ESTIMACION DE MATRICES DE VIAJES A PARTIR DE AFOROS DE TRAFICO: EXPERIENCIA RECIENTE

LUIS G. WILLUMSEN
University College London

RESUMEN

Los modelos clásicos usados para la estimación de matrices de viaje requieren de una gran cantidad de información la que es costosa de recolectar. Aún más, esta información tiende a quedar obsoleta muy pronto en los países de cambio rápido debido al crecimiento que ellos experimentan. Esta realidad presenta un doble problema: por una parte el cambio rápido requiere de una planificación continua que actualice estimaciones de demanda y adecue planes a su evolución; por otra, los altos costos de recolectar la información necesaria dificultan el seguimiento y la actualización de predicciones y planes.

El autor ha investigado la posibilidad de usar información de bajo costo en la estimación de matrices de viajes como una manera de contribuir a la solución de este problema. El ha basado su investigación en el uso de aforos de tráfico para calibrar modelos de demanda y para estimar y actualizar matrices de viajes. Uno de estos modelos usa un esquema de maximización de la entropía (o minimización de la información) para estimar la matriz de viajes más probable cuya asignación a la red de transporte reproduce los aforos disponibles. En otra familia de modelos se calibran modelos gravitacionales a partir de aforos; estos usan información adicional como la población de cada zona o los niveles de empleo. Este artículo se centra en el primer grupo.

El modelo de actualización desarrollado por el autor fue validado usando una base de datos muy detallada para el centro de la ciudad de Reading, Inglaterra. Se encontró que las matrices estimadas en esta forma estaban dentro del rango de variaciones de día en día, lo que se consideró satisfactorio. El modelo ha sido incorporado en varios paquetes computacionales y utilizado en numerosos estudios en Inglaterra, Chile, Indonesia, Nueva Zelanda y otros países. El autor ha participado en varios de estos estudios y este artículo discute esta experiencia considerando aspectos como:

— Número y localización de los aforos de tráfico.
— Importancia de la matriz a actualizar.
— Importancia del modelo de selección de rutas.
— Errores en los aforos y las matrices.

Se concluye con comentarios para su aplicación en el futuro.

1. INTRODUCCION

La planificación del transporte usando modelos matemáticos en una empresa de alto costo. La planificación sin modelos explícitos puede tener costos aún mayores en términos de decisiones erróneas y oportunidades desaprovechadas. Por ello, numerosos investigadores han tratado de reducir los costos en dinero, tiempo y recursos, de utilizar modelos de transporte. Esta reducción acarrearía dos ventajas adicionales: primero, sería posible utilizar modelos en situaciones en que normalmente no se emplean, por ejemplo para analizar un problema urgente de gestión de tráfico. Segundo, permitiría llevar a cabo tareas de seguimiento, las que son indispensables en el proceso de planificación, especialmente en los países en desarrollo.

Los problemas de seguimiento se plantean cuando se hace necesario actualizar un Plan de Transporte. Como ninguna predicción del futuro puede ser exacta, la evolución del sistema de transporte siempre diferirá de aquella predicha cuando se elaboró el Plan. ¿Cómo podemos darnos cuenta si es necesario revisar las predicciones y modificar el Plan? ¿Qué correcciones serán las más adecuadas?

Se puede tratar de correr nuevamente los modelos de transporte usando nuevos datos (en vez de las estimaciones usadas en el Plan original) y corregir también las predicciones a futuro en base a la nueva evidencia disponible. Esto tiene un costo alto ya que se requiere efectivamente repetir regularmente buena parte del estudio original, lo que toma tiempo y consume recursos.

Una segunda opción sería desarrollar modelos de transporte más simplificados y económicos, y que sólo requieran de información fácil de recolectar y a bajo costo. Esto permitiría implantar un proceso de recolección regular de información y correr estos modelos, por ejemplo, una vez al año para revisar predicciones. En la medida en que estas se vayan apartando de las predicciones originales del Plan éste requerirá ajustes los que podrían estudiarse usando los mismos modelos simplificados. Esta estrategia además de detectar desviaciones del Plan permite adquirir una mejor comprensión del problema y una acumulación sistemática de experiencia.

Esta es un área poco explorada en el modelaje de transporte y por el momento no existen muchos modelos que satisfagan este tipo de requerimiento. Esto se debe en parte a que los países donde se realiza la mayor parte de la innovación en modelaje de transporte no están tan interesados en el seguimiento ya que sus economías son más estables y las tasas de cambio más bajas. Uno de los modelos propuestos para este fin ha sido desarrollado por Willumsen (1978) y utiliza aforos de tráfico para estimar y actualizar matrices de viaje. Esta es una de las tareas más importantes que se requiere para actualizar planes pero no satisface todas las necesidades del seguimiento.

2. SIMPLIFICCION Y AFOROS DE TRAFICO

Se puede esperar que un modelo simplificado sea menos exacto que un modelo más complejo y realista. Sin embargo, la exactitud de un modelo no depende sólo de su realismo, depende también de la calidad de los datos que utiliza. En general, un modelo más complejo requerirá de más datos y ejecutará más operaciones con ellos aumentando así los errores de esa fuente. Un modelo más sencillo tendrá mayores errores de especificación por ser no muy realista pero presumiblemente sufrirá de menos errores debido a los datos (Alonso, 1968). El problema de errores en los datos es más grave cuando se trata de predecir el futuro ya que en este caso los datos no son tales sino estimaciones del valor futuro de variables como la población, su distribución en y dentro de zonas, etc.

