

PANORAMA PROFISIONAL

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL MODELO DE CUATRO ETAPAS PARA LA DETERMINACIÓN DE TRÁFICO EN LA RED VIAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO

Carlos David Nassi

COPPE / UFRJ

Lucas Facello

Intendencia Municipal de Maldonado

Walter Sanchez

CSI – Consultoría y Servicios de Ingeniería SRL

RESUMEN

Este trabajo trata de una aplicación de la metodología de planificación de transportes, a partir del modelo de cuatro etapas utilizando el "software" de Sistema de Información Geográfica para Transportes, con el objetivo de estimar el flujo vehicular en un anillo vial perimetral del area metropolitana de Montevideo.

ABSTRACT

This work treats the transport planning methodology applied to the Montevideo metropolitan area. The four steps model has been utilised inside a Geographic Information "software" for Transport in order to forecast traffic flow for a by-pass highway planned for the region mentioned above.

1. INTRODUCCION: MONTEVIDEO Y LA REGION METROPOLITANA

El Litoral Sur del Uruguay incluye a los Departamentos de Colonia, San José, Canelones, Montevideo, Maldonado y Rocha. Juntos poseen el 70% de la población del Uruguay, a pesar que solo abarcan aproximadamente el 18% de la superficie del país.

La circulación es la más intensa y las redes ferroviaria y carretera son las más densas de la República. Todas las grandes rutas y vías férreas convergen hacia la capital y cruzan la región. Las de mayor tránsito lo hacen en la dirección E-W, (Rutas 1, Interbalnearia y 9), extendidas en una franja a 50 km al Norte de la costa.

La zona concentra el 37% de la red vial nacional, así como el 50% del total con pavimento superior (hormigón o concreto asfáltico). El parque automotor de estos Departamentos representa más del 70% del total de automóviles y camionetas y más del 60% de vehículos de autotransporte de carga de todo el país. Son éstos los de mayor crecimiento del parque en los últimos años.

Montevideo y su zona metropolitana, es el polo de desarrollo principal dentro de la región Litoral Sur, caracterizándose por una conformación radial, en la que las "periferias urbanas" situadas en el Departamento, así como las «periferias metropolitanas» situadas en Canelones y San José, se organizan en torno a los principales ejes radiales: Rutas 1, 5, 6-7, 8, Interbalnearia y Av. Giannattasio.

La escasa conectividad entre estos ejes metropolitanos, que constituyen además la penetración de las rutas nacionales, tiene como consecuencia atravesamientos inconvenientes del casco urbano, tanto para los flujos de carga como de pasajeros.

Las obras de los accesos Oeste y Norte (Rutas 1 y 5) permitieron configurar un primer tramo de colector perimetral, mientras que hacia el Este, las Rutas 102 y 101 conectan el eje costero (Interbalnearia y Av.

Giannattasio) con el eje de la Ruta 8 y Camino Maldonado. Estas conexiones han motivado localizaciones de actividad económica y están induciendo propuestas de crecimiento urbano en el espacio entre corredores.

En consecuencia el principal déficit de conectividad transversal que aún persiste es entre el sistema del Norte y Oeste (Rutas 1 y 5, puerto y centro urbano) y el sistema del Este y Noreste (Rutas Interbalnearia y 8, Aeropuerto). Esta carencia amenaza la eficiencia general del transporte metropolitano y justifica el completamiento de un anillo perimetral.

Por este motivo se estudia la posibilidad de construcción de un anillo vial perimetral (circunvalación) permitiendo que menores flujos atraviesen las áreas de mayor congestión. Las posibles alternativas conectarían la Ruta 1, o la Ruta 5 a la Ruta Interbalnearia (cerca del Aeropuerto Carrasco, o en una alternativa más externa próximo al peaje "Pando").

Para estudiar la viabilidad técnico-económica de dicho anillo, fue necesario estimar los flujos actuales y futuros de una nueva red vial (con anillo) y distintos valores de peaje.

