

Estimación de Demanda de Tránsito: modelos clásico, basado en circuitos y basado en actividades. (Revisión Literaria)

Estimation of Traffic Demand: classic, tour-based and activity-based models. (Review)

María Estefanía Coto-Solano¹

Fecha de recepción: 31 de julio de 2018

Fecha de aprobación: 11 de octubre de 2018

Coto-Solano, M . Estimación de Demanda de Tránsito: modelos clásico, basado en circuitos y basado en actividades. (Revisión Literaria). *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-2. Abril-Junio 2019. Pág 112-121.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4353>

1 Estudiante. Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: escoso4594@yahoo.com



Palabras clave

Modelos de transporte; planificación de transporte; proyecciones de tránsito; demanda de tránsito; modelo de cuatro pasos; modelo clásico; modelo basado en circuitos; modelo basado en actividades.

Resumen

Los modelos de transportes son representaciones de las redes de tránsito mediante la aplicación de procedimientos matemáticos y conceptos teóricos. El nivel de detalle que se incluya en la modelación determinará la precisión y el realismo del comportamiento de movilidad de la población a obtener. Los desarrolladores de estimaciones de tránsito deberán definir previamente el alcance, precisión deseada y recursos humanos y económicos con que cuentan para escoger un modelo.

Las mejoras a los modelos de transporte han quedado relegadas al ámbito teórico de la investigación científica. Es necesaria la proyección de estas a los profesionales en el campo para su aplicación práctica. En este artículo se presenta una revisión bibliográfica de tres modelos de transportes frecuentemente utilizados en el mundo de modo que, quienes se encargan de estimar demanda de tránsito, puedan contar con una valoración de sus beneficios y limitaciones.

Keywords

Transportation models; transportation planning; traffic forecasting; traffic demand; four-step model; classic model; tour-based model; activity-based model.

Abstract

Transportation models are representations of traffic networks through the application of mathematical methods and theoretical concepts. The level of detail included in these models determines the precision and realism with which behavior of people's mobility is calculated. To choose a model, traffic estimation developers shall define previously the scope, precision needed and human and economic resources available.

Improvements in transportation models have been the reserve of theory. It is necessary to expand this knowledge to field professionals for its practical application. In this article, a review of three transportation models widely used in the world is presented. This is intended so that those in charge of demand estimation can benefit from the review of the advantages and limitations of frequently used transportation models.

Introducción

La inversión en infraestructura de tránsito es uno de los principales retos a los que se enfrentan los entes gubernamentales. Para cubrirla, se invierten importantes partidas del presupuesto público, se generan endeudamientos o bien, contratos de concesión de largo plazo, en aras de mejorar la competitividad de una región y la calidad de vida de sus habitantes. Debido al impacto que causan sobre las finanzas públicas y el usuario, las inversiones en obra pública deben estar fundamentadas en estudios técnicos confiables y exactos. Respecto a las obras destinadas a transportes, las proyecciones de demanda a distintos horizontes temporales son, las que definirán la necesidad de ejecutarlas. Estas proyecciones deben ser capaces de

integrar aspectos tan diversos como el comportamiento de los usuarios, sus características y considerar la variabilidad de éstas a través del tiempo.

Diferentes modelos son utilizados alrededor del mundo para abordar el cálculo de la demanda de tránsito. Se tratarán en este trabajo tres modelos de transporte: modelo tradicional de cuatro pasos, modelo basado en circuitos (*tour-based*) y el modelo basado en actividades (*activity-based*). Además del modelo clásico ampliamente utilizado y los modernos en creciente popularidad [1], cabe mencionar que se han desarrollado modelos híbridos, propios para una región, basados en simulación como el 4S en Australia [2] o el sistema SimMobility en Singapur [3].

La finalidad de este trabajo es exponer conocimiento generado de la investigación y procedimientos que no son utilizados comúnmente en Costa Rica, como herramientas para futuros estudios de demanda de tránsito. La mejora continua en el área de ingeniería de transportes permitirá obtener datos con mejor exactitud y aportar a la toma de decisiones informadas.

