

ANALISIS DE DISTINTOS TIPOS DE MODELOS DE ASIGNACION
A REDES DE TRANSPORTE PUBLICO

Joaquín de Cea Chicano

Departamento de Ingeniería de Transporte,
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

Los modelos de asignación de viajes (a redes de transporte público y privado) son corrientemente utilizados como herramientas de análisis, y evaluación de proyectos de mejoramiento y ampliación de sistemas de transporte urbano. Dado que el proceso de planificación de tales sistemas conduce, a menudo, a tomar decisiones que involucran la utilización de cantidades importantes de recursos públicos, es necesario que los planificadores dispongan de modelos fiables.

Este trabajo describe las características principales de diferentes tipos de modelos de asignación de viajes a redes de transporte público actualmente en uso y discute sus ventajas y limitaciones. Además se presentan algunas consideraciones referentes a la aplicabilidad de los modelos existentes al análisis de redes en países en desarrollo.

1. Introducción.

Los modelos de asignación de viajes (modelos de asignación) son herramientas importantes para el proceso de planificación de sistemas urbanos. Sus usos más corrientes son el análisis, diseño y evaluación de redes de transporte. La generación de la "mejor" red de transporte público es corrientemente lograda mediante una búsqueda heurística llevada a cabo con la ayuda de paquetes computacionales, que disponen de algoritmos de asignación o análisis de redes. En la actualidad existen varios paquetes apropiados para el análisis de sistemas de gran tamaño. Entre ellos cabe destacar UTPS [1], EMME [2,3,4,5], TRANSEPT [6], TRANSCOM [7], NOPTS [8], etc. Todos estos modelos, no obstante sus características propias, usan una metodología general caracterizada por los tres aspectos que siguen:

- Zonificación de la región de estudio (región servida por la red de transporte público a analizar) en pequeñas zonas geográficas, cuya actividad y población se suponen concentradas en un punto arbitrario denominado centroide,
- Codificación detallada de la red de transporte (representación del espacio de maniobra de los vehículos y, en consecuencia, de la mayoría de los movimientos permitidos a los usuarios del sistema),
- Caracterización precisa de la demanda de transporte, para un período dado, bajo la forma de una matriz origen-destino de viajes entre zonas.

Respecto de las diferencias existentes entre estos modelos, éstas son muy variables. Dejando de lado aquellas que se relacionan a la estructura computacional de la red bajo análisis, debe mencionarse entre las más importantes:

- las hipótesis relativas al comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas,
- la forma en que se trata el problema del acceso a la red (definición de arcos de entrada y salida de ésta),
- la forma en que es tratado el problema de las líneas comunes,^{1/}
- el tipo de relación existente entre el usuario del modelo y el computador y
- la manera en que se considera la interacción que existe entre la red de transporte público y la red de transporte privado.

^{1/} Se define como conjunto de líneas comunes, entre dos nodos (i,j), a todas aquellas líneas que pasan por i en dirección a j. El caso más corriente es el que se presenta cuando dos o más líneas usan un mismo tramo de la red.

En cuanto a las hipótesis sobre el comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas, los modelos analizados se dividen básicamente en dos tipos. Por un lado, los modelos "todo o nada", suponen que los pasajeros que se desplazan entre dos zonas dadas usan todos el mismo camino (el de costo generalizado mínimo). Por otra parte, los modelos de rutas múltiples suponen que los viajeros al no tener una percepción perfecta del costo generalizado de cada alternativa disponible, se reparten entre un conjunto de caminos posibles para dirigirse desde la zona de origen a la de destino.

En cuanto el problema del acceso se destacan dos métodos para determinar los arcos que unen los centroides de las zonas y los nodos de la red de transporte público. En los modelos de "acceso manual" los arcos de acceso son creados en la etapa de codificación de la red, en tanto los modelos de "acceso automático" crean arcos (implícitos) mediante la ayuda de un módulo de acceso que tiene como datos de entrada la representación interna de la red, las coordenadas de los nodos y de los centroides de las zonas y restricciones o barreras geográficas.

Respecto a la forma en que se trata el problema de las líneas comunes, en el caso más simple se supone que el tiempo de viaje en la sección común es igual para todas las líneas (del mismo modo) y que en consecuencia los viajeros que se desplazan entre dos nodos de dicha sección común perciben el conjunto de las líneas comunes como una línea única cuya frecuencia es la suma de las frecuencias de las líneas individuales. La demanda es asignada en forma proporcional a las frecuencias de cada línea. Por otro lado, si se supone que las velocidades en la sección común son distintas para cada línea, es posible encontrar un subconjunto de esas líneas comunes que minimicen el tiempo esperado de viaje (espera y desplazamiento). Este método que consiste en resolver un problema de programación hiperbólica (0, 1) es teóricamente más correcto, pero resulta bastante más lento en términos de uso del computador.