2. ESTUDIOS DE TRÁFICO MEDIANTE EL USO DEL MODELO

2.1 Resumen Metodológico

A continuación se expondrá el desarrollo de un modelo de asignación de tráfico aplicado a la red vial del área metropolitana de Montevideo, con el objeto de determinar los tráficos que captaría la construcción de un anillo vial perimetral que completaría el actual colector de las rutas 1 y 5 en los accesos Oeste de la ciudad, conectándolo con la Ruta 8 y los accesos desde el Este.

Se utilizó un "software" de origen norteamericano, siendo las cuatro etapas las siguientes: generación (y atracción), distribución, elección de modo y asignación de viajes.

El modelo fue aplicado a los viajes internos del conurbano y a los viajes con origen/destino en él y destino/origen en el exterior del área en estudio y para los automóviles particulares nacionales.

Esto se debió a que para dichos tráficos se cuenta con datos recientes y confiables que permitieron diseñar la matriz básica de Origen y Destino (O/D), base imprescindible para la aplicación del modelo.

El "Estudio sobre utilización del Transporte Colectivo Urbano de Pasajeros en la ciudad de Montevideo" (Segunda Fase) contratado en 1996 por la Intendencia Municipal de Montevideo, trata los desplazamientos de la población dentro de los límites de la ciudad, y se realizó a través de una encuesta domiciliaria de Origen-Destino.

En nuestro trabajo fue necesario incorporar 4 zonas adicionales, de interés para el estudio en el área metropolitana (ver esquema adelante): Delta del Tigre (usuarios de la Ruta 1 - centroide n° 1), La Paz, Las Piedras y Progreso (usuarios de la Ruta 5 - centroide n° 65), J. Artigas, J. Suarez, Pando, Toledo Chico (usuarios de las Rutas 6, 7, 8 u 84 - centroides n° 12, 15 y 17), y Ciudad de la Costa (usuarios de la Ruta Interbalnearia o Avenida Giannattasio - centroide n° 67).

El mapa de Montevideo fue transformado en una RED, es decir en un conjunto de nodos y arcos, con atributos o características, que le permiten "captar" y/o permitir el pasaje de determinado flujo de vehículos.

El modelo fue aplicado a los viajes internos del conurbano y a los viajes con origen/destino en él y destino/origen en el exterior del área en estudio y para los automóviles particulares nacionales.

Esto se debió a que para dichos tráficos se cuenta con datos recientes y confiables que permitieron diseñar la matriz básica de Origen y Destino (O/D), base imprescindible para la aplicación del modelo.

El "Estudio sobre utilización del Transporte Colectivo Urbano de Pasajeros en la ciudad de Montevideo" (Segunda Fase) contratado en 1996 por la Intendencia Municipal de Montevideo, trata los desplazamientos de la población dentro de los límites de la ciudad, y se realizó a través de una encuesta domiciliaria de Origen-Destino.

En nuestro trabajo fue necesario incorporar 4 zonas adicionales, de interés para el estudio en el área metropolitana (ver esquema adelante): Delta del Tigre (usuarios de la Ruta 1 - centroide n° 1), La Paz, Las Piedras y Progreso (usuarios de la Ruta 5 - centroide n° 65), J. Artigas, J. Suarez, Pando, Toledo Chico (usuarios de las Rutas 6, 7, 8 u 84 - centroides n° 12, 15 y 17), y Ciudad de la Costa (usuarios de la Ruta Interbalnearia o Avenida Giannattasio - centroide n° 67).

El mapa de Montevideo fue transformado en una RED, es decir en un conjunto de nodos y arcos, con atributos o características, que le permiten "captar" y/o permitir el pasaje de determinado flujo de vehículos.

para los arcos 15, 16, 100, 101, 104, 105 y 106, 9) *TIEMPO* - tiempo de flujo libre, calculado en base a la velocidad media en caso de nivel de servicio A, según el "Manual de Capacidad de Carreteras 1995", SR 209, Washington, y 10) *CAP* - máximo flujo (vehículos por día, en un sentido) que el arco puede cargar en condiciones de flujo estable. También según el Manual antes citado, depende si se trata de una carretera de una sola calzada, dos o bien arterias urbanas o suburbanas. El valor se calcula en base a 1.000 a 2.000 vehículos/h por carril, según el tipo y características de vía y se le aplica un porcentaje reductor (0,7 aproximadamente) al considerar volúmenes de vehículos pesados presentes y otras características que disminuyen la capacidad (menores anchos, pendientes, etc.). Posteriormente se multiplica por 10 para obtener el valor diario pues se asume que el flujo máximo horario en 10 horas equivale al flujo diario.