Los aforos de tráfico (clasificados o no) son relativamente baratos y fáciles de obtener. A menudo se recogen para apoyar otras tareas de ingeniería como ser el diseño de intersecciones o el análisis de necesidades de manutención. En segundo lugar, contar tráfico (o pasajeros) es una actividad que no causa molestias ni demoras a los usuarios. Finalmente, los aforos son ideales para estudiar variaciones horarias, diarias y estacionales en la demanda, lo que es mucho más difícil y costoso con otro tipo de encuesta.

El volumen de tráfico en un arco de una red de transporte puede medirse en vehículos o pasajeros/toneladas utilizando un coeficiente de conversión adecuado. En lo que sigue se supone que las unidades son viajeros, pero la extensión a carga o vehículos es casi trivial.

Se puede considerar al volumen de un arco como el resultado de una matriz de viajes en el área (Tij) y las rutas que los usuarios escogen para conectar cada origen con cada destino. Esta relación puede escribirse como:

$$V_a = \sum_i \sum_j T_{ij} P_{ij}^a \qquad (1)$$

en que:

V_a = volumen en el arco a

T_{ij} = viajes entre origen i y destino j

P_{ij}^a = proporción de los viajes entre i y j que utiliza el arco a

La variable P_{ij}^a tomará valores $0 < P_{ij}^a < 1$. Si los viajeros escogen sólo una ruta entre i y j entonces los arcos en la ruta seleccionada tienen $P_{ij}^a = 1$ y el resto de los arcos $P_{ij}^a = 0$. El valor de este indicador P_{ij}^a se puede obtener de un buen modelo de selección de rutas y este deberá escogerse de modo que sea realista en cada aplicación. En el caso de los modelos de asignación proporcionales (todo-o-nada y la mayoría de los modelos estocásticos, ver Robillard, 1975) el parámetro P_{ij}^a se puede calcular independientemente de la matriz (T_{ij}). En los otros caso, se requiere un tratamiento iterativo de estimación de (P_{ij}^a) y (T_{ij}), ver Willumsen (1982).

Si se considera (P_{ij}^a) suficientemente bien estimado por un modelo de asignación y existen varios aforos de tráfico V_a entonces se tendrá un sistema de ecuaciones lineales del tipo (1) y con tantas incógnitas T_{ij} como celdas existan en la matriz de viajes. En la casi totalidad de los casos el número de incógnitas es mucho mayor que el número de observaciones y por lo tanto el sistema de ecuaciones se encuentra sub-especificado. En estas condiciones es posible generar más de una matriz de viajes (T_{ij}) que reproduzca los aforos una vez asignada a la red.

Considere, por ejemplo, la red pequeña:

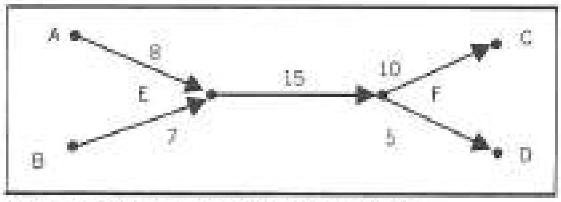

FIGURA 1. Red simple con aforos de tráfico.

En esta red las cifras denotan los flujos observados. Se puede ver que estos flujos pueden ser generados por cualquiera de las matrices siguientes:

	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
A	8	0	7	1	6	2	5	3	4	4	3	5
B	2	5	3	4	4	3	5	2	6	1	7	0

Los aforos no son suficientes para identificar una matriz única que los genere.

Una forma de resolver el problema de indeterminación de la matriz de viajes es el hacer hipótesis adicionales acerca del comportamiento de los viajeros. Por ejemplo, se puede suponer que los viajes deben reponder a un modelo gravitacional y se utilizan entonces las observaciones (aforos) para calibrar los parámetros de este modelo. Una discusión de las ventajas y limitaciones de esta solución se encuentra en Willumsen (1981a, 1985).

3. ACTUALIZACION DE MATRICES

Este problema de indeterminación puede abordarse de otra manera, la que tiene ventajas desde el punto de vista de las tareas de seguimiento. Se puede visualizar el problema como el estimar la matriz de viajes más parecida a una matriz de referencia pero que reproduzca al mismo tiempo los aforos observados. Esta matriz de referencia podría ser una matriz antigua que no logra reproducir las observaciones ya que el tráfico ha evolucionado en el área estudiada. Se trata entonces de utilizar la información contenida en los aforos de tráfico para mejorar, poner al día, la matriz histórica de viajes.