En lo concerniente a la relación existente entre el usuario del modelo (analista de transporte) y el computador, los modelos de asignación pueden clasificarse en interactivos y no interactivos. En el primer caso, el usuario se comunica con el computador a través de una pantalla gráfica. Esta relación "... permite definir o modificar interactivamente los trazados de las líneas de una red de transporte público y de evaluar el impacto de dichas modificaciones, gracias a la aparición en la pantalla de los resultados provenientes de la asignación de los viajes sobre las líneas" [8]. En los modelos no interactivos los datos son entrados al computador en forma tradicional (archivos de disco por ejemplo) y el usuario debe analizar largos listados de resultados.

Finalmente, respecto a la interacción existente entre las redes de transporte público y privado, es necesario mencionar que

la mayor parte de los modelos actualmente en uso no la consideran. En efecto, la asignación a ambas redes se realiza a menudo en forma independiente. Existen modelos sin embargo que consideran explícitamente dicha interacción en la etapa de asignación. Luego de una asignación de equilibrio sobre la red de transporte privado (que considera los flujos de vehículos de transporte público) la asignación a la red de transporte público utilizan tiempos sobre los arcos que son funciones de los tiempos de equilibrio obtenidos precedentemente. El proceso (que incluye la etapa de partición modal) se hace en forma iterativa y el criterio de parada consiste en comparar los costos sobre las redes con los costos usados en la partición modal.

Las secciones que siguen serán organizadas de la siguiente forma. En la sección 2 se presentan las características más importantes de algunos de los modelos de asignación a redes de transporte público actualmente en uso. Como todas las revisiones bibliográficas, es posible que algunos modelos no sean incluidos, sin embargo, los analizados son representativos del estado del arte en la materia. En la sección 3 se discuten las ventajas y desventajas de los modelos descritos y finalmente en la sección 4 se presentan algunas consideraciones relativas al tipo de modelos a utilizar para el análisis de redes de transporte público en ciudades como Santiago.

2. Algunos modelos importantes.

2.1 UTPS (Urban Transportation Planning System)

UTPS es un conjunto de programas (escritos para sistemas IBM 360/370) destinado a la planificación estratégica de sistemas multimodales de transporte. Desarrollado y mantenido conjuntamente por UMTA (Urban Mass Transportation Administration) y FHWA (Federal Highway Administration), tiene sus orígenes, en lo que respecta a los programas de análisis de redes, en HUD (Housing and Urban Development Transport Planning Models) y TRIPS (ver |9| y |10|).

Los principales módulos utilizados para el análisis de redes son: UNET^{1/} que lee los datos de la red (arcos y líneas) y produce una representación de ella tratable por el computador; UPATH que determina los árboles de rutas de costo generalizado mínimo y ULOAD que carga los viajes sobre los caminos predeterminados por UPATH. En cuanto a la representación de la red, los datos básicos de entrada de UNET, como en el caso de los módulos de asignación de redes de transporte privado, son los arcos (arcos de acceso, arcos de transporte público, arcos de caminata entre líneas, etc.). Para cada uno de estos arcos se debe indicar sus nodos extremos, el tiempo de viaje en vehículo (o la velocidad), el modo y si corresponde los números de líneas que pasan por él. Además de esta información, cada línea está definida por su modo,

^{1/} INET en las últimas versiones |11|.

el intervalo y la secuencia de nodos por los que pasa.

La asignación (efectuada por UPATH y ULOAD) es del tipo "todo o nada" entre centroides de zonas. El algoritmo de cálculo de rutas mínimas es una adaptación del algoritmo de Moore [12]. Si para desplazarse entre dos puntos (sean éstos los extremos del viaje o nodos intermedios) los viajeros enfrentan líneas comunes, el algoritmo carga todas las líneas comunes del mismo modo, generalmente en forma proporcional a sus frecuencias. Si hay líneas comunes pertenecientes a diferentes modos, todo el flujo es cargado al modo más rápido (se considera la frecuencia combinada para el modo y el tiempo de viaje en vehículo).

Respecto al tamaño de los problemas que pueden tratarse, UTPS permite al análisis de redes de gran tamaño. Valores máximos del orden de 2500 centroides, 8000 nodos, 1200 líneas y 32.000 arcos son mencionados en la literatura (ver [13], [14]).

2.2 TRANSCOM (TRANSport en COMmun)

El sistema TRANSCOM es un conjunto de programas computacionales cuyo principal objetivo es realizar la asignación de viajes a una red de transporte público, y esto, en el contexto de redes de gran tamaño. Su función principal consiste en estimar los valores de los flujos sobre cada tramo de la red [7]. Ha sido desarrollado en el departamento de computación de la Universidad de Montréal en 1974 y desde esa fecha ha sido mantenido y desarrollado por la Comisión de Transportes de la Comunidad Urbana de Montréal. El sistema consta de cuatro módulos principales [15]. PUBTRAN lee los datos que describen la red de transporte público, verifica la compatibilidad de ellos y produce la representación computacional de la red según las necesidades de los módulos siguientes.

A diferencia de UTPS, el elemento básico de la red es la línea y no el arco. Para cada línea debe especificarse información tal como velocidad comercial, intervalo, distancia entre terminales, descripción del recorrido (secuencia de nodos) etc. Además, debe entregarse al modelo las coordenadas geográficas de los nodos y de los centroides.

