

INFLUENCIA DE LA CONGESTION EN LA TARIFICACION DEL TRANSPORTE PUBLICO

Francisco J. Martínez
Secretaría Ejecutiva, Comisión de Transporte Urbano
Ahumada 48, Of. 527, Santiago

RESUMEN

Bajo los supuestos de economía neoclásica, el máximo bienestar social se obtiene cuando la tarifa percibida por el consumidor coincide con el costo marginal social de producir el bien. Sin embargo, la presencia de externalidades en el proceso productivo es causa de que el óptimo teórico no sea alcanzado bajo la realidad del mercado; es el caso de congestión en transporte. En estas condiciones un viaje adicional entre un par Origen-Destino (O-D), provocará un aumento en el tiempo medio de viaje en todas las rutas utilizadas por los usuarios entre O y D, según se desprende de los supuestos de equilibrio de Wardrop; este tiempo marginal social de viaje provoca diferencias importantes con el tiempo medio percibido por el usuario.

Cuando esto ocurre, la tarificación a costo marginal deja de ser la regla óptima en modos alternativos. Se busca entonces alcanzar un "Segundo Óptimo". La metodología de tarificación de Segundo Óptimo utiliza, por lo general, las diferencias entre costos marginales y costos medios ($C_{Mg} - C_{Me}$). En transporte será necesario estimar la diferencia entre el tiempo marginal introducido por un usuario adicional de la red y el tiempo medio percibido por éste.

Como parte de una metodología para el cálculo de tarifas óptimas en modos alternativos al automóvil particular, se estimaron relaciones flujo-velocidad utilizando varias formas funcionales, en diversos puntos de la red que sirve el corredor Las Condes - Centro de Santiago. Además se desarrollaron fórmulas de agregación de relaciones flujo-velocidad para analizar el efecto en la red producido por el aumento del flujo en un arco o par origen destino. Finalmente se obtuvo una estimación de la diferencia entre tiempo marginal y tiempo medio para el corredor.

1. Introducción

La regla de tarifa igual a costo marginal asociada a un equilibrio competitivo constituye un óptimo en sentido Paretiano; el supuesto involucrado exige que las preferencias individuales sean monótonas y la función de tecnología convexa. Sin embargo, la presencia de externalidades, bienes públicos, economías de escala, etc., pueden hacer que la aplicación de esta regla no sea resultado de equilibrio en algunos mercados.

Tal es el caso de transporte, donde el fenómeno de congestión constituye un tipo de externalidad inherente a esta actividad. Por otra parte, la estrecha relación en demanda y producción de los diferentes modos de transporte presentes en el mercado, hace necesaria una metodología de tarificación que incorpore los efectos de los mercados cercanos. Este enfoque conduce a metodologías de tarificación de "Segundo Óptimo", las cuales, por lo general, requieren estudiar las diferencias entre tarifas y costos marginales de todos los modos.

En el caso del automóvil particular, la presencia de la congestión produce costos marginales sociales de operación inferiores al costo percibido por el usuario (costo medio), debido a que el automovilista no paga el incremento del tiempo de viaje que experimenta el resto de los vehículos que comparten la vía.

En este trabajo se presentan los estudios realizados tendientes a estimar la diferencia entre el tiempo medio de viaje y el tiempo marginal en el corredor Los Condes - Centro, de la ciudad de Santiago, para los viajes realizados en sentido Oriente-Poniente en la hora punta de la mañana. La figura 1 muestra en forma gráfica la diferencia entre tiempos medios y marginales.

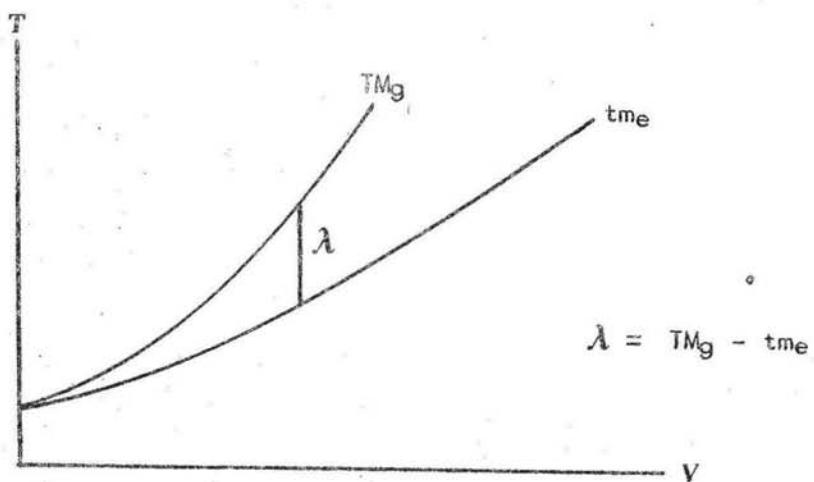


Figura 1. Diferencia entre tiempo marginal (TM_g) y tiempo medio (tme) de viaje. Fenómeno de congestión.