Modelos de transportes

Los modelos son representaciones simplificadas, físicas o abstractas, de determinados comportamientos que se buscan estudiar. Para el caso en cuestión se utilizan modelos matemáticos, basados en ecuaciones y conceptos teóricos, que buscan imitar los sistemas de transportes observados en la realidad [4].

Además, los modelos pueden ser agregados o desagregados según el nivel de detalle de la información con que se trabaje. Esto es, que un modelo desagregado contiene información desglosada por individuo mientras un modelo agregado la agrupa en categorías. Una segunda categorización corresponde a la naturaleza estadística de los datos. Un modelo será determinístico si se conocen con exactitud las variables para ejecutar la proyección de tránsito y, se le llama modelo estocástico si la información es inexacta o incompleta y deberá contemplar errores probabilísticos [5].

La accesibilidad a sistemas informáticos más económicos y de mejor desempeño ha facilitado la automatización de los modelos de transporte, sin embargo, modelos tradicionales como el de cuatro pasos siguen siendo ampliamente utilizados al no necesitar recursos especializados.

Para escoger un modelo se deben tener en cuenta las condiciones particulares de la región donde se aplica. A modo general, la escogencia dependerá del nivel de precisión y detalle deseado, la posibilidad de recolectar en campo los datos necesarios, la capacidad técnica del personal que procesará e interpretará la información y el acceso a uso de sistemas computacionales complejos.

Cada modelo tiene sus propias limitaciones y ventajas a considerar al realizar una escogencia. A continuación, se detalla cómo se desarrolla cada uno de los tres modelos principales y en qué supuestos se basan.

Basado en viajes

El modelo basado en viajes se conoce también como el modelo clásico de transportes de cuatro pasos. Permite estimar la demanda de tránsito total en una red a la vez que facilita analizar la demanda agrupada por ruta, propósito del viaje o modo de transporte utilizado. El objetivo de este modelo es estimar la demanda basándose en los atributos que generan demanda y las características del sistema de transporte que aporta la oferta [5].

El modelo de cuatro pasos ha sido el más utilizado en el mundo para la planificación en transportes desde los años 1950 [6]. Consta de cuatro etapas bien definidas y esquematizadas ampliamente en la literatura [7]. La tradición y facilidad de su adopción ha impulsado a las agencias de transporte a utilizar este modelo clásico y alejar la transición a nuevas técnicas. Es el que implica menores costos económicos en cuanto a necesidades computacionales

El diferenciador principal de este modelo respecto a otros es su unidad de medida: el viaje. Un viaje se refiere al traslado realizado por una persona para dirigirse de un origen a un destino. Por ende, el número de viajes generados o atraídos que mide el modelo corresponde al número de personas que realizan dichos viajes. Se presentan los pasos que conforman el mencionado modelo clásico secuencial de cuatro pasos:

Generación de tránsito

La finalidad de la etapa de generación de tránsito es la estimación del número de viajes generados en una zona de origen y atraídos hacia una zona de destino. Para ello, se parte de variables socioeconómicas relacionadas entre sí por medio de ecuaciones matemáticas que caracterizan la movilidad del área [8]. De esta manera, es posible que el modelo sea útil para pronósticos futuros conforme se actualicen los datos de las variables en el tiempo.

Aquellas variables relativas a las características de la población y su capacidad de realizar viajes se asocian con la producción mientras, las que describen la cobertura en usos de suelo y tipo de actividades se relacionan con la atracción de viajes.

Para encontrar las ecuaciones que describen la tendencia y correlación de las variables, los dos métodos de análisis matemático utilizados más frecuentemente son la regresión lineal [9] y la clasificación cruzada [4] y [10].