Considere, por ejemplo, la matriz de referencia (obtenida 5 años atrás) siguiente para la red de la Figura 1:

	C	D
A	3	2
B	1	3

Esta matriz produce sólo 9 viajes en el arco EF. Si tenemos un sólo conteo de 15 viajes precisamente en ese arco, podemos suponer, en la ausencia de información adicional, que los viajes han crecido uniformente en todas las celdas de la matriz. La nueva matriz actualizada se obtiene multiplicando cada celda de la matriz de referencia por 15/9 generando una nueva matriz de:

	C	D
A	5.00	3.33
B	1.67	5.00

Suponga ahora que obtenemos suficientes recursos como para contar tráfico en el arco FC y encontramos que tiene 10 viajes. La matriz que acabamos de actualizar genera sólo 6.67 viajes en este arco pero dada esta nueva información podemos modificarla de modo que reproduzca este conteo. Para ello multiplicamos aquellas celdas que utilizan FC (AC y BC) por 10/6.67 generando:

	C	D
A	7.50	3.33
B	2.50	5.00

Esta matriz produce ahora 18.33 viajes en el arco EF sobre-estimando ese flujo. Podemos corregir la matriz en forma iterativa modificando cada vez las celdas que utilizan cada arco con aforos de modo que los flujos generados reproduzcan las observaciones y con la esperanza de que el proceso sea convergente. Se puede generalizar este procedimiento aún más para redes más complejas y con aforos adicionales. El procedimiento es similar a las correcciones tipo Furness pero se aplican no a filas y columnas sino a las partes de la matriz que utilizan los arcos con aforos.

Esta estrategia puede representarse por la fórmula siguiente:

$$T_{ij} = t_{ij} \prod_a X_a^{P_{ij}^a} \qquad (2)$$

en que:

t_{ij} = matriz de referencia

X_a = coeficiente de corrección o balanceo para el conteo a

La letra $\prod$ indica el producto de coeficientes de acuerdo al índice a. El exponente P_{ij}^a asegura que sólo las celdas que utilizan el arco con observaciones son corregidas por X_a.

El proceso descrito opera bien en la práctica necesitando entre 10 y 50 iteraciones para converger a una tolerancia de, digamos, el 5%. Es necesario, sin embargo, responder algunas preguntas:

A. ¿Existe seguridad de que el proceso iterativo conduzca siempre a una matriz que reproduce todos los aforos? ¿Es el procedimiento convergente?

B. ¿Es esa solución única, independiente del orden en que se procesen los aforos?

C. ¿Qué interpretación teórica puede darse a la matriz resultante?

4. FORMULACION DEL PROBLEMA

El autor (Willumsen 1978, 1981a) ha reformulado el problema como uno de programación matemática. La ventaja de esta estrategia es que se hace uso de la teoría de programación matemática para probar la unidad y convergencia del problema e identificar las condiciones que deben cumplirse para su solución. Esta formulación se describirá someramente omitiendo los desarrollos matemáticos los que se pueden encontrar en detalle en Willunsem (1981b) y Van Zuylen & Willunsem (1980).

El problema se re-formula como una minimización sujeta a restricciones lineales:

$$\text{Minimizar } S(T_{ij}/t_{ij}) = \sum_i \sum_j (T_{ij} \ln T_{ij}/t_{ij} - T_{ij} + t_{ij}) \qquad (3)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a - V_a = 0 \qquad (1)$$

$$\text{y } T_{ij} > 0 \qquad (4)$$

Se puede demostrar que la función objetivo (3) es cóncava y por tanto tiene un mínimo único siempre que exista al menos una solución al sistema de restricciones lineales (1) y (4). La función objetivo (3) se puede interpretar también como una medida de la distancia (o diferencia) entre la matriz de referencia (t_{ij}) y la matriz actualizada (T_{ij}). Es fácil probar que la función objetivo es aproximadamente:

$$S(T_{ij}/t_{ij}) = {}^{ij} (T_{ij} - t_{ij})^2/T_{ij}$$

la que también es una medida de la diferencia entre T_{ij} y t_{ij}.

El programa matemático (3) - (1) - (4) busca una matriz que minimice esta función de distancia (sea tan parecida a t_{ij} como sea posible) y que satisfaga las restricciones, es decir reproduzca las observaciones.

Se puede demostrar que el proceso iterativo descrito en la sección anterior resuelve el problema dual correspondiente al programa matemático original y por lo tanto resuelve también el problema de minimización. Las respuestas a las preguntas anteriores son entonces:

A. Sí, el proceso es convergente y la matriz resultante debe reproducir los aforos y es, además, única.

B. Los aforos se reproducirán siempre que las ecuaciones (1) tengan al menos una solución.

C. La matriz resultante es la más cercana, de acuerdo con la definición de distancia implícita en (3), a la matriz de referencia y que reproduce los aforos.

La función objetivo (3) tiene interpretación como una medida de la información contenida en la diferencia entre las dos matrices o como una función de entropía con el signo cambiado. Principios de minimización de información y maximización de entropía se han utilizado para generar modelos agregados de demanda, ver por ejemplo Wilson (1970). Por ello, este modelo de estimación de matrices a partir de aforos de tráfico se conoce también como ME2 (Maximum Entropy Matrix Estimation).

Las condiciones matemáticas para la convergencia del modelo descrito tienen su contraparte práctica de modo que es posible verificar de antemano si las restricciones no tienen solución. Estas condiciones son:

1. El conjunto de los aforos de tráfico debe satisfacer las leyes de conservación de flujos. En particular, la suma de los flujos que entra a un nodo debe ser igual a la de los que sale. En la práctica puede ser necesario corregir los aforos para compensar errores u observaciones realizadas en días diferentes.