Las características generales establecidas para la red, para el año 0 y sin anillo, son: 80 arcos, 49 nodos (de ellos 26 son centroides), y 30, 45, 60 o 70 km/h de velocidad media, en condiciones de flujo libre, dependiendo del tramo analizado, totalizando 312 km de red. En realidad el valor es mayor (quizás el doble) pues muchos arcos representan más de una calle.

Para cada una de las alternativas del anillo fueron agregados arcos que representan los diferentes tramos y cada uno de ellos respondía inicialmente a las siguientes características: 14,4 m de ancho total de calzada (2 vías de 7,20m cada una), 2 carriles por sentido, 70 km/h de velocidad deseada, y capacidad 30.600 vehículos por día (por sentido).

Luego de evaluar los primeros resultados obtenidos de la evaluación económico-financiera de la obra, nuestro grupo de trabajo observó que al asignar esta velocidad al anillo y tramos de la red de similares características (cuando se trata de una doble vía), en la situación sin peaje, el anillo se hacía tan atractivo que, fundamentalmente en el caso de la Alternativa 1 que es la que más capta tráfico interno del área metropolitana, la cantidad de km recorridos aumentaba demasiado en relación a la situación sin anillo, provocando un aumento de los costos de operación que se consideró excesivo.

Por este motivo y tal como se explica en detalle al desarrollar la etapa de asignación del modelo (4ª etapa) se decidió tomar una velocidad promedio en el anillo y tramos similares de la red existente de 60km/h para los vehículos livianos, a pesar que los 70km/h considerados inicialmente son técnicamente correctos.

Por su parte, al analizar las opciones de peaje (US\$ 0,50; US\$ 0,75 y US\$ 1,00) se tomaron tiempos calculados a partir de velocidades de 40, 34 y 30 km/h, respectivamente según se explica más adelante. Es decir se consideró el peaje como una "perdida de tiempo" para el usuario, de manera de bajar ficticiamente la atraktividad del anillo (aumentar su impedancia).

Es importante destacar que la redes utilizadas son una simplificación de la malla vial real, no existiendo una correspondencia exacta entre una vía de tránsito existente y un arco de la red modelada, pudiendo estos últimos, representar varias calles. Esta simplificación se realiza considerando el interés básico del uso del modelo, o sea, conocer los flujos que cada alternativa del anillo puede captar. A manera de ejemplo, la intrincada malla de los barrios Ciudad Vieja, Centro y Cordón fue notoriamente esquematizada. Por otro lado, la malla correspondiente a los accesos a Montevideo por el oeste, así como las rutas 6, 7, 8 e Interbalnearia, tienen un mayor grado de detalle.

3. 1ª ETAPA: GENERACIÓN (Y ATRACCIÓN) DE VIAJES

La primera parte de la metodología intentará encontrar un modelo de generación (y atracción) de viajes para las dos características geográficas de desplazamientos consideradas (Montevideo – Montevideo, Externo – Montevideo y viceversa). Para estos desplazamientos se buscó una función explicativa, como la siguiente:

$$O_i = f(P_r, I_r, A_r \text{ etc.}) \quad (1)$$

Donde:

O_i es la cantidad de viajes generados en la zona de tráfico i

P_i es Población con más de 5 años de edad en la zona de tráfico i

I_i es Ingreso promedio en la zona de tráfico i

A_i es Posesión de automóvil en la zona de tráfico i

Hemos afectado a 26 de nuestros nodos una característica distinta, es decir los consideramos "zonas" (o conjunto de barrios) en las cuales se generan o se atraen viajes. Para estos 26 nodos "especiales" hemos efectuado una correspondencia con las zonas de estratificación utilizadas en el estudio de Interconsult.