El módulo ACCESS determina, sin explicitar los arcos ficticios de marcha, la asignación de viajes fuera de la red de transporte público. Esto, a partir de la representación interna de la red (creada por PUBTRAN) y las coordenadas de los centroides de las zonas. De acuerdo a reglas impuestas por el usuario [16] ACCESS transforma la matriz de viajes entre centroides de zonas en una matriz de viajes entre nodos de la red. La asignación (realizada por los módulos CHEMIN y CHARGE) es del tipo "todo o nada" a las rutas mínimas entre nodos de la red. Respecto al cálculo de las rutas mínimas, TRANSCOM dispone de tres algoritmos alternativos: los dos primeros, CTM (caminos de tiempo mínimo) y CTPM

(camino de tiempo percibido mínimo) son modificaciones del algoritmo de Dijkstra (ver [16] y [17]) en tanto el tercero, TRAMIN (caminos con mínimos transbordos) es una aplicación del algoritmo de Moore que utiliza distancias unitarias sobre los arcos [15]. CTM calcula las rutas mínimas a partir de un nodo, sin considerar la existencia de líneas comunes en tanto CTPM simula la percepción de la oferta por parte de los viajeros cuando éstos enfrentan líneas comunes. Si entre el par de nodos (i,j) existe un conjunto $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ de líneas comunes, con frecuencias $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ y tiempos de viaje sobre la red $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ y se supone que los tiempos de espera de las líneas son variables aleatorias independientes, exponencialmente distribuidas con medias $k/f_1, k/f_2, \dots, k/f_n$, el valor esperado del tiempo total de viaje, TV, (tiempo de espera y tiempo de viaje en vehículo) entre i y j para un viajero que decide tomar la primera línea disponible del conjunto L está dado por la expresión siguiente (ver [16] y [18]):

$$TV = \frac{k + \sum_{i=1}^n t_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1)$$

Dado que los tiempos de viaje de las líneas comunes son diferentes, existe un conjunto $\bar{L} \subset L$ que minimiza TV. El algoritmo CTPM determina dicho conjunto \bar{L} y supone que el viajero sube a la primera línea perteneciente a él que pasa por el paradero en que espera. Sea $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ un vector en el que $x_i = 1$ si $l_i \in \bar{L}$ y $x_i = 0$ si $l_i \notin \bar{L}$. La determinación de \bar{L} se hará entonces resolviendo el siguiente problema de programación hiperbólica $\{0,1\}$ sin restricciones:

$$\text{Min (TV)} = \text{Min}_X \frac{k + \sum_{i=1}^n t_i f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i x_i} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i}{b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i} \quad (2)$$

donde $a_i, b_i = 0$ para $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Chriqui [16], [17] propone un algoritmo simple de resolución del problema (2) para el caso particular en que $a_0=1, b_0=0$ y $a_i/b_i=t_i$.

Una vez determinado el conjunto \bar{L} , la demanda es cargada entre las líneas que pertenecen a él, proporcionalmente a sus frecuencias. CTPM, si bien es teóricamente más correcto que CTM, en aplicaciones prácticas ha resultado ser del orden de seis veces más lento [15].

En cuanto a la talla de los problemas tratados, TRANSCOM es habitualmente utilizado para analizar redes de alrededor de 2000 nodos y 200 líneas de transporte público.

2.3 TRANSEPT.

El modelo TRANSEPT ha sido concebido para evaluar el impacto a corto plazo, de cambios introducidos a una red de buses. Fue desarrollado por LGORU (Local Government Operational Research Unit) durante la realización de un estudio en la ciudad de Coventry en Inglaterra. La descripción detallada del estudio realizado y los aspectos más importantes del modelo pueden encontrarse en [6], [19], [20], [21] y [22].

La hipótesis básica de TRANSEPT es que los viajeros que se mueven entre dos puntos determinados de la red utilizan todos la misma ruta. Esta es la de costo generalizado mínimo. En cuanto a la representación de la red de transporte público, las líneas son consideradas como una secuencia de arcos. "Un arco es un conjunto de paraderos entre los que no hay líneas que comienzan, terminan, convergen o divergen" [6]. Otros datos requeridos sobre las líneas, son el tipo de bus utilizado, el número de buses asignadas a la línea y el tiempo de recorrido.

En una primera etapa el modelo identifica para cada zona arcos de acceso potencial. Luego, para cada par origen destino calcula los costos generalizados por modo (bus, automóvil, marcha). En el caso del transporte público (buses) el número de rutas posibles entre dos zonas dependerá (en igual forma que para el modelo TRANSCOM) del número de arcos de acceso en los extremos de los viajes. El número máximo en rutas entre dos zonas es determinado por el usuario y el programa selecciona los de menor costo generalizado.