2. El modelo de selección de rutas utilizado para estimar las proporciones P_{ij}^a debe ser suficientemente realista. Si un modelo pobre no asigna ruta alguna sobre un arco que tenga en la práctica observaciones no será posible reproducir los aforos en ese arco.

3. La matriz de referenia (t_{ij}) no debe tener demasiados ceros ya que el modelo multiplica sus valores por factores de corrección y por lo tanto todo cero inicial será cero en la solución final.

5. EXTENSIONES

Una de las ventajas de la formulación matemática del problema es que es posible introducir extensiones agregando información adicional en la forma de restricciones, en lo posible lineales. Algunos ejemplos de esta estrategia son:

— Incorporar la información contenida en ventas de boletos de diferentes tipos en el caso de Metros y transporte público. Esta adaptación fue implementada por Higuerey y Willumsen (1984) quienes la probaron con éxito con los Metros de Londres y Santiago.

— Introducir restricciones con respecto a la distribución de longitudes o tiempos de viaje. Esta idea ha sido incorporada en una versión del paquete MOTORS y fue utilizada en Jakarta, Indonesia (Willumsen, 1984a).

— Usar desigualdades además de igualdades, por ejemplo para asegurarse que el flujo modelado en un arc nunca sea superior a su capacidad.

La matriz de referencia se puede obtener de una matriz antigua, de una parcial obtenida de un estudio que abarca un área mayor o de una encuesta vial de muestra pequeña. Si no hay información alguna se puede suponer que todos los pares origen-destino tendrán, a priori, el mismo número de viajes, por ejemplo $t_{ij} = 1$ para todo ij; alternativamente, se puede sintetizar una matriz de referencia utilizando un modelo de demanda, por ejemplo uno del tipo gravitacional.

Los errores en los aforos de tráfico requieren un tratamiento distinto. El problema es que el modelo trata de reproducir todos los aforos, aunque muchos contengan errores de distinta magnitud. Las primeras implementaciones de ME2 en SATURN (Hall et al 1980) adaptaron la idea de restringir los valores que puedan tomar los factores de corrección X_a a rangos especificados por el usuario, típicamente entre 0.2 y 5.0. De esta manera no se permite a los aforos que modifiquen la matriz de referencia más allá de ciertos límites.

Una manera más rigurosa de tratar el mismo problema es considerar explícitamente la importancia o confianza asociada a cada conteo en relación a la confiabilidad de los valores de la matriz de referencia. Tanto Bell (1983) como Maher (1983) han propuesto modelos que utilizan distribuciones de errores para la matriz de referencia y los aforos y que producen estimaciones de la confiabilidad de los resultados. Sin embargo, estos modelos demandan bastante capacidad computacional para tratar aún problemas relativamente sencillos.

Willumsen (1984b) ha desarrollado un modelo más sencillo extendiendo la idea de usar la función de entropía como una medida de separación, en este caso entre el conteo observado v_a y un conteo ideal sin error, pero desconocido V_a. Se puede formar entonces una función objetivo compuesta y el problema se re-escribe como:

Minimizar

$$\sum_{ij} T_{ij}(\ln T_{ij}/t_{ij} - 1) + \sum_{a} \alpha_a V_a (\ln V_a/v_a - 1) \quad (5)$$

sujeto a las restricciones (4) y:

$$\sum_{ij} T_{ij} P^a_{ij} - V_a = 0 \quad (6)$$

Notar que las constantes t_{ij} y v_a han sido omitidas por no afectar la solución. En (5) el parámetro α_a juega el papel de ponderador o "confianza" asociada al conteo a. La solución de este programa matemático tiene la forma.

$$T_{ij} = t_{ij} \Pi_a X_a^{P^a_{ij}} \quad (2)$$

y

$$V_a = v_a X_a^{-1/\alpha a}$$

Como puede verse, el modelo básico ME2 se obtiene cuando todos los $\alpha_a = \infty$, es decir cuando se tiene absoluta confianza en los aforos. Valores positivos de α_a menores que ∞ indicaran menores niveles de confianza en los aforos. Esta variación del modelo podría llamarse entonces ME2α. Se ha preparado una implementación de esta versión adaptando el algoritmo básico utilizado en SATURN y en las pruebas realizadas con él se ha comprobado su comportamiento.

6. VALIDACION

6.1 LA BASE DE DATOS.

El Transport and Road Research Laboratory (TRRL) realizó una toma de datos muy copleta en Reading durante Octubre de 1976 (Leonard and Tough, 1979) y ésta ha servido de base de datos para validar el modelo ME2. Esta encuesta cubrió la totalidad del área central de Reading por un período de dos horas (1610-1810) cuantro días a la semana. El resultado de este estudio fue al menos cuatro matrices de viajes correspondientes a días consecutivos de una semana y aforos de tráfico consistentes con esas matrices. Las observaciones fueron validadas utilizando vehículos flotantes y contadores automáticos de tráfico. El área estudiada fue codificada en 39 centroides, 80 nodos y 159 arcos unidireccionales.