Distribución de tránsito

La etapa de distribución de tránsito se enfoca en obtener el número de viajes que cada región atrae, y distribuirlos entre las zonas que los pudieron haber originado. Para que el modelo funcione equilibradamente, todos los viajes producidos deben tener un destino que los atraiga. Para sistematizar estas relaciones se utiliza una matriz, la cual consta de un arreglo del número de viajes para cada par origen-destino en el área de estudio.

Utilizando mapas de uso de suelo, las regiones con mayores áreas destinadas a actividades atractivas (Ar_j) de viajes asumirán un mayor porcentaje de los viajes producidos. Conociendo el número de viajes (P_i) producidos en una zona i , es posible distribuirlos a distintos destinos (A_j) según (1) [4]:

$$A_j = \frac{Ar_j}{\sum Ar_j} * \sum_i P_i \quad (1)$$

El número de viajes (T_{ij}) entre cada par se calcula a partir de una analogía a la Ley de la Gravedad de Newton. Éste establece que la distancia o los costos actúan como un factor de fricción sobre los viajes. El factor de fricción ($f(c_{ij})$) es una función decreciente, que incluye una constante α , para considerar el efecto esperado de que, a mayor distancia o costo de un destino, menos atractivo es [4]. Así, es el número de viajes entre cada par origen-destino (2):

$$T_{ij} = \alpha * P_i * A_j * f(c_{ij}) \quad (2)$$

Reparto modal

Según el NCHRP [10], con el método Quick-Response System (QRS, por sus siglas en inglés), es posible establecer un modelo para el reparto modal del número de viajes (T_{ijm}) similar al modelo de gravedad utilizado en la etapa de distribución de tránsito. Esta ecuación (3) representa las restricciones de utilizar un modo de transporte con la inclusión de una variable de impedancia. La variable de impedancia (I) considera todos los posibles costos asociados con un determinado modo (m) en unidades de tiempo. Una constante b se incluye para especificar el propósito del viaje, generalmente de un valor aproximado de 2.

$$T_{ijm} = P_i * \frac{A_j * I_{ijm}^b}{\sum_j \sum_m I_{ijm}^b} \quad (3)$$

Las matrices origen-destino construidas en la etapa de distribución de tránsito son actualizadas a matrices origen-destino por modo, para profundizar la comprensión de quiénes son los usuarios de una ruta.

Asignación de tráfico

La meta de la etapa final de asignación de tráfico es determinar el número de viajes en cada vía de la red. Se asume como premisa básica que los usuarios preferirán una ruta que les ofreciera los menores costos. Muchas variables pueden influenciar al usuario a escoger una determinada ruta: tiempo, distancia, costo, congestión, dificultad de maniobras requeridas, señalización y otros riesgos. Se recomienda utilizar un promedio ponderado del valor que representan estas variables para caracterizar la ruta. Sin embargo, el tiempo y los costos en combustible son las más utilizadas [4].

Construir un árbol para identificar las rutas conectadas a la red es una técnica popular. Cada ruta representa una rama a la cual se le asigna un valor de costo. De esta forma, para analizar el costo total de transitar determinada ruta, se suman los costos de cada trayecto. Según la premisa mencionada al inicio de este apartado, al trayecto con menores costos será asignado un mayor peso de viajes.

Basado en circuitos

Recientemente, existe debate entre los investigadores en transportes sobre las deficiencias del modelo tradicional de cuatro pasos ante su imposibilidad para solucionar o incorporar determinados aspectos. Como se mencionó anteriormente, la medida fundamental del modelo tradicional es en viajes individuales que ocurren en un momento único del día. El modelo basado en circuitos o *trip-based* según su nombre en inglés, fue la primera actualización del modelo clásico en los años 1980 [1]. La unidad de este modelo son los circuitos, los cuales contemplan varios viajes realizados por un mismo usuario que se originan y retornan a un mismo punto, proponiendo que el flujo de tránsito de un sujeto está ligado a lo largo del día.