Para determinar la proporción de viajeros sobre cada una de las alternativas (auto, caminata y diferentes rutas en bus) se utiliza un modelo "logit multinomial". Así, la probabilidad PB_i de que un individuo que viaja entre un par O-D dado utilice la ruta de bus i (entre n rutas de bus posibles entre O y D) es:

$$PB_i = \frac{\exp(-\lambda ZB_i + \delta_b)}{\exp(-\lambda ZA + \delta_a) + \exp(-\lambda ZC) + \sum_{k=1}^n \exp(-\lambda ZB_k + \delta_b)} \quad (3)$$

donde ZA , ZC y ZB_k representan los costos generalizados de viaje en auto, caminata y bus por la ruta k respectivamente; λ es un parámetro de calibración y δ_a y δ_b representan medidas de preferencia del auto y del bus sobre la caminata. Con el fin de resolver los problemas típicos de los modelos del tipo logit (especí-

ficamente el problema de la existencia de alternativas correlacionadas), el modelo logit multinomial ha sido reemplazado por un modelo logit jerárquico (ver [23]).

Una vez calculadas las probabilidades de cada alternativa, los viajeros son asignados a las diferentes rutas. En caso de existencia de líneas comunes los viajeros son distribuidos sobre ellas en función de sus frecuencias. Con el fin de obtener una solución estable el proceso de asignación es iterativo. Dado que la asignación de viajes se hace de arco en arco, para cada línea, el procedimiento parece adecuado sólo para redes radiales (ver [22]).

En cuanto al tamaño máximo de las redes que TRANSEPT puede tratar no existe información en la documentación disponible. Sólo se menciona que la ciudad de Coventry tenía en 1972 alrededor de 400.000 habitantes y que el número de líneas de la red de buses era de 40. Esto indica que muy probablemente se trataba de una red de tamaño reducido.

2.4 Los modelos interactivos gráficos: RHITUC y NOPTS.

El desarrollo de modelos interactivos gráficos como herramientas de planificación de transporte, tiene su origen en trabajos de investigación llevados a cabo en la Universidad de Washington (Seattle). Uno de los primeros modelos producidos, IGTDS (Interactive Graphic Transit Design System) sirvió para analizar sistemas de transporte público del tipo "many to one" donde los viajes provenientes de muchos orígenes convergen a un destino único (ver [24] a [28]).

Desarrollos posteriores de IGTDS dieron origen a los modelos UTRANS (Urban Transit Analysis System), RHITUC (Recherche Heuristique d'Itinéraires de Transports Urbains Collectifs), NOPTS (Network Optimization System) e ITAM (Interactive Transit Assignment Model), que es el nombre bajo el cual NOPTS se distribuye en los Estados Unidos de Norteamérica. UTRANS, como IGTDS es del tipo "many to one" en tanto los tres restantes sirven para analizar sistemas del tipo "many to many", es decir redes con múltiples orígenes y destinos. Dado el carácter más general, sólo se da a continuación una breve descripción de los modelos RHITUC y NOPTS. Los dos modelos son muy similares, sus diferencias están dadas más bien por los requerimientos impuestos por las instalaciones computacionales para los que fueron desarrollados. RHITUC fue desarrollado en Suiza en el ITEP (Instituto Técnico de Transportes) y consta de un conjunto de programas implementados en un computador CDC Cyber 7326. NOPTS es una adaptación de dichos programas, para ser utilizados en un minicomputador.

Los datos básicos de ambos modelos son los nodos y arcos potenciales de la red de transporte público (tren, metro, calles

disponibles para los servicios de buses, arcos peatonales de acceso, etc.), la demanda (en forma de una matriz O-D de viajes) y características relativas a los vehículos disponibles (tipos, capacidad, costos de operación, etc.). Para cada alternativa a evaluar (red de transporte público) debe entregarse como datos las líneas (secuencia de paraderos), el tipo de vehículo seleccionado para cada línea y la frecuencia del servicio. Es en la etapa de creación de la red, en que las ventajas de modelos interactivos gráficos son evidentes [8]. Operaciones tales como la modificación de líneas, la creación de nuevas líneas, agregar un nodo o un arco, etc., pueden hacerse en forma inmediata con la ayuda de gráficos. Todas estas modificaciones, entradas desde un terminal gráfico quedan instantáneamente incorporadas a la base de datos que contiene la red.

El modelo de asignación usa el algoritmo de multirutas de Dial (ver [29]) sobre una red en la que se debe codificar nodos y arcos ficticios para representar los tiempos de transbordo entre líneas, los tiempos de espera y los tiempos de caminata.

RHITUC y NOPTS han sido utilizados para analizar redes de tamaño medio (del orden de 200 nodos, 50 líneas y 1000 arcos).

2.5 EMME (Equilibre Multimodal - Multimodal Equilibrium).

EMME, desarrollado por el CRT (Centre de Recherche sur les Transports de l'Université de Montréal) con la cooperación de la ciudad de Winnipeg, es un modelo para la planificación integrada de transporte urbano, basado en la teoría de equilibrio en redes de transporte. La principal diferencia de EMME en relación a los modelos tradicionales es que en lugar de ser secuencial es simultáneo (ver [5]). Así las demandas obtenidas para cada nodo y los tiempos de viaje son consistentes en el sentido que la partición modal es predicha utilizando los tiempos de viaje obtenidos en la asignación a las redes de transporte público y privado. Florian [30] presenta las hipótesis básicas del modelo. Uno de los aspectos más interesantes de EMME es la forma en que considera la interacción entre transporte público y transporte privado. La asignación de equilibrio (ver [31]) a la red de transporte privado considera que sobre algunos arcos existe un flujo fijo de vehículos de transporte público. Luego, la asignación "todo o nada" sobre la red de transporte público usa tiempos de recorrido que son función del tiempo sobre la red de transporte privado. El algoritmo de cálculo de rutas mínimas de EMME (en su primera etapa de desarrollo, EMME-1) es una versión adaptada del algoritmo CTPM de TRANSCOM. En este caso se ha hecho la simplificación de suponer que todas las líneas comunes tienen iguales tiempos de recorrido sobre la red y sólo son consideradas para el cálculo de la ruta mínima las tres líneas comunes de mayor frecuencia.