A pesar de tener 26 nodos (que representan zonas), la función de la cantidad de viajes generados fue obtenida a partir de la encuesta de origen-destino realizada en Montevideo por la I.M.M. en 1996, considerando 23 zonas. La función encontrada fue la siguiente:

$$O_i = 0,946 \times \text{Ln}(\text{Ingreso}) - 4,46, \text{ con } R^2 = 0,688 \quad (2)$$

Montevideo, según el I.N.E., cuenta con 432.576 hogares, con 1.338.600 personas (3,1 personas por hogar). En la encuesta de origen-destino tenemos 3.068 hogares efectivamente validados, con un total de 9.676 personas mayores de 5 años, contabilizando un total de 12.964 viajes, con datos de población, ingreso, tenencia de automóvil y cantidad de empleos por zona.

Para estar seguros que la muestra utilizada es representativa, se verificaran datos del censo demográfico realizado en el año 1996 que tiene dichos datos por departamento, sección y segmento censal. Los datos de los censos nos han permitido verificar las tendencias de estas variables.

La encuesta Origen-Destino ha permitido encontrar la función matemática antes mencionada.

Las aglomeraciones urbanas integrantes del "área metropolitana" (situadas a ambos lados de los ejes radiales de acceso a Montevideo) han sido asimiladas a través de las características de población y motorización, con barrios o zonas de Montevideo, a los efectos de estimar las tasas de generación de viajes.

A partir de las características generales de cada localidad se estimó una tasa de generación de viajes.

La obtención de dicha función ha servido para estimar los viajes generados en las 6 nuevas zonas (y centroides) introducidas en nuestro trabajo. Por lo tanto hemos supuesto que dichas nuevas zonas se asemejan a otras del Departamento de Montevideo con respecto a sus características socio-económicas (cantidad de viajes generados por habitante mayor de 5 años, motorización). Para ello hemos utilizado los datos de zonas con códigos de la primera columna de la tabla precedente, para las nuevas zonas de acuerdo a lo siguiente.

4. 2ª ETAPA: DISTRIBUCIÓN

A partir de las cantidades de viajes generados y atraídos en cada zona estimamos los orígenes y destinos de las mismas.

Se confeccionó una tabla (matriz O/D) con elementos llamados V_{ij} que representan la **cantidad de viajes entre la zona i de origen y la zona j de destino.**

Para obtener la matriz hemos utilizado los tiempos de viaje entre cada par de origen - destino, t_{ij} .

A partir de los viajes totales generados y atraídos, de la matriz de impedancias (tiempos de viaje) y de funciones asociadas a ella (exponenciales, potenciales o gravitacionales, etc.), se han hecho estimaciones de los viajes entre cada zona de origen-destino (V_{ij}), luego de algunas iteraciones.

La matriz O/D contiene los volúmenes diarios de vehículos (automóviles particulares nacionales en este caso) que viajan entre cada par de centroides.

En el modelo se consideraron 26 zonas O/D que responden a 20 en Montevideo y 6 en localidades externas, formando el "área" metropolitana.

Por su proximidad, cada una de estas áreas externas, así como los barrios más externos de Montevideo son los que presentan sumo interés en el análisis de cada una de las alternativas. En especial las identificadas con los números 67 (Ciudad de la Costa), 17 (Pando), 21 (Punta Rieles, Villa García), 40 (Manga, Toledo Chico) y 65 (La Paz, Las Piedras).

Luego de realizada la etapa de generación de viajes por zona (dependiendo de las características socioeconómicas), se distribuyen los mismos de acuerdo a las condiciones de atractividad entre zonas (función de población, número de empleos y distancia entre pares O/D).

Conocidos los porcentajes de usuarios que viajan en automóvil (sea privado o taxímetro) se obtiene una primera matriz cuyos elementos son las personas que se mueven diariamente entre dos zonas.