Al estudiar el circuito que recorre una persona en el día, es más clara la comprensión del tiempo que abarca viajando y los sitios por los que transita. Además, el estudio del comportamiento del usuario es más profundo en el modelo por circuitos, resultando así más apto para la planificación local, a un nivel desagregado, y a largo plazo [11]. En esa línea, el modelo clásico funciona para etapas de planificación donde el nivel de precisión permite que los datos sean agregados y conglomerados en centroides.

Por su unidad de medida, para el modelo por circuitos es necesario recolectar datos más detallados que aquellos recopilados para el modelo de cuatro pasos. Mientras que para el

modelo clásico un abordaje a los conductores en carretera, respondiendo una única vez sobre su origen, destino y propósito puede ser suficiente, el modelo basado en circuitos requiere una trazabilidad de los sujetos de estudio durante un día completo. Para ello, un mecanismo de recolección de datos es mediante encuestas dirigidas a los hogares.

Por ejemplo, la Encuesta Nacional de Hogares en Transportes de Estados Unidos (National Household Travel Survey) envía por correo a domicilio las encuestas a hogares preseleccionados. Los encuestados deben confirmar su participación y comprometerse a responder, por teléfono o Internet, los detalles de los viajes de un día completo, correspondientes a todas las personas que habitan la vivienda [12].

Desarrollar una encuesta con el nivel de detalle como la descrita anteriormente, dirigida a una muestra suficiente, representa uno de los obstáculos para su implementación. En Varsovia, Polonia, han rechazado el uso de Internet para completar encuestas pues al ser un medio impersonal las personas son propensas a mentir, contestar sin comprender las preguntas, reservarse respuestas o dejarlas incompletas. El éxito de desarrollar cualquier modelo de transportes dependerá de la confiabilidad de la encuesta con que se recopilan los datos de comportamiento [13].

La sistematización y agrupación de la cantidad de información recolectada es otra limitante con respecto al tradicional. Según Rossi y Shiftan [14], la complejidad procede de la base de datos donde, para cada segmento del circuito, los sujetos declaran un gran número de variables.

Los autores que han aplicado el modelo basado en circuitos a casos de estudio difieren en la esquematización de este. Sintetizando los pasos propuestos por [1] y [11], comparten el siguiente proceso:

Información socioeconómica

En este primer apartado, al igual que al inicio del modelo de los cuatro pasos, se recopila información socioeconómica relevante de los entrevistados. Ésta debe permitir la agrupación de la muestra por categorías de interés como zona de residencia, grupos etarios, actividad principal, género, tamaño del hogar, tenencia de vehículos, entre otras.

Patrones de viaje diarios

Se refiere al número de circuitos realizados diariamente y su caracterización. La clasificación se da primero al circuito como único, múltiples o bien, un único circuito con un desvío o "subcircuito". Asimismo, si se realiza más de un circuito, se indica la priorización de cada uno. Esto busca aclarar si todos los circuitos se recorren todos los días, como viajes obligatorios, o si fueron viajes opcionales o de excepción realizados únicamente el día de estudio. Finalmente, se debe incluir el número de paradas efectuadas en los circuitos y el detalle de éstas.

Escogencia del destino

Según el nivel de detalle que se requiera para el estudio, el destino puede corresponder a una pregunta abierta que lleva a una base de datos desagregada y compleja. El encuestador puede optar por contar con opciones limitadas para la pregunta según una zonificación de transportes previa. En estas zonificaciones se busca dividir la región de estudio en áreas de menor tamaño con características homogéneas en cuanto a sus características socioeconómicas. Debe contemplarse que, a mayor número de zonas de transporte, mayor será la carga para el sistema computacional que procesará los datos. Para modelos detallados de planificación, se recomienda una zona de transporte por cada 1000 habitantes [13].

Hora del día

Al consultar sobre la hora del día en que se recorren los segmentos del circuito, es conveniente clasificarlos según periodos de similar comportamiento en el flujo de tránsito. Así, se proponen cuatro periodos según las horas pico y horas valle, tanto diurnas como nocturnas. El rango horario variaría acorde a las condiciones particulares de cada región de estudio.