El autor utilizó numerosos indicadores para estudiar las variaciones diarias entre matrices y la bondad de las estimaciones producidas por ME2. Sin embargo, los más significativos parecen ser:

A. Error absoluto relativo medio, % MAE

$$\% \text{ MAE} = 100 \sum_{ij} | T^1_{ij} - T^2_{ij} | / \sum_{ij} T^1_{ij}$$

donde T^1_{ij} y T^2_{ij} son dos matrices y n es el número de celdas.

B. Raíz del error cuadrático relativo

$$\% \text{ RMSE} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{ij} (T^1_{ij} - T^2_{ij})^2}{n}} / (\Sigma T^1_{ij}/n)$$

Indicadores análogos se computaron para estudiar las variaciones diarias de flujos reemplazando T_{ij} por V_a en las ecuaciones. Un resumen de los resultados de las variaciones diarias aparece en la Tabla 1.

Si bien las variaciones diarias al nivel de los flujos presentaban más o menos las característi-

INDICADOR	FECHAS			
	LUNES 18 MATRIZ	MARTES 19 FLUJO	MARTES 19 MATRIZ	JUEVES 21 FLUJO
% MAE	76	11	85	14
% RMSE	160	21	148	19

TABLA 1. Comparación de matrices y flujos en distintos días.

cas esperadas, aquéllas que corresponden a las matrices parecen ser mayores de lo que uno habría imaginado. Parte de estas variaciones se deben probablemente a desviaciones menores en los viajes de retorno al hogar, por ejemplo el parar para esperar a un pasajero en la estación ferroviaria o visitar el hospital local. Sin embargo, estas desviaciones son relevantes al diseñar nuevas medidas de tráfico. En todo caso, si la variabilidad es tan grande como esta evidencia indica parece poco razonable utilizar métodos caros para estimar una matriz cuando puede interesar más estimar sus variaciones en el tiempo.

6.2 TESTS CON EL MODELO ME2.

Se realizaron numerosas pruebas con el modelo ME2 utilizando varios modelos de selección de rutas, diferentes niveles de aforos, errores artificiales, niveles de agregación, etc. Los resultados de estos tests se detallan en Willumsen (1981b); aquí sólo entregamos un resumen de ellos utilizando los datos del Martes 19. Como no se contaba con una matriz histórica se supuso que todos los pares origen-destino tendrían el mismo número de viajes a priori: $t_{ij} = 1.25$. Se utilizó entonces la totalidad de los aforos para estimar matrices de viaje con ME2 y las que resultaron se compararon con aquellas observadas por TRRL. En todos estos tests las iteraciones continuaron hasta que los aforos fueron reproducidos dentro de una tolerancia del 5 por ciento. Los tiempos de computación son para un Amdahl 470 V7.

El modelo fue probado utilizando los siguientes modelos de selección de rutas: todo-o-nada, estocástico de Burrell con parámetros de dispersión de $\mu = 10$ y 30 por ciento y un modelo de asignación con congestión de equilibrio. Los resultados se resumen en la Tabla 2.

De esta Tabla puede verse que:

A. Las matrices estimadas no son muy parecidas a las observadas pero se acercan al rango de las variaciones de día-en-día.

B. Aún con asignación de todo-o-nada los resultados son razonables.

C. El método de Burrell no produce, en este caso, mayores mejoras, y

D. El modelo de selección de rutas de equilibrio produce los mejores resultados, lo que no es sorprendente dados los niveles de congestión en el área de estudio. Sin embargo, estas mejoras tienen su costo en términos de tiempo de CPU.

Se probó también la sensitividad del modelo con respecto al número de aforos disponibles. Se observó que si los aforos se seleccionaban con un cierto juicio estos podían reducirse a un 30% de los arcos sin reducir la exactitud de la matriz estimada en más de un 10 por ciento (%MAE).

A menudo las matrices de viaje no son un fin en sí mismas; se quieren para diseñar y evaluar proyectos de inversión en transporte. Lo que importa entonces es que sean lo suficientemente exactas como para que las decisiones tomadas sean robustas. En una prueba de este tipo se pudo comprobar que el uso de una matriz estimada con ME2 al evaluar un proyecto de inversión (completar un anillo de alta capacidad en Reading) no producía flujos significativamente diferentes de los generados al usar la matriz observada. Por ello no parece aventurado recomendar el uso de este modelo para tareas de diseño y evaluación de proyectos.

MODELO DE RUTAS INDICADOR	TODO-O-NADA	BURRELL $\mu = 10\%$	BURRELL $\mu = 30\%$	EQUILIBRIO
% MAE	92	101	95	89
% RMSE	172	221	187	159
ITERACIONES	13	15	13	66
TIPO CPU (SGS)	1.82	6.63	6.69	132.6

TABLA 2. Comparación de matrices observadas versus estimadas con ME2 utilizando diferentes modelos de selección de rutas y todos los 159 aforos.

Más tarde se han realizado varios estudios para apreciar el valor de matrices históricas reales. Se encontró que si éstas habían sido bien estimadas usando una muestra suficientemente grande su valor era considerable. Una buena matriz a priori puede reemplazar un gran número de aforos. Sin embargo, se encontró que en la práctica numerosas matrices han sido obtenidas utilizando muestras pequeñas o han sido manipuladas para satisfacer ciertas restricciones, como ser aforos a través de una línea de pantalla. Esas manipulaciones a menudo distorsionan otras partes de la matriz y reducen su valor.

