazos magnéticos. Con este sistema es posible conocer cuándo entra o cuándo sale un vehículo de cada módulo de estacionamiento, y con un simple programa de sumas y restas se le indica a los conductores el estado (libre/completo mediante un pequeño VMS a la salida y a la entrada de cada módulo) dado que la capacidad es conocida y en teoría, cada mañana el estacionamiento está vacío.

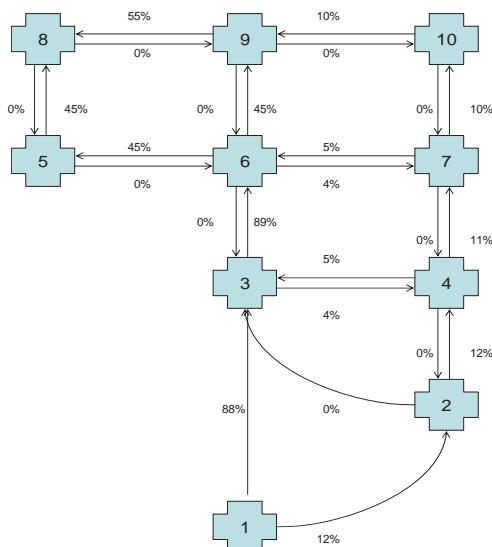
Lastimosamente, los VMS de cada módulo o el de la entrada del estacionamiento no funcionan permanentemente, están fuera del campo visual, los conductores no saben que existen o no comprenden la información que se les da, o desconfían de ella (cuando la ocupación es alta, a menudo se indica que hay lugares libres pero no los hay, lo cual puede deberse al algoritmo utilizado o a un tiempo de espera definido).

Si bien este sistema no está diseñado para dar información más detallada, podría trabajar en red y constantemente analizar la información y los cálculos que realizan los equipos de detección de cada módulo de estacionamiento. De esta forma, la información en los VMS de la entrada podría presentarse en forma cuantitativa e indicar el número de espacios disponible. ¿Cómo puede hacerse esto? Los equipos electrónicos de detección de cada módulo, así como el programa que los controla podrían analizar la tasa de entrada y salida, y en función de la diferencia de estas

concluir si la ocupación aumenta, se mantiene o disminuye. Básicamente, las tasas de entrada y salida de cada módulo están registrando el paso de conductores (ver Anexo) que:

- Quieren aparcar, pero no lo hacen en dicho módulo, por lo tanto ingresan y salen
- Quieren aparcar y efectivamente lo hacen en dicho módulo; ingresan pero no salen
- Quieren aparcar en el módulo pero este está completo, por lo tanto ingresan y salen
- Salen del módulo porque el conductor ha realizado la actividad que motivó el viaje

El análisis en red de la información que registran los detectores de cada módulo, con los equipos y programas adecuados, puede generar un cálculo muy aproximado de la disponibilidad de espacios. Para sistemas PARC de nivel 2, similares al que opera en el centro comercial de Viña del mar, es factible pensar en presentar información numérica (agrupada por zonas y niveles) en el VMS de la entrada. En la configuración descrita en la Sección 1, el análisis de la información que registran los detectores le permitirá al sistema presentar un valor numérico de la disponibilidad de plazas mientras el algoritmo principal realiza el seguimiento de patentes.



**Figura 3. Conexiones utilizadas en desplazamientos para un mismo par origen-destino**

## 5. CONCLUSIONES

Elegir una zona para buscar plazas libres, elegir un camino para desplazarse hacia la zona elegida y en ella elegir una plaza para aparcar son tres procesos distintos. En este archivo se estudia solamente el segundo de ellos, y se presenta un procedimiento útil para generar rutas que representan los desplazamientos de conductores en un estacionamiento; son desplazamientos desde un origen (que puede ser la entrada) hasta un destino fijo, en donde iniciará el proceso de búsqueda de un lugar libre. Con este procedimiento ha sido posible explicar desplazamientos realizados en dos dimensiones (la superficie plana de un estacionamiento), y claramente puede complementarse con otros modelos de elección que se enfoquen en alternativas discretas que representan diferentes alturas o niveles de un estacionamiento.

Para crear rutas el punto de partida es la perfección (el camino más corto), que luego se deforma (involucrando rutinas de decisión y probabilidades), haciéndola imperfecta y por lo tanto más

creíble en la práctica. Como resultado, las rutas creadas con el modelo de elección son 12% más costosas que el camino más corto -en todos los casos evaluados.

Si bien uno de los objetivos de la investigación era validar los procedimientos de creación de rutas discutidos en la sección 3, definiendo criterios de aceptación o rechazo, no ha sido posible establecer un umbral o criterio de credibilidad; sin embargo, se identifican situaciones extremas y útiles intuyendo el punto de vista de los operadores de estacionamientos y profesionales del ámbito: mientras más alejadas o distintas sean (en términos de forma y costo) las rutas creadas del camino más corto, menos cuestionamientos tendrán los estacionamientos, las configuraciones modeladas y las propuestas que surjan de un estudio realizado por investigadores y consultores; pero si el costo total del desplazamiento es superior a 30 minutos entonces es más factible pensar que el conductor abandonó el proceso.