Modo de transporte

Según el alcance del estudio, determinar si se incluyen medios de transporte motorizados y no motorizados y cuáles modos de transporte se contemplan bajo cada categoría. La complejidad en el número de modos escogidos definirá el procedimiento matemático a utilizar.

Un modelo *logit*, similar al expuesto para el modelo clásico, es útil cuando la escogencia para el usuario es binaria: solo hay dos opciones disponibles. Por otra parte, un modelo *nested logit* puede utilizarse cuando la subclasificación a contemplar es mayor [15].

Basado en actividades

Junto con las mejoras que se buscaron implementar en la década de 1970 al modelo de los cuatro pasos, surge el estudio del modelo basado en actividades. Las deficiencias que hubiese también en el modelo por circuitos son cubiertas por este modelo, en el cual se analizan los múltiples patrones diarios de desplazamiento que realiza una persona y no un único circuito [1].

En su definición, el modelo basado en actividades incluye las diferencias en patrones de recorridos derivados de los estilos de vida y la participación en determinadas actividades por parte de la población [16]. La necesidad de realizar actividades es finalmente la razón por la que los sujetos se desplazan en el espacio y el tiempo, por lo tanto, éste busca modelar y predecir dichos comportamientos.

Al igual que el modelo por circuitos expuesto anteriormente, es necesario un registro de actividad de 24 horas para los sujetos de estudio. También, este considera en sus principios que los viajes no suceden independientemente, sino que están interrelacionados [1].

Sin embargo, en el modelo por actividades se contempla la opción de que una persona no viaje para completar su tarea [1]. Es decir, va más allá del modelo de circuitos al proponer que los sujetos pueden realizar más de una actividad en un mismo sitio y que, no necesariamente, toda actividad implica un circuito de viajes. Esta perspectiva describe el comportamiento de las personas realísticamente, con la complejidad inherente a los procesos de decisión personal sobre movilidad.

Para la resolución de los modelos por actividades, se hace uso de programas de simulación, aplicados a las bases de datos de información procedentes de las encuestas de hogares [16]. Poder utilizar los datos de manera desagregada es beneficioso por el nivel de detalle en que es posible observar el comportamiento de los individuos. En el caso de los modelos tradicionales, es inevitable la agrupación de datos en categorías principales, perdiéndose información de interés en el proceso.

Como en el modelo basado en circuitos, una de sus limitaciones radica en que el tiempo de ejecución del programa se verá afectado negativamente según el tamaño de la zona de estudio. Además, el manejo de estos sistemas requerirá la disposición de personal dedicado al seguimiento y mejoramiento del modelo.

Davidson et. al. [17] proponen la siguiente esquematización de pasos análogos al modelo clásico para el desarrollo del modelo basado en actividades.

Patrón de actividades diarias según circuitos

Interrelaciona los diferentes recorridos que ocurren a lo largo del día y la relación de esas actividades con los miembros del hogar. Al reconocer el entorno de las personas y su dependencia a actividades dadas, en determinados horarios y modos de transporte específicos, la demanda de tránsito generada se estima con mayor exactitud que al considerar únicamente estadísticas socioeconómicas como lo hace el modelo tradicional.

Escogencia de área de destino

En este modelo, los destinos se definen como paradas dentro del circuito y no como puntos finales, a diferencia del modelo clásico. Estas paradas se clasifican en primarias y secundarias según el proceso de decisión del usuario. Así, las áreas de destino son descritas por distintas variables que definen su atraktividad y priorización.

Escogencia de destino primario

Énfasis en las variables que determinan la escogencia del destino de la actividad principal del usuario. No es necesario realizar diferenciación entre viajes originados en el hogar o viajes originados en otro sitio ya que se contemplan como parte de un mismo circuito. En el modelo tradicional sí se deben modelar independientemente pues representan diferentes propósitos.