La matriz anterior se divide por 1,5 (personas por vehículo en promedio) para obtener la cantidad de autos propiamente dichos. Esta es la matriz O/D a ser usada en la asignación, para el año 1996.

A los efectos de este estudio hemos considerado el año 2005 como año 0, por lo tanto considerando una tasa de crecimiento de aproximadamente el 4% anual en el período 1996 – 2005. Se obtiene la definitiva matriz O/D para el año 0, la que expresa los viajes diarios en automóvil particular que se efectúan entre cada zona.

El flujo diario total es de 434.580 autos, destacándose plenamente las zonas 53 (Centro), 51 (Tres Cruces) y 56 (Pocitos) con casi la tercera parte de los viajes.

Si bien tenemos 676 (26×26) elementos de la matriz, solamente 399 son diferentes de cero, es decir que efectivamente existen viajes en auto entre esas zonas O/D.

Debemos recordar aquí que cuando se agrupan barrios o localidades a un centroide, los viajes "internos" (aproximadamente de 10 a 20%, según la zona) no son simulados, ya que no usarían ningún arco de la red. Estos corresponden a los elementos de la diagonal de la matriz.

5. 3ª ETAPA: DIVISIÓN MODAL Y 4ª ETAPA: ASIGNACIÓN

Desde el punto de vista teórico esta etapa utiliza los datos conocidos de los viajes totales entre cada para origen-destino (V_{ij}), siendo necesario repartirlos entre ómnibus y automóviles.

En nuestro trabajo se ha omitido esta etapa por que en las etapas anteriores (generación y distribución) hemos tomado en cuenta únicamente los viajes realizados en automóviles, dado que para esta modalidad existe información reciente que permitió construir una matriz O-D. Para las otras modalidades de transporte se efectuaron análisis específicos pero sin la aplicación del "software" de previsión de demanda.

Los resultados de la etapa anterior (distribución únicamente para automóviles) han sido comparados con la misma matriz (expresada en porcentaje) presentada en el informe del estudio de Interconsult y los resultados son consistentes.

La asignación de tránsito se define como el proceso para determinar las rutas de viaje y "cargar" a esas rutas los flujos diarios de vehículos

entre cada par de zonas, de acuerdo a determinados criterios como por ejemplo el menor tiempo de viaje.

Los modelos de asignación precisan además de una red, un conjunto de nodos y arcos interligados y una matriz O/D (volúmenes diarios de vehículos), de un método o algoritmo matemático de asignación.

En nuestro análisis hemos usado la llamada "asignación de equilibrio de usuario", por la cual a través de un proceso iterativo se van "cargando" los volúmenes a los diferentes arcos de la red, de manera que los usuarios elijan el camino de "costo" o "impedancia" mínimo.

La ventaja fundamental del uso de este método está en que el mismo no ignora la interdependencia entre los tiempos de viaje y los volúmenes en un arco, relación que se evidencia, ya sea por estados de "congestión" o por la existencia de múltiples caminos de unión para un par específico O/D.

El concepto de menor tiempo de viaje fue utilizado en nuestra primera hipótesis, para efectuar las corridas del modelo sin anillo y con anillo en sus cinco alternativas, ya sea sin peaje o con los tres valores de peaje considerados. Este criterio es el que ha sido utilizado finalmente como criterio de asignación aunque, como se explica más adelante, también se han efectuado corridas del modelo minimizando el costo generalizado de cada viaje.

El método consiste en ir cargando la red, calculando los tiempos de viaje de cada arco (función del volumen asignado y la capacidad disponible) y reestimando los nuevos tiempos mínimos para los volúmenes entre cada par O/D, antes de una nueva asignación.

La función que la práctica aconseja utilizar en los cálculos de tiempo es de la forma (Junta de Caminos Públicos de los Estados Unidos):

$$t = t_f [1 + \alpha (v/c)^\beta] \quad (3)$$

en donde,

t , tiempo de viaje en presencia de tráfico

t_f , tiempo de viaje en flujo libre

v , volumen en el arco

c , capacidad del arco

α , parámetro. Usual: 0,15

β , parámetro. Usual: 4,0.