7. RECOMEDACIONES

7.1 APLICACIONES

El modelo ha sido implementado en varios programas comerciales incluyendo SATURN, Mini-TRAMP y MOTORS. Con ellos ha sido utilizado en numerosos estudios y en por lo menos 30 ciudades desde Santiago a Christchurch en Nueva Zelanda e incluyendo Harrogate, Liverpool y Winchester en Inglaterra. estas aplicaciones cubren desde estimar virajes en una intersección compleja hasta modelar la matriz de viajes en una ciudad de más de 7 millones de habitantes. en la mayoría de los casos se trató de actualizar matrices para estudios de gestión de tráfico o para estudios en ciudades de hasta medio millón de habitantes. Otro uso interesante de ME2 es para completar matrices de viaje usando aforos cuando una parte de ella ha sido obtenida mediante métodos convencionales. Las siguientes recomendaciones son el resultado de la experiencia en estas aplicaciones.

7.2 DEFINICION DE LA RED.

A. En general la red de transporte debe codificarse a un nivel de detalle mayor que de costumbre para estudios de planificación de transporte aunque no necesariamente tan detallado como en el caso de estudios de gestión de transporte.

B. El nivel de detalle utilizado en estudios de gestión de tráfico es adecuado para estimar matrices a partir de aforos.

C. Tomar en cuenta dónde se realizarán los aforos y, por supuesto, incluir esos arcos. Incluir arcos para virajes si hay aforos en ellos.

D. Prestar atención a la localización de conectores de centroides; no conectar dos conectores al mismo nodo (a menos que se tenga una buena matriz de referencia).

E. A veces conviene utilizar zonas más pequeñas para estimar la matriz la que luego se agrega a zonas más grandes. Si hay parques de estacionamiento grandes conviene declararlos como zonas y ubicar un conector en sus accesos.

7.3 AFOROS.

A. No contar cerca de conectores de centroides a menos que éstos correspondan a un centro real de atracción o generación de viajes (estacionamientos).

B. Es conveniente contar cerca de los límites entre zonas; los aforos que controlan al flujo de entrada y salida de una zona son muy valiosos.

C. Si se tiene una matriz de referencia se necesitan al menos tantos aforos como zonas. Si no hay matriz de referencia se necesita contar entre 20 y 30% de los arcos para tener resultados razonables.

D. Poner todos los aforos sobre una base común en términos de día de la semana, mes, año, período de conteo.

E. No vale la pena contar en arcos que sean linealmente dependientes. Seleccione arcos que lleven diferentes "grupos" de pares O-D.

F. Si se dispone de tiempo y recursos se puede estimar la matriz con los aforos disponibles, cargarla a la red, ver si hay resultados absurdos y contar en esos arcos y repetir el proceso.

7.4 MATRIZ DE REFERENCIA

A. Una matriz histórica es valiosa en la estimación, si no se la tiene se puede sintetizar usando un modelo gravitacional o similar.

B. Si la matriz histórica tiene muchos ceros se la puede "sembrar" con valores pequeños, por ejemplo 0.5. Los aforos harán crecer a algunos a viajes completos y reducirán los otros a cero.

C. Si la matriz es antigua puede valer la pena aplicar primero un coeficiente de crecimiento parejo antes de usar los aforos. De esta manera se preserva mejor la estructura de la matriz histórica.

7.5 CARACTERISTICAS DE LOS PROGRAMAS

Es deseable que la implementación de ME2 tenga al menos las siguientes características:

A. Debe indicar qué pares O-D no pasan por ningún conteo ya que estos no se actualizan. Buenos programas calculan una tasa de crecimiento promedio y la aplican a estas celdas.

B. Debe ser capaz de calcular y aplicar una tasa de crecimiento promedio para la matriz de referencia; idealmente el usuario debería tener la opción de aplicar o no esta tasa.

C. Debe ser capaz de utilizar asignación de multi-rutas, en particular para áreas urbanas; tres rutas por par O-D es un buen objetivo.

D. Debe indicar cuándo el programa no puede converger debido a inconsistencias en los aforos de tráfico.

E. Debe ser capaz de sembrar celdas vacías de la matriz de referencia si el usuario lo desea.

F. Idealmente debería incorporar una forma de tratar los errores en los aforos de tráfico, por ejemplo la descrita en la sección 5.

7.6 VALIDACION

Una estrategia de modelaje requiere de una validación de las matrices obtenidas por éste o cualquier otro método. Una manera práctica de lograr ésto es el reservar, por ejemplo, un 5% de los aforos disponibles para validar la matriz. Estos aforos de validación no se usan en la estimación original con ME2. Una vez que la matriz ha sido estimada se la carga a la red y se comparan los flujos con los aforos de validación correspondientes. Si hay mucha diferencia (digamos más del 15% en promedio) quiere decir que los aforos usados no son suficientes. Se deben recolectar más aforos y repetir el proceso. Vale la pena seleccionar nuevos aforos de validación e incorporar los antiguos al proceso de estimación con ME2. Notar que ésta es una validación bastante estricta, más que la habitual de usar una línea de pantalla.