Combinación de modos de transporte

Esta etapa describe los modos de transporte utilizados por el sujeto para cada uno de los circuitos a lo largo del día. El abordaje de modo por circuito mantiene la consistencia probable de utilizar el mismo modo para la ida y el retorno. Asumir un modo distinto para cada viaje provoca la necesidad de generar todas las combinaciones posibles ida-retorno, solicitando aún más capacidad por parte de los sistemas informáticos. Sin embargo, al conservar la desagregación por circuito y no agregarla por día, permite contemplar la probabilidad de que el usuario utilice diferentes modos según sus distintas actividades.

Calendarización

Se refiere a la escogencia del momento del día para iniciar cada circuito y cuánto es su duración. Contar con la calendarización de actividades de un individuo hace posible observar el impacto que pueden provocar distintos sucesos en su rutina. Por ejemplo, ilustra cómo distribuye su tiempo y actividades durante las horas pico diurnas y nocturnas o cómo enfrenta las prohibiciones de circulación vehicular por número de placa.

Micro-simulación de patrones individuales

La etapa final del modelo es equivalente al paso de asignación de viajes en el modelo clásico. Se ejecuta la simulación en el programa computacional escogido que mostrará los resultados de los patrones de actividad en el tiempo y el espacio. Posterior a este paso, es posible incorporar los patrones desagregados de asignación en el mismo *software* para obtener la simulación de redes de tráfico. Para ejecutar una modelación de tránsito con una asignación obtenida del modelo de cuatro pasos, es necesario revisar la compatibilidad temporal de los datos. Esto no ocurre con los modelos modernos ya que, al ser sometidos a simulación desde la etapa de asignación, los datos obtenidos están listos para utilizar en otros procesos.

Conclusión

El modelo tradicional trabaja con datos agrupados y un menor nivel de detalle en las consultas al usuario. Puede hacer uso de otros mecanismos de recolección de datos como entrevistas a vehículos seleccionados en la vía o entrevistas a bordo de los vehículos [18]. La ejecución del modelo puede verse beneficiada con el uso de sistemas informáticos modernos, como VISUM [19], aunque es posible desarrollarlo de manera manual en hojas de cálculo.

El modelo basado en circuitos ha fungido como un modelo intermedio, con mejoras al modelo clásico, probado y utilizado especialmente en países europeos [7]. Representa una mejora conceptual al cambiar el término de viaje independiente por el de circuitos. La base de datos de este modelo requiere el seguimiento del usuario para ubicar las paradas que realiza a lo largo del circuito. Aumentar la información en la base de datos hace más complejo su procesamiento y por ello se hace necesaria la incorporación de *software* y personal calificado.

El modelo aún cuenta con limitaciones para integrar las múltiples variables que caracterizan la movilidad diaria de las personas. Si la precisión deseada implica conocer el comportamiento humano y trazar las actividades que realizan los sujetos de estudio, es conveniente optar por el modelo basado en actividades.

Los modelos basados en actividades son los más ambiciosos ya que su objetivo es sistematizar el comportamiento de cada individuo a lo largo del día para posteriormente poder predecir sobre el mismo. Al igual que los basados en circuitos, requieren como insumo encuestas de 24 horas con gran cantidad de variables. Su procesamiento necesariamente será en *software*, con el tiempo adicional que conlleva el uso de robustas bases de datos [20].

Los desarrolladores de proyectos de transporte, así como específicamente el personal que proponga el modelo de estimación de tránsito, deberán establecer como primer punto cuál es la precisión objetivo del estudio. Utilizar modelos modernos como el basado en actividades será pertinente en tanto el detalle obtenido sea aprovechado por los desarrolladores y sus objetivos no puedan ser alcanzados con modelos más simples.

Si no es posible contar con profesionales dedicados exclusivamente al monitoreo del modelo de tránsito, se recomienda utilizar uno más simple que puedan utilizar profesionales de otras áreas afines, sin ser expertos en transportes. Así, el modelo clásico de cuatro pasos no pierde vigencia en su aplicación a pesar de sus limitaciones conceptuales. De contar con los recursos económicos y conocimientos técnicos para hacer uso de *software* especializado, puede considerarse el uso del modelo basado en circuitos para mejorar la precisión de la estimación.