El proceso iterativo permite alcanzar una solución convergente en la cual ningún viajero puede mejorar su tiempo de viaje cambiando la ruta.

El programa utilizado necesita como parámetros de entrada tanto la cantidad de iteraciones máxima antes de alcanzar el equilibrio, así como el valor de convergencia. Hemos utilizado en este caso el máximo de 100 iteraciones y un valor de convergencia de 100 vehículos por día.

Este último es comparado, luego de cada iteración, con la máxima diferencia absoluta entre flujos de cada uno de los arcos de la red. Cuando es menor, para todo arco, el proceso iterativo se detiene.

Los viajes en automóvil fueron asignados a la red vial principal a través de este modelo de previsión que toma en cuenta los atributos de esa red.

Los principales atributos que se han utilizado para caracterizar cada tramo de la red son: sentido de circulación, signo de la pendiente longitudinal, número de calzadas y de carriles (para circulación y/o estacionamiento), ancho de cada carril y de uso público (en metros), ubicación de semáforos. Ciclos y tiempos de fase (en segundos), tipo y estado de conservación de pavimento (asfalto, tratamiento bituminoso, hormigón, tosca), velocidad promedio (en km/h), otras, como existencia de vereda y de paradas de ómnibus separadas (dársenas) o anulando un carril.

A partir de estos atributos se asignaron, mediante el modelo, los flujos de automóviles en la red vial del área en estudio.

Para esto tomamos en cuenta las restricciones de capacidad de las vías analizadas, como también el concepto de equilibrio en la red propuesto por Wardrop.

Los atributos también permiten estimar los costos generalizados de viaje para cada tramo. A partir de estos costos se puede asignar todo el flujo en la ruta de menor valor, siempre que dicho volumen no sobrepase su capacidad. Esto constituyó la segunda hipótesis utilizada para correr el modelo.

Corresponde aquí aclarar porqué se efectuaron corridas del modelo cambiando de criterio de selección de viajes.

En efecto, cuando se evaluaron los resultados obtenidos luego de calibrar y ajustar todos los aspectos inherentes al modelo de asignación de tráfico, se observó que, fundamentalmente para la Alternativa 1 y para la 2 aunque en menor proporción, al plantear la situación con anillo sin cobro de peaje, el tiempo total insumido por los viajes obviamente era menor pero la cantidad total de km recorridos aumentaba notoriamente respecto a la situación sin anillo.

Los resultados que se obtuvieron en esa instancia, para el año 2002 que inicialmente se tomó como año cero, se pueden observar en la tabla siguiente.

Tabla 1
Kilometros y tiempos recorridos por los automóviles

Situación	km totales recorridos / día	Tiempo total recorrido / día
Sin anillo	3.834.768	99.954
Alternativa 1, sin peaje	3.935.755	96.500
Alternativa 2, sin peaje	3.881.911	97.476

Como puede verse por ejemplo para la Alternativa 1, diariamente se ahorran 3.454 horas de viaje pero recorriendo 100.987 km más que en la situación sin anillo. Esto hacía que los costos de operación vehicular debidos a los mayores recorridos que originaba el anillo superaban ampliamente a los beneficios debidos a los ahorros de tiempo, lo que no resultaba razonable.

Utilizando la matriz O/D pudo comprobarse que, en promedio, la distancia de los viajes que tomarían el anillo en su Alternativa 1 podría aumentar hasta en un 70 %, es decir que un usuario que antes recorría 10 km por la red interna, estaría dispuesto a recorrer hasta 17 km incluyendo tramos del anillo en su itinerario, para ahorrar tiempo, a veces solo de minutos. Esto no resulta justificable.

Por ese motivo se efectuaron corridas del modelo asignando recorridos por menor costo generalizado en lugar de por menor tiempo y fueron analizados los resultados.