Otra estrategia de validación, aún más interesante pero algo más cara, es el estimar dos matrices, una con 90% de los aforos y la otra con el 100% de ellos. Ambas matrices se utilizan para evaluar los beneficios y costos del proyecto que se quiere estudiar. Si el uso de una matriz resulta en la recomendación de llevar a cabo el proyecto y el uso de la otra no, entonces es claro que vale la pena recolectar más datos (aforos) para refinar la decisión. Si ambas matrices apoyan o rechazan el proyecto no es necesario investigar más. Una versión más sofisticada de esta estrategia es estimar varias matrices con subconjuntos de los aforos para simular las variaciones diarias/estacionales de la demanda y estudiar así la robusted de la decisión de invertir o no en un proyecto. Alternativamente se pueden usar aforos de diferentes días o meses con el mismo objeto.

7.7 SEGUIMIENTO.

En tareas de seguimiento se puede utilizar nuevos aforos cada año para actualizar las matrices de demanda. Si estas varían más de lo esperado en ciertas zonas, ésto es una indicación de que vale la pena destinar recursos a estudiar el por qué de esta variación. De esta forma se puede utilizar el modelo ME2 para apoyar las tareas de planificación continua.

También es posible utilizar ME2 para afinar la estimación de una matriz en un área para estudiar problemas de gestión de tráfico. Para ello se puede usar como matriz de referencia una de un área mayor y emplear los aforos para dividirla en un número mayor de zonas pequeñas en el área de estudio.

8. CONCLUSIONES

El modelo ME2 ofrece interesantes posibilidades en la simplificación de tareas de modelaje de demanda de transporte y en tareas de seguimiento. Su mayor limitación parece deberse al uso de modelos muy simplistas para estimar las rutas a usarse. Esto genera errores probablemente mayores a los originados por los aforos. En general modelos de asignación de multi-rutas y del tipo de equilibrio producen mejores resultados.

Las recomedaciones descritas en este documento deberían ayudar a una aplicación razonable de este modelo en un campo aún mayor.

9. REFERENCIAS

ALONSO, W. (1963) Predicting best with imperfect data. **Journal of the American Institute of Planners**, July, 248-255.

BELL, M.G.H. (1983) The estimation of an origin destination matrix from traffic counts. **Transportation., 17** (2), 198-217.

HALL, M., VAN VLIET, D. y WILLUMSEN, L.G. (1980) SATURN, a simulation assignment model for the evaluation of traffic management schemes. **Traffic Engineering & Control, 21** (4), 168-176.

HIGUEREY, P y L.G. WILLUMSEN (1984) Estimation of origin-destination matrices for rapid transit systems using low cost data. Universities Transport Studies Group Conference, Loughborough, Enero 1984.

LEONARD, D.R. y TOUGH, J.B. (1979) Validation work on CONTRAM - a model for use in the design of traffic management schemes. **Proceedings PTRC Summer Annual Meeting, Traffic and Environmental Management**, 135-153. London: PTRC Education and Research Services Lts.

MAHER, M. (1983) Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach. **Transportation Research, 17B**, 435-447.

ROBILLARD, P. (1975) Estimating and O-D matrix from observed link volumes. **Transportation Research, 9**, 123-128.

VAN ZUYLEN, H.J. y WILLUMSEN, L.G. (1980) The most likely trip matrix estimated from traffic counts. **Transportation Research, 14B**, 281-293.

WILLUMSEN, L.G. (1978) O-D matrices from network data: a comparisson of alternative methods for their estimation. **PTRC Summer Annual Meeting, Warwick University**, London: PTRC Education and Research Services Ltd.

WILLUMSEN, L.G. (1981a) Simplified transport models based on traffic counts. **Transportation, 10**, 257-278.

WILLUMSEN, L.G. (1981b) An entropy maximising model for estimating trip matrices from traffic counts. Transport Studies Group, University Collage London (unpublished).

WILLUMSEN, L.G. (1982) Estimation of trip matrices from volume counts: validation of a model under congested conditions. **PTRC Summer Annual Meeting, Warwick University, July 1982.** London: PTRC Education and Research Services Ltd.

SDM3FR
TOTAL STATION

with electronic angle sensor for auto-reduction

INFORMESE DE LOS MODERNOS SISTEMAS TOPOGRAFICOS SOKKISHA

Distribuidor exclusivo para España:

ISIDORO SANCHEZ, S.A.

— Ventas
— Reparaciones
— Alquiler
— Servicio técnico post-venta

Ronda de Atocha, 16
Tels. 228 38 34/467 61 28
28005 Madrid

SOKKISHA

WILLUMSEN, L.G. (1984a) Microcomputers and their software for transport planning in developing countries. **PTRC Summer Annual Meeting, July 1984.** London: PTRC Education and Research Services Ltd.

WILLUMSEN, L.G. (1984b) Estimating time-dependent trip matrices from traffic counts. En vollmuller y Hamerslag editores: **Proceedings Nith International Symposium on Transportation and Traffic Theory.** Utrech: VNU Press.