Mayor información sobre EMME-1 puede encontrarse en [5] y [32] a [37].

Una segunda versión de EMME (EMME-2) está en desarrollo. En su estado actual el modelo es interactivo gráfico (ver [3]) y en lo referente a la asignación a redes de transporte público el algoritmo "todo o nada" de la versión original ha sido reemplazado por un modelo de asignación a múltiples rutas propuestas por Spiess [38].

2.6 Otros modelos.

Varios modelos, de características similares a los ya descritos o mencionados podrían ser agregados a la lista de modelos de asignación a redes de transporte público, actualmente en uso. TRANSITNET es un modelo de asignación a redes de transporte público desarrollado por el Greater London Council durante el transcurso de un estudio de transporte para Londres. Es un modelo de tipo "todo o nada" con repartición de la demanda entre líneas comunes. TERESE (TEST de RESEaux) es un modelo de estimación de demanda y de asignación a redes de transporte público, desarrollado en la Universidad de Grenoble (ver [41]). El algoritmo de cálculo de rutas mínimas es una adaptación del algoritmo de Dijkstra y la asignación es de tipo "todo o nada" con consideración de las líneas comunes. TERESE fue concebido para analizar redes de tamaño medio (250-300 nodos y 1500 arcos).

DCO/TRANPLAN es un conjunto de programas para la planificación de transporte urbano, propiedad de De Leuw, Cather and Co. y Control Data Corporation, escrito para el sistema Control Data 6600. En lo relativo a los programas de análisis de redes de transporte público, DCO/TRANPLAN permite asignación "todo o nada" a las rutas mínimas y a rutas múltiples mediante el modelo STOCH, desarrollado por Dial (ver [13]).

Finalmente debe mencionarse el modelo DODOTRANS (Decision Oriented Data Organizer Transportation Analysis System), un conjunto de programas desarrollados en MIT (Massachusetts Institute of Technology). La característica principal del modelo de análisis de redes es la asignación incremental con restricción de capacidad. Desarrollado para aplicaciones académicas, DODOTRANS no pueda considerarse un modelo operacional para el análisis de redes de gran tamaño.

3. Discusión de los modelos presentados.

3.1 Comportamiento de los viajeros y el problema del acceso.

Como se ha visto, los modelos operacionales de asignación a redes de transporte público consideran principalmente dos tipos de hipótesis en lo referente al comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas. Por una parte, los modelos de tipo "todo o nada" suponen que los pasajeros que se desplazan entre dos zonas dadas usan todos el camino de costo generalizado mínimo.

Por otro lado, los modelos de asignación a múltiples rutas suponen que para un conjunto de alternativas "razonables", incluso si la alternativa de costo mínimo es la más probable, las demás tienen una probabilidad no nula de ser escogidas. Estos últimos han sido reconocidos en general como más satisfactorios. En primer lugar se dice que son capaces de simular más correctamente el hecho de que en la realidad pasajeros que viajan entre el mismo par de zonas usan a menudo caminos diferentes (ver [42], [43]). En otros casos, los modelos "todo o nada" han sido rechazados diciéndose que los viajeros no son capaces de percibir los caminos de costo generalizado mínimo (ver [44]) y que en fin, aún cuando pudieran hacerlo, ellos deberían repartirse entre rutas alternativas dado que la capacidad de cada alternativa es limitada [13]. Los argumentos en contra de los modelos "todo o nada" y a favor de los de asignación a rutas múltiples parecen, en principio, bastante razonables. Sin embargo, la exactitud de sus hipótesis no debe ser discutida independientemente del problema de agregación espacial y consecuentemente del problema del acceso. La incidencia de éste último en la calidad de los resultados de los modelos de asignación ha sido reconocida por numerosos autores (ver [6], [41], [45] entre otros). Resulta bastante evidente que el uso de más de una ruta entre dos zonas puede estar relacionado al tamaño de estas zonas y no necesariamente, ni principalmente, a diferencias en el comportamiento de los viajeros. Estudios empíricos de gran escala llevados a cabo en Montreal (ver [46], [47] y [48]) demuestran, al menos para el caso particular de los viajeros de esa ciudad, que los problemas de agregación espacial y de acceso son claramente más importantes como fuentes de error de los modelos de asignación a redes de transporte público que diferencias en el comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas. Los mismos estudios señalan que para el 88% (de los 17.000 casos estudiados) los itinerarios reales de los viajeros (sobre la red de transporte público) pueden ser replicados con un algoritmo de determinación de rutas de costo generalizado mínimo. Esto sugiere que si bien un algoritmo de tipo "todo o nada" aplicado entre centroides de zonas (como en el caso del modelo UTPS) puede tener un error importante debido a los problemas de agregación espacial y de acceso, éste puede reducirse considerablemente si el mismo algoritmo es aplicado entre nodos de la red como se hace en los modelos TRANSEPT y TRANSCOM.