El costo generalizado CG de cada tramo se calculó de la siguiente manera:

$$CG_i = L_i \times C_i + T_i / 60 \times VT / OP \quad (4)$$

en dónde:

L_i = longitud del tramo (km)

C_i = costo de operación vehicular en el tramo i (US\$/veh-km). Se han utilizado dos valores distintos, diferenciando el C_{i1} de los tramos que pertenecen al anillo del C_{i2} de los tramos de la red actual. Evidentemente C_{i1} resulta menor que C_{i2} .

T_i = tiempo de recorrido (minutos)

VT = valor del tiempo (US\$/hora). Como se explica mas adelante, en nuestro caso hemos utilizado el valor de US\$ 1,50 por hora y por persona.

OP = ocupación promedio de los automóviles particulares (personas/vehículo). En nuestro caso hemos tomado 1,5 personas por vehículo.

La conclusión fue que debía continuarse aplicando el criterio de tiempo mínimo, que es el internacionalmente aceptado en ámbito urbano, pero aplicando algunas correcciones en las velocidades consideradas para "eliminar" los viajes internos que provocaban los mayores aumentos del costo de operación, sin ahorrar sustancialmente los tiempos de viaje.

Por lo tanto se hicieron algunas pruebas y tal como se indicó al explicar las características de la red modelada, finalmente se adoptó 60 km/h como velocidad media para los tramos del anillo en doble vía y para otros 5 tramos de la red existente con características similares. Esta modificación originó una nueva distribución del tráfico (nueva asignación).

Para asegurarse que las estimaciones fueron correctas se han comparado los resultados de la asignación con los conteos realizados en los principales ejes de Montevideo en los últimos años. En caso de encontrar diferencias, se realizaron cambios en el sistema de asignación o en los propios parámetros para adecuarse más a los flujos reales.

Así han sido estimados los flujos en cada arco para todas las posibles combinaciones que contemplan los siguientes aspectos: existencia del anillo (no, sí), en caso afirmativo (alternativa de anillo 1, 2, 3, 4 o 5), existencia de peaje en el anillo (no, sí), en el caso afirmativo (peaje para vehículos livianos de US\$ 0,50; US\$ 0,75 o US\$ 1,00 por ingreso en el anillo).

Las combinaciones sin peaje no constituyen un problema para la estimación del modelo de asignación de tránsito. Pero, como ya lo adelantamos al explicar las características de la red modelada, cuando empezamos las estimaciones con peaje, hemos supuesto que el valor del mismo es "tiempo perdido" para recorrer el anillo.

Se ajustó así la estimación del valor del tiempo de los probables usuarios del anillo, cambiando el criterio de utilizar el ingreso promedio (hipótesis inicial bastante conservadora) por otro que toma en cuenta

únicamente los habitantes que poseen vehículo. De ese modo calculamos cuál es el valor del tiempo para ellos.

El ingreso medio por persona es de \$ 6.083 para los que poseen automóvil y de \$ 3.018 para los otros (promedio de \$ 3.985 / persona).

El nuevo cálculo del valor del tiempo es similar, pero a partir de un valor de ingreso mensual de \$ 6.083 / conductor y \$ 5.316 / acompañante. Con este valor del tiempo se obtiene la siguiente tabla de conversión tiempo – dinero.

Tabla 2
Equivalencia tiempo / dinero

Tiempo (minutos)	US\$
10	0,34
20	0,68
30	1,02
40	1,36
50	1,70
60	2,04

Por lo tanto para los valores de peaje que hemos considerado en el estudio se obtiene los valores observados en la tabla siguiente.

Tabla 3
Conversión del valor de peaje a tiempo “perdido”

Valor del peaje (US\$)	Tiempo “perdido” (minutos)
0,50	14
0,75	21
1,00	28

Entonces, si suponemos que un usuario del anillo en su Alternativa 1 paga, por ejemplo, US\$ 0,50 por entrada, es como si perdiera 14 minutos (valor de US\$ 0,50 en tiempo). Perdiendo 14 minutos en el recorrido de 28 km de extensión (Alt. 1), su nueva velocidad sería de $(28 \text{ km} / (28 \text{ min} + 14 \text{ min})) \times 60 \text{ min/h} = 40 \text{ km/h}$. Esta es la “velocidad” ficticia que se utilizó en el anillo en el modelo de simulación de asignación de tránsito, cuando el valor de peaje considerado es de US\$ 0,50 para vehículos livianos.