Para todos los modelos, será una limitación según la región, la posibilidad de recolectar en campo los datos requeridos por un método confiable [13]. Asimismo, deberán validarse los procedimientos del modelo escogido de modo que representen la realidad local, dada su variabilidad en cada sitio.

Referencias

- [1] M. Omer, H. Kim, K. Sasaki y K. Nishii, «A Tour-based Travel Demand Model Using Person Trip Data and Its Application to Advanced Policies,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 14, n° 2, pp. 221-230, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0221-6>
- [2] P. Davidson, «A new approach to transport modelling - the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications,» de *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings*, Adelaide, Australia, 2011.
- [3] O. Petrik, M. Adnan, K. Basak y M. Ben-Akiva, «Uncertainty analysis of an activity-based microsimulation model for Singapore,» *Future Generation Computer Systems*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.078>

- [4] J. d. D. Ortúzar y L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [5] K. C. Sinha y S. Labi, *Transportation Decision Making*, New Jersey, EEUU: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [6] D. Krasic y L. Novacko, «The Impact of Public Transportat Network Accessibility on Trip Generation Model,» *Traffic & Transportation*, vol. 27, pp. 165-172, 2015.
- [7] E. J. Miller, M. J. Roorda y J. A. Carrasco, «A Tour-Based Model of Travel Mode Choice,» de *10th International Conference of Travel Behaviour Research*, Lucerna, Suiza, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-004-7962-3>
- [8] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, «Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035,» San José, Costa Rica, 2011.
- [9] S. Ponnuswamy y D. Johnson, «Travel Demand Forecasting,» de *Urban Transportation: Planning, Operation and Management*, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [10] National Cooperative Highway Research Program, «Travel Demand Forecasting: Parameters and Techniques,» National Academy of Sciences, 2012.
- [11] N. Ferdous, C. Bhat, L. Vana, D. Schmitt, J. Bowman, M. Bradley y R. Pendyala, «Comparison of Four-Step Versus Tour-Based Models in Predicting Travel Behavior Before and After Transportation System Changes,» Ohio Department of Transportation, Ohio, EEUU, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3141/2303-06>
- [12] Westat, «2017 NHTS Data User Guide,» Federal Highway Administration, Washington, EEUU, 2018. Disponible: <https://nhts.ornl.gov/>
- [13] J. Chmielewski, Interviewee, *Travel Demand Model Case Study: Warsaw*. [Entrevista]. 5 March 2018.
- [14] T. F. Rossi y Y. Shiftan, «Tour Based Travel Demand Modelling in the US,» *IFAC Transportation Systems*, pp. 381-386, 1997.
- [15] M. Ben-Akiva, *Travel Demand Modeling*, Massachusetts Institute of Technology, 2008. Disponible: <https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering>
- [16] M. G. McNally y C. R. Rindt, «The Activity-Based Approach,» Institute of Transportation Studies, University of California, California, EEUU, 2007.
- [17] W. Davidson, R. Donnelly, P. Vovsha, J. Freedman, S. Ruegg, J. Hicks, J. Castiglione y R. Picado, «Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modeling,» *Transportation Research*, vol. 41, pp. 464-488, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.003>
- [18] M. Kutz, «Travel Demand Forecasting for Urban Transportation Planning,» de *Handbook of Transportation Engineering*, McGraw-Hill Education, 2011.
- [19] H. Frey, U. Leth, A. Mayerthaler y T. Brezina, «Predicted Congestions Never Occur. On the Gap Between Transport Modelling and Human Behaviour,» *Transport Problems*, vol. 6, n° 1, 2011. Disponible: <http://transportproblems.polsl.pl/>
- [20] J. L. Bowman y M. E. Ben-Akiva, «Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules,» *Transportation Research*, vol. 35, pp. 1-28, 2000.