Otro aspecto relacionado al comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas es el de las líneas comunes. La elección de uno u otro tipo de modelo deberá tomar en cuenta la situación real de las líneas comunes en la red analizada. Descartado el algoritmo CTPM de TRANSCOM para redes de gran tamaño la elección se reduce a UTPS (si el número de líneas comunes en determinados casos es muy alto) o al algoritmo modificado de TRANSCOM incorporado en EMME-1. En redes como las que se encuentran en Norteamérica y Europa, con pocas líneas comunes, el considerar las tres líneas comunes de mayor frecuencia parece una apro-

ximación razonable.

3.2 Los modelos interactivos gráficos.

Permaneciendo idénticas las demás características de un modelo de asignación, los modelos interactivos gráficos presentan ventajas sobre los modelos tradicionales especialmente en dos niveles. En primer lugar, en lo referente a la relación entre el analista (técnico) y el computador. La transferencia de información entre el analista y el computador (y viceversa) en el caso de los modelos tradicionales se hace a través de procedimientos que pueden llegar a ser relativamente complicados para un "no experto" en computación. Además, dependiendo del tipo de gestión de la instalación computacional en que se trabaja, puede requerirse, a veces, analistas en computación, los que no necesariamente están interesados en la planificación de transporte. El uso de modelos interactivos gráficos, particularmente en el contexto de la planificación de redes de transporte público, permite un diálogo directo entre el analista y el computador con respuesta (en muchos casos prácticamente instantánea) en forma de gráficos o de listados en la pantalla del terminal. La terminología usada para esta comunicación es la familiar al analista, obviándose de esta forma complicadas tareas de procesamiento de datos requeridos por otros modelos.

Es necesario recalcar que el carácter de interactivo de estos modelos es útil tanto en la etapa de entrada de datos para el análisis de una futura red (modificaciones a las redes vial, de transporte público, cambios de las características socio económicas del área estudiada, etc.) como para la obtención de los resultados incorporados a una base de datos. Sin embargo, a menos que el tamaño de las redes analizadas sea muy reducido, la etapa de asignación de viajes (centro del proceso de evaluación) deberá siempre ser ejecutado en "batch".

Un segundo aspecto del proceso de planificación de sistemas de transporte que se ve facilitado por la utilización de modelos interactivos gráficos es la comunicación de los resultados de un estudio a los responsables de la toma de decisiones (políticos). El tipo de información gráfica presentada (sobre todo si ésta es en colores) no sólo aumenta las posibilidades de comprensión por parte de personas no técnicas en la materia, sino que además tiende a mantener el interés en el problema que se les presenta.

3.3 Los modelos multimodales.

Si bien la incorporación del módulo INET en UTPS permite tomar en cuenta algunas interacciones entre modos (redes de transporte público y transporte privado) solamente EMME-2 puede ser considerado un modelo completamente multimodal. Es indiscutible que desde un punto de vista teórico la formulación de un modelo como EMME-2 es más robusta que las que están detrás de los restan-

tes modelos analizados y es bastante claro que su uso resultará ventajoso. Sin embargo, especialmente si las redes a analizar son de gran tamaño (del orden de 1000 centroides, 1000-2000 nodos y 150-300 líneas) la dimensión adquirida por la base de datos y los tiempos de ejecución de la etapa de asignación pueden transformarse en problemas, especialmente si el modelo es corrido en instalaciones computacionales de múltiples usos y sirviendo a muchos usuarios. Esto se debe a que, aún cuando los computadores sean muy poderosos, existen en general políticas de uso restringido (por ejemplo pasar grandes trabajos durante la noche). Es recomendable, en este caso, (análisis de redes de gran tamaño) usar computadores menos poderosos (especialmente mucho menos rápidos) pero dedicados exclusivamente al análisis de redes. Lo que se pierde en rapidez, se gana en accesibilidad debido al control que da sobre la gestión de la instalación computacional el hecho de ser usuario único.

4. ¿Qué tipo de modelo de asignación debería usarse en Santiago?

De la discusión presentada en la sección anterior se desprende una serie de recomendaciones respecto al tipo de modelo de asignación a redes de transporte público, independientemente del hecho de que estas redes pertenezcan a ciudades de países desarrollados o en vías de desarrollo. Entre las más importantes cabe señalar las siguientes:

- A pesar de las críticas generalizadas a los modelos de tipo todo o nada, la asignación (en el caso del transporte público) a las rutas de costo generalizado mínimo no parece inadecuada. Evidentemente, si un modelo de este tipo es aplicado para asignar viajes entre centroides de zonas, los resultados serán deficientes. La magnitud del error será mayor mientras mayor sea el tamaño de las zonas (problemas de agregación espacial y de acceso). Sin embargo, modelos como TRANSEPT y TRANSCOM que asignan a rutas mínimas entre nodos de la red (no entre centroides de zonas) pueden superar en buena medida la deficiencia antes señalada. Mientras mejores sean los modelos de acceso utilizados, mejores serán los resultados obtenidos.
- La codificación de la red de transporte público centrada en la línea como elemento principal en lugar del arco parece más adecuada. Esta última sólo puede justificarse si se considera que varios de los modelos analizados tiene una estructura heredada de los modelos de asignación a redes de transporte privado. Esta requiere de un esfuerzo mucho mayor de codificación y requiere de información que a menudo no está disponible (velocidad por modo y período del día para cada arco por ejemplo). La incorporación de INET a UTPS puede interpretarse como una corroboración de lo señalado.