Dentro de estos grandes extremos está localizada la credibilidad y validación externa de los resultados. La diferencia, en términos de forma, y costo total que resulta al comparar una ruta creada según los lineamientos descritos en este artículo, y el componente probabilístico implícito en la creación de cada una de ellas es lo que permitirá evaluar el desempeño de cualquier configuración de sistemas PARC, en base a la herramienta de simulación (entorno y comportamiento de usuarios) descrita por Caicedo et al. (2006). Como resultado final, se crean rutas distintas al camino más corto, basadas en el comportamiento de usuarios en situaciones de elección reales; por lo tanto las rutas creadas se alejan de ser un ejercicio teórico y se acercan al comportamiento real.

El cuestionario PD no incluye una alternativa en la que los participantes puedan manifestar su indiferencia; aunque en una situación real los conductores no pueden permanecer detenidos en un punto de decisión sin verse forzados a tomar una decisión. En investigación no se enfocó en el análisis de observaciones repetidas o el comportamiento lexicográfico de los participantes. Aunque el corazón de este artículo era distinto, los autores están convencidos que la realización de los estudios anteriormente mencionados conducen a un mayor apoyo para los resultados obtenidos; consecuentemente y en base a ello se ha definido una futura línea de investigación.

## AGRADECIMIENTOS

A las familias Caicedo-Murillo, Silvetti-Franco y Salinas-Reyes por su apoyo, también a los profesores de la EIT, IRAT Ltda., Luz María en el DUOC-UC y a los miembros del grupo CORE. A María Silvetti por quererme, y a Francesc Robusté por el muy oportuno e inspirador envío del video del estacionamiento de Finch Station TTC.

## REFERENCIAS

- Bonsall, P. y Palmer, I. (2002). Modelling drivers' car parking behaviour using data from a travel choice simulator. **Transportation Research Part C** 12, 321–347
- Bliemer M., y Rose, J. (2006). Designing stated choice experiments: The state of the art, accepted for presentation. **11th International Conference on Travel Behaviour Research** - August 16-20, Kyoto, Japan.

Caicedo, F., Robuste, F., y Lopez, A. (2006) Parking Management and Modeling of Car Park Patron Behavior in Underground Facilities. **Transportation Research Record**, (1956), 60-67.

Caicedo, F. (2009) The use of space availability information in PARC systems to reduce search times in parking facilities. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. Volume 17, Issue 1, 56-68

Caicedo, F. (2005) **Gestión de aparcamientos subterráneos**. Edicions UPC.

Collura, J., Fisher, D y Holton, A. (1998) Advanced parking management systems: strategic management of intermodal junctions. **Publication of Transportation Center of University of Massachusetts and New England University**. Transportation Center of Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.

Elkof M. y Weeks, M. (2005) **Discrete Choice Model (DCM): An Object Oriented Package for Ox**. <http://www.econ.cam.ac.uk/DCM/DCMWebPage.htm>

Garber y Hoel (2005). **Ingeniería de Tránsito y Carreteras**. 3<sup>a</sup> Ed. Thompson Learning. Bogotá.

Hensher, D; King, J. (2001) Parking demand and responsiveness to supply, pricing and location in the Sydney Central Business District. **Transportation Research Part A**. 2001. 35(3), 177-196.

Lambe, T. (1996) Driver choice of parking in the city. **Socio-Economic Planning Sciences**. Volume 30, Issue 3, 207-219. Pergamon-Elsevier Science Ltd., Oxford, U.K.

ParkHelp, (2007) The Intelligent Car Park Guidance System. [http://www.parkhelp.com/parkhelp\\_guidance\\_system/thesystem.html](http://www.parkhelp.com/parkhelp_guidance_system/thesystem.html)

Polak, J. y Axhausen, K. (1989). CLAMP: a macroscopic simulation model for parking policy analysis. **Proceedings of the 68th Annual Meeting of Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, DC.

Thompson, R. y Richardson, A (1998). A Parking Search Model. **Transportation Research Part A**, Vol. 32, No. 3, pp. 159-170

Thompson, R., Takada, K. y Kobayakawa, S. (2001) Optimization of Parking Guidance and Information Systems Display Configurations. **Transportation Research Part C**. 9(1), 69-85.

## Anexo: Flujos registrados por equipos de detección en sistema PARC nivel 2

Los sistemas de detección son muy variados. Con el objetivo estricto de contar vehículos que están circulando y no han encontrado un lugar libre se utilizan los detectores ultrasonido y los micro-contadores (ParkHelp, 2007). Por otro lado, están aquellos equipos que detectan la presencia de vehículos por medio de lazos inductivos y sensores piezoeléctricos. Este es el caso del estacionamiento del centro comercial de Viña del Mar. La Figura 4 representa de forma esquemática la ubicación de los sistemas de detección de vehículos, instalados bajo dos “lomo de toro” (color amarillo) a ambos extremos de un pasillo o módulo de estacionamiento. Las plazas de estacionamiento están representadas con cuadros blancos atravesados con diagonales, y la vía de circulación o de realización de maniobras está pintada de color rosado. Dentro del estacionamiento no circularán vehículos de más de dos ejes, los sensores se registran pares de ejes, identificando el sentido de avance; de esta forma se determina si el vehículo ingresa o sale del módulo de estacionamiento.