WILLUMSEN, L.G. (1985) Modelos simplificados de distribución basados en conteos de tráfico. En **La Planificación del Transport en América Latina.** Estudios e Informes de CEPAL (45), Naciones Unidas, Chile.

WILSON, A.G. (1970) **Entropy in Urban and Regional Modelling.** Pion Press, London.

Librería Ciencia-Industria, S. L.

Plaza de San Juan de la Cruz, 3
Teléfonos: 234 85 56 y 233 75 43
28003 Madrid

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐

THE BEAUTY OF FRACTALS. Images of Complex Dynamical Systems.

Peitgen, H.O.-20515- 7.420 Pts.
1986 ed. 196 Págs.

CONTENIDO: Frontiers of Chaos.— Magnetism and Complex Boundaries.— Invited Contributions.— Do it Yourself.— Documentation.— Index.

COMPUTER AIDED OPTIMAL DESIGN: STRUCTURAL AND MECHANICAL SYSTEMS.

Mota Soares, C.A.-1326- 23.638 Pts.
1987 ed. 1.029 Págs.

CONTENIDO: Variational Methods in Optimal Design.— Numerical Methods in Optimal Design.— Shape Optimal Design.— Multilevel and Inerdisciplinary Optimal Design.— Optimal Design of Mechanical Systems.— Knowledge Based Systems in Optimal Design.— Integrated CAD/FEM Optimization Techniques and Applications.— Panel Discussion.— Trends in Computer Aided Optimal Design.

CALCULO MATRICIAL DE ESTRUCTURAS. Colección de Matemática Aplicada e Informática. (PP).

Alarcón, E.-19340- 1.685 Pts.
1986 ed. 410 Págs.

CONTENIDO: Introducción.— Cálculo Estático de Estructuras en Barras.— Resolución del Problema Estático.— Cálculo Dinámico.— Resolución del Problema Dinámico.— Inestabilidad Global.— El Método de los Elementos Finitos.— Un Programa de Ordenador.— Apéndice.

CEMENT-TREATED PAVEMENTS. Materials, design and construction

Willians, R.-17820- 12.508 Pts.
1986 746 Págs.

CONTENIDO: The Formative Years. Highwany Materials in General. Background Information on Concrete Roards. Background information on Non-bound Granular materials. Etc..

CONSTRUCTION REGULATIONS HANDBOOK

Liebing, R.W.-738- 9.752 Pts.
1987 ed. 350 Págs.

CONTENIDO: Introduction.— Code History and Rationale.— Code Philosophy.— Code Formats, Contents, and Standards.—Legalities in the Code.— Types of Construction.— Fire Safety and Resistance.— Means of Egress.— Fire Suppression Principles.— Aspects of Fire Protection Beyond the Build ding Code.— Plan Review and Code Compliance.—Project History.— Code Administration.— Code Enforcement During Construction.— Case Law and the Codes.—Etc..

POWER SYSTEMS AND POWER PLANT CONTROL

Pingyang, W.-1078- 19.292 Pts.
1987 ed. 450 Págs.

CONTENIDO: Plenary Papers.— Optimal Power Flows.— Power Systems Stabilizers.— Power System Control Centres.— Control Centre Data Communications.— Automatic Generation Control.— Static Security Analisys.— Dynamics and Stability Analisys.— Operation Planning.— Emergency and Restorative Controls.— Power Plant Modelling and Control.— Etc.

POWER TRANSFORMER HANDBOOK

Hochart, B.-288- 9.116 Pts.
1987 ed. 290 Págs.

CONTENIDO: Recent advances.— Voltage regulation.— Capitalization of loses.— Parallel operation.— Cooling.— Overloadas.— Operating limits of transformers and autotransformers.— Protection.— Installation conditions.— Ventilation of enclosures.— Noise limitation.— Tests.— The location of partial discharges.— Maintenance.— Liquid dielectrics.— Over-currents.— Over-voltages.— MV/LV transformers.— Furnace transformers.— The transformer and energy saving.— Index.

PROTECTIVE RELAYING. Principles and Applications.

Blackburn, J.-19965- 17.808 Pts.
1987 ed. 545 Págs.

CONTENIDO: Preface.— Introduction and General Philosophies.— Fundamental Units: Per Unit and Percent Values.— Phasors and Polarity.— Symetrical Components: A Review.— Relay Input Sources.— Protection Fundamentals.— System Grounding Principles.— Generator Protection.— Transformer, Reactor, and Shunt Capacitator Protection.— Bus Protection.— Motor Protection.— Line Protection.— Pilot Protection.— Stability, Reclosing, and Load Shedding.— Index.

STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRIC AL ENGINEERS. 12th Ed.

FINK, Donald, G.-15839- 18.444 Pts.
1987 28 Secciones. 2.248 Págs.

CONTENIDO: Quantities, Units, Symbols, Constants, & Consersio Facotors. Electric & Magnetic Circ. Measurement & Instrum. Properties & Materials. Steam Generation. Prime Moders. Alternating-Current Generators. Direct Current Generators. Hydroelectric Power Generation. Powe-System Comp. Alternate Sources & Converters Power. Economic of Bulk Electric Power Supply. Project Economic. Transmission Systems. Direc-Current Power Transmission. Power System Interconnections. Substations Design. Power Distribution. Wiring Design. Etc.