- Resulta indiscutible que en la medida de que se disponga de los recursos económicos, técnicos y humanos necesarios, los modelos interactivos gráficos y multimodales son preferibles a sus respectivas contrapartes.

Además de estas recomendaciones de carácter general deben agregarse dos particulares al caso de análisis de redes en ciudades de países en desarrollo y más concretamente a la ciudad de Santiago:

- Dada la partición modal altamente favorable al transporte público, situación que no es la norma en países desarrollados, el número de líneas de superficie es muy alto. Además, debido tanto a la estructura de recorrido (una gran mayoría pasa por el centro de la ciudad) como a la organización empresarial de los operadores (muchos pequeños empresarios que presionan por tener rutas que pasen por las arterias principales), el problema del tratamiento de las líneas comunes es de una importancia capital. Resulta evidente que no es posible simular correctamente lo que pasa en calles como Vicuña Mackenna, Gran Avenida, Independencia, Av. B. O'Higgins, etc. con un modelo que sólo considera la existencia de un máximo de 3 líneas comunes (TRIPS, TRANSCOM, EMME-1, etc.). Incluso UTPS que trata hasta un máximo de 31 líneas comunes resulta insuficiente en casos como los señalados.
- Al codificar una red, es común encontrarse con particularidades (tipos de líneas por ejemplo) que no han sido consideradas por quienes desarrollaron un determinado modelo, por no tener importancia en la realidad para la cual éste fue concebido. Sucede corrientemente que al aplicar dicho modelo en otra situación sea necesario adaptar el problema a tratar al modelo ante la imposibilidad de hacer lo contrario. Por este motivo es recomendable que las herramientas de análisis no constituyan para el analista una "caja negra". En lo posible es deseable contar con listados debidamente documentados de manera de que sea posible incorporar modificaciones.

4. Referencias.

1. DIAL, R.B. (1976) Urban transportation planning system: philosophy and function. Transportation Research Record 599, pp 60-64.
2. FLORIAN, M., CHAPLEAU, R., NGUYEN, S., ACHIM, C., JAMES, L., GALARNEAU, S., LEFEVRE, J. y FISK, C. (1979). Validation and application of an equilibrium-based two-mode urban transportation planning method (EMME). Transportation Research Record 728, pp 14-23.
3. BABIN, A., FLORIAN, M., JAMES, L., y SPIESS, H., (1982) EMME-2: Interactive graphic method for road and transit planning. Transportation Research Record 866, pp 1-9.
4. SPIESS, H., (1983). On optimal route choice strategies in transit networks. Publication N°286, Centre de Recherche Sur les Transports, Université de Montréal.
5. ACHIM, C., y FLORIAN, M., (1979) EMME: a computer system for urban transportation planners. Publication N°127, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
6. LAST, A., y LEAK, S.E. (1976). Transept: a bus model. Traffic Engineering and Control, pp 14-20.
7. CHAPLEAU, R. y TROTTIER, P. (1979). L' utilisation du modèle d'affectation TRANSCOM dans la planification opérationnelle d'un réseau de transport en commun. Routes et Transports, Agosto 1979, pp 23-31.
8. RAPP, M.H. y MATTENBERGER, Ph. (1977). Planification Opérationnelle des transports urbains en commun: Approches et applications. Trabajo presentado a la Conferencia Mundial sobre la Investigación en Transportes, Rotterdam, Holanda.
9. DIAL, R.B. y BUNYAN, R.E. (1968). Public transport planning system. Socio-Econ. Plan. Sci. Vol. 1, pp 345-362.
10. MARTIN AND VOORHEES ASSOCIATES. Trips: Transportation Improvements Programming System.
11. DIAL, R.B., RUTHERFORD, G.S. y QUILLIAN, L. (1979) Transit network analysis: INET. Informe U.M.T.A.-U.P.M-20-79-3. U.S. Department of Transportation.
12. DIAL, R.B. (1967) Transit pathfinder algorithm. Highway Research Record N°205, pp 67-85.
13. PEAT, MARWICK, MITCHEL y Co. (1973). A review of operational urban transportation planning models. NTIS PB-222-109