A continuación se plantea la tabla de conversión de cada valor de peaje simulado con la “velocidad” ficticia en el anillo.

Tabla 4
Equivalencia “velocidad” ficticia / valor del peaje

Valor del peaje (US\$ / entrada)	“Velocidad” ficticia (km/h)
0,50	40
0,75	34
1,00	30

Hemos considerado únicamente los valores de peaje US\$ 0,50, US\$ 0,75 y US\$ 1,00 por entrada en el anillo. Estos valores corresponden aproximadamente a US\$ 0,014/km, US\$ 0,021/km y US\$ 0,029/km respectivamente (por sentido) para las Alternativas 1 y 2 que son las más cortas. Estos valores son inferiores al valor hoy cobrado en la Ruta Interbalnearia (US\$ 0,033/km por sentido). Decidimos tener en cuenta valores inferiores al cobrado en rutas nacionales por el hecho de que muchos de los desplazamientos que utilizarían el anillo serían cotidianos, con caminos alternativos (a pesar de ser de menor calidad) y por lo tanto los usuarios no estarían dispuestos a pagar cifras mayores.

6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ASIGNACIÓN

Presentamos a continuación los resultados finales aplicando el criterio de tiempo mínimo de recorrido, con los ajustes detallados precedentemente.

Los flujos son estrictamente los que resultan del modelo pero para el cálculo de recorridos y tiempos en estas tablas se utilizan las longitudes de tramos reales, que no coinciden exactamente con las modeladas (la red es una aproximación y simplificación de la realidad).

Posteriormente en las tablas se consideran dos coeficientes: un reductor de flujos y un coeficiente de flujo inducido.

El reductor de flujos se aplica por el hecho de existir rutas alternativas no consideradas en la red modelada, la que es una simplificación de la

realidad. El coeficiente difiere en cada tramo según la cercanía y calidad de las rutas alternativas. Cuando no existen rutas alternativas es igual a la unidad.

El coeficiente de tráfico inducido se ha tomado igual al 15% tal como se explicó al comienzo de este Capítulo.

Aplicando estos dos coeficientes se obtienen los “flujos” por cada tramo del anillo, que se consideran más ajustados que los resultantes del modelo, pues tienen en cuenta los dos conceptos precedentes. Tomando como base estos “flujos” se han calculado las entradas de vehículos al anillo según cada valor de peaje considerado. Los datos de entradas al anillo son especialmente importantes para la evaluación financiera de las opciones con cobro de peaje.

Para la alternativa 1 y una variante de ella se presentan los resultados del modelo y las entradas de vehículos al anillo, las que surgen de los datos de “flujos” calculados en las planillas antes descriptas. Estos valores son los que luego se vuelcan al estudio comparativo de alternativas.

Tabla 5

Planilla final de asignación de tráfico (solo tramos del anillo – sin peaje)

ID	Length (km)	Tiempo (min)	W->E flow	E->W flow	Total flow	W->E time	E->W time	Max. time	A->B v/c	B-A v/c
21	6,09	6,1	6.918	5.355	12.273	6,10	6,10	6,10	0,23	0,18
23	1,50	1,5	6.918	5.355	12.273	1,50	1,50	1,50	0,23	0,18
50	6,78	6,8	1.258	1.723	2.981	6,80	6,80	6,80	0,04	0,06
52	7,87	7,9	8.165	8.514	16.679	7,91	7,91	7,91	0,27	0,28
108	4,83	4,8	504	504	1.008	4,80	4,80	4,80	0,02	0,02

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTERCONSULT [1996] Estudio sobre utilización del Transporte Colectivo Urbano de Pasajeros en la ciudad de Montevideo (Segunda Fase), Montevideo, Uruguay.

CALIPER Corporation [1996] TransCAD (Transportation Workstation Software). Reference Manual, Version 3.1.