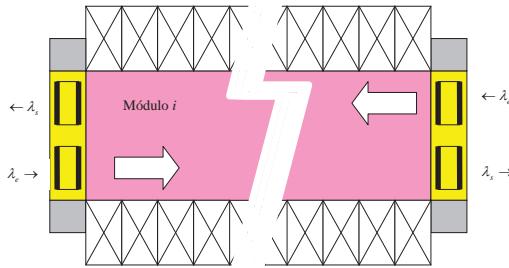


Figura 4. Sistema PARC nivel 2 en centro comercial de Viña del Mar

Considérese que el estacionamiento está dividido en zonas, los conductores tienen información sobre la disponibilidad y cada una de ellas está asociada a uno de los destinos (grados cadenas, cines, patio de comida u otros) del centro comercial de forma tal que la elección de una de ellas se explica de la siguiente forma:

$$V_{oit} = \theta_1 a_{ig} + \theta_2 w_{ih} + \theta_3 d_{it} + \theta_4 r_{oi} + \theta_5 \quad (2)$$

$$P_{oit} = \exp(V_{oit}) / \sum \exp(V_{oij})$$

donde,

$\theta_i$ , son parámetros

$a_{ig}$ , es el tiempo de acceso entre la zona  $i$ , y el almacén de destino  $g$

$w_{ih}$ , es el tiempo de caminata entre la zona  $i$ , y el punto de acceso  $h$  (e.g.: puerta, escalera, ascensor)

$d_{it}$ , es la cantidad de plazas disponibles informadas para la zona  $i$ , en el tiempo  $t$

$r_{oi}$ , es el tiempo conduciendo desde el lugar de la toma de decisiones,  $o$ , hasta la zona  $i$

$P_{oit}$ , es la probabilidad de elegir la zona  $i$ , en el tiempo  $t$ , desde el lugar de la toma de decisiones,  $o$ , para buscar un espacio libre

La disponibilidad de espacios se describe de la siguiente forma:

$$R_{t,i} = \begin{cases} R_{t-1,i} + \sum_{n=1}^t \sum_{m=1}^s \lambda_n^m P_{odt}; n+s=t \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

donde,

$R_{t,i}$ , es la disponibilidad en la zona  $i$ , en el tiempo  $t$

$\lambda_n^m$ , es la tasa de llegadas al estacionamiento en la hora  $n$ , y estadía  $s$

Por otro lado, la tasa de salida se compone de los siguientes elementos:

$$\lambda_{si} = \sum_o \sum_d \xi_{1i} + \sum_o \sum_d \xi_{2i} + \sum_o \sum_d \xi_{3i} \quad (4)$$

donde,

$\xi_{1i}$ , son los vehículos que salen por tiempo cumplido

$\xi_{2i}$ , son los vehículos que han sido reasignados, después de elegir un módulo que no tenía espacios libres, y que circula por el módulo  $i$  hacia el nuevo destino

$\xi_{3i}$ , con los vehículos que circulan por el módulo  $i$ , que van hacia otro destino y no han sido reasignados.

Cada uno de estos elementos se describe a continuación:

$$\xi_{1i} = \sum_{n=1}^t \sum_{m=1}^s \lambda_n^m P_{odt}; \forall_{n+s=t} \quad (5)$$

$$\xi_{2i} = \begin{cases} Y_{oid} R_{i,i} X_{odt} + R_{i,o} X_{oit}, & \text{si } R_{i,i} < \lambda_i P_{oit} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

$$\xi_{3i} = \begin{cases} Y_{oid} \lambda_i P_{odt}; & \forall_{o \neq d \neq i} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (7)$$

donde,

$Y_{oid}$ , es la probabilidad de circular por  $i$ , cuando el destino es el nodo  $d$  y el desplazamiento se realiza desde el nodo  $o$ .  
 $X_{oit}$ , es la asignación final en  $i$ , en el tiempo  $t$ , desde  $o$ ; es diferente de  $P_{oit}$ , porque no representa la predilección inicial

Finalmente, la tasa de entrada está compuesta por los siguientes elementos:

$$\lambda_{ei} = \sum_o \sum_d \xi_{2i} + \sum_o \sum_d \xi_{3i} + \sum_o \sum_d \xi_{4i} \quad (8)$$

donde,

$\xi_{2i}$ ,  $\xi_{3i}$ , son exactamente los mismos que componen la tasa de salidas

$\xi_{4i}$ , son los vehículos que no han sido reasignados y han elegido aparcar en  $i$

Este último elemento se describe a continuación:

$$\xi_{4i} = \begin{cases} \lambda_i P_{oit}; & \forall_{o \neq d \neq i} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (9)$$