14. U.M.T.A. (1972) UMTA transportation planning system, network development manual. NTIS, PB-212-930.
15. CHAPLEAU, R. (1974) Réseaux de transports en commun: structure informatique et affectation. Publication N° 13, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
16. CHRIQUI, C. (1974) Réseaux de transports en commun: les problèmes de cheminement et d'accès. Publication N° 11, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
17. CHRIQUI, C. y ROBILLARD, P. (1975) Common bus lanes. Transportation Science 9, pp 115-121.
18. JOHNSON, N.L. (1970). Continuous Univariate Distributions. Houghton Mifflin Co., Boston.
19. DALY, A.J. (1973). Transept: a multipath public transport assignment model. P.T.R.C. seminar proceedings.
20. DALY, A.J. y ROGERS, K.B. (1973a) Planning bus services. L.G.O.R.U. Royal Institute of Public Administration.
21. DALY, A.J. y ROGERS, K.B. (1973b) Planning urban bus routes. L.G.O.R.U. Royal Institute of Public Administration, Informe C-149.
22. ACHIM, C., CHAPLEAU, R., CHRIQUI, C. y FLORIAN, M. (1976) Transit route development and evaluation techniques: a survey of the state of the art. Publication N° 47, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
23. ORTUZAR, J.D. (1980). Modal Choice Modelling with Correlated Alternatives, tesis de doctorado, Institute for Transport Studies, University of Leeds.
24. SCHNEIDER, J.B. y GEHNER, C.D. (1973). The interactive graphic transit design system: a brief non-technical overview of its structure and operation. The logistics and transportation review, Vol. 10, N°1, pp41-53
25. RAPP, M.H. (1972) Transit system planning: a man-computer interactive graphic approach. Highway Research Record N° 415, pp 49-61
26. RAPP, M.H. (1972) Planning demand-adaptive urban public transportation systems: the man-computer interactive graphic approach. NTIS PB 202-412.
27. RAPP, M.H. (1972) Man-machine interactive transit system planning. Socio Econ. Plan. Sci., Vol 6, pp 95-123

28. U.S. Department of Transportation (1978) Overview of the ITAM and IGTDs packages.
29. DIAL, R.B. (1971) A multipath traffic assignment model. Highway Research Record N° 369, pp 199-210
30. FLORIAN, M. (1977) A traffic equilibrium model of travel by car and public transit modes. Transportation Science 11 (2), pp 166-179.
31. NGUYEN, S. y JAMES, L. (1975) TRAFFIC - an equilibrium traffic assignment programme. Publication N°7, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
32. ACHIM, C. y CHAPLEAU, R. (1976) EMME-coding the transit network. Publication N°49, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
33. FLORIAN, M., CHAPLEAU, R., NGUYEN, S., ACHIM, C., JAMES, L., GALARNEAU, S., LEFEVRE, J. y FISK, C. (1977) EMME: a planning method for multi-modal urban transportation systems. Publication N°62, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
34. FLORIAN, M. (1979) EMME summary report. Publication N°101, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
35. FLORIAN, M. y SPIESS, H. (1981) On two mode choice/assignment models. Publication N°177, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
36. FISK, C. y NGUYEN, S. (1979) Properties of the two Mode Equilibrium assignment models with flow dependent transit costs. Publication N°121, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
37. ACHIM, C. (1979) EMME user's guide. Publication N°129, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
38. FLORIAN, M. y SPIESS, H. The convergence of diagonalization methods for fixed demand asymmetric network equilibrium problems. Publication N°198, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
39. ORCHARD, A.J., SINFIELD, A.C. y WARREN, D.M. (1972) Transitnet 1970 network specification and calibration. Research Memorandum N°368, Greater London Council.
40. ORCHARD, A.J., SINFIELD, A.C. y WARREN, D.M. (1972) Final calibration of the transitnet public transport trip assignment model on a 1962 network. Research Memorandum N°330, Greater London Council.

41. KHELIFI, D. y UHRY, J.P. (1978) TERESE (TEsts de REseaux): Modèles de transport collectif urbain. Informe de Investigación N°125 Institut National Polytechnique de Grenoble.
42. DAGANZO, C.F., BOUTHELIER, F. y SHEFFI, Y. (1977) Multinomial probit and qualitative choice: a computationally efficient algorithm. Transportation Science Vol. 11, N°4, pp 338-358.
43. FLORIAN, M. y FOX, B. (1976) On the probabilistic origin of Dial's multipath traffic assignment model. Transportation Research, Vol. 10, N°5, pp 339-341.
44. DAGANZO, C.F. y SHEFFI, Y. (1977) On stochastic models on traffic assignment, Transportation Science, Vol. 11, N°3, pp 253-274.
45. DAGANZO, C.F. (1977) Network representation, continuum approximations and a solution to the spatial aggregation problem of traffic assignment. Working paper N°7702, Institute of Transport Studies, University of California.
46. DE CEA, J. (1982) Modèles d'affectation de réseau de transport collectif urbain: traitement de l'accès et de la diversion entre les chemins. Publication N°268 Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal.
47. DE CEA, J. y CHAPLEAU, R. (1983) Modelling the behaviour of public transport users: an empirical study for the city of Montreal. 11th. PTRC Summer Annual Meeting, University of Sussex, 4-7 July, 1983.
48. CHAPLEAU, R. y DE CEA, J. (1983) La perception de l'offre par les usagers du transport en commun sous la perspective d'un modèle d'affectation. World Conference on Transport Research, Hamburgo, 26-29 abril, 1983.