La sección siguiente contiene el desarrollo de fórmulas de agregación de curvas de congestión, que permite conocer el efecto de este fenómeno en la red. En la tercera sección se mostrará la metodología utilizada para medir tiempos de viaje, las formas funcionales, las variables explicativas empleadas en la estimación de curvas flujo-velocidad y los resultados obtenidos. Finalmente, en la cuarta sección se entregan estimaciones de la diferencia TMg-tme para ocho zonas de origen en el corredor y con destino Centro; además las principales conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en esta materia.

2. Congestión en redes

Los viajes entre un par O-D pueden ser realizados por varias rutas, las que presentan curvas de congestión diferentes. En efecto, la curva de congestión de una determinada ruta se construye a partir de las curvas de congestión de cada tramo involucrado, utilizando una "agregación en serie". Por otra parte, el automovilista puede elegir entre rutas alternativas, cuyo tiempo de viaje en condiciones de equilibrio debe ser idéntico, según el Primer Principio de Wardrop (4); este principio permite agregar curvas de congestión en forma paralela y obtener la curva representativa de la congestión en el par O-D.

Consideremos la red simplificada de la figura 2. y las relaciones explícitas de flujo - tiempo medio de viaje para cada tramo. El criterio general para definir tramos en la red, es que los arcos reales involucrados presenten características de circulación similares y, por lo tanto, constituyen un segmento vial donde la congestión es homogénea; este criterio resulta aplicable con particular evidencia en ejes de circulación que sirven el corredor Las Condes - Centro y, más aún, en horas punta de flujo vehicular. En general, un automovilista que realiza un viaje entre un par O-D, elige una ruta r de un conjunto de rutas alternativas. El tiempo medio de viaje en esa ruta será igual a la suma de los tiempos medios de cada arco de la ruta, es decir:

$$tme^r = \sum_{Vi \in r} tme_i(V_i) \quad (1)$$

donde $tme_i(V_i)$ es la curva de congestión del tramo i de la ruta y V_i es el nivel de flujo vehicular del tramo.

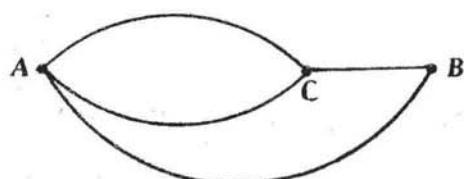


Figura 2. Red simplificada

El tiempo de viaje extra en que incurren todos los automovilistas que utilizan esa ruta, causado por la incorporación de un nuevo vehículo se denomina tiempo marginal y queda expresado por

$$TMg = \frac{\delta T}{\delta V} \quad (2)$$

donde T es el tiempo total de viaje por la ruta, es decir

$$T = \sum_{Vi \in r} tme_i (Vi) \times Vi \quad (3)$$

entonces se tiene que el tiempo marginal de la ruta r es:

$$TMg^r = \frac{\delta}{\delta V} \left[\sum_{Vi \in r} tme_i (Vi) \times Vi \right] \quad (4)$$

Desarrollando la expresión 4 se obtiene

$$TMg^r = \sum_{Vi \in r} TMg_i \frac{\delta Vi}{\delta V} \quad (4)$$

donde $\frac{\delta Vi}{\delta V}$ representa la variación del flujo en el tramo i (Vi) cuando varía el flujo de automovilistas (V) que viajan entre 0 y D por la ruta r , por lo tanto $\delta Vi / \delta V = 1$.

Luego, la fórmula de "agregación en serie" de los tiempos marginales de viaje es

$$TMg^r = \sum_{Vi \in r} TMg_i \quad (5)$$

y la diferencia entre tiempos medios y marginales para la ruta se obtiene fácilmente de la ecuación 5, esto es:

$$(tme - TMg)^r = \sum_{Vi \in r} (tme - TMg)_i \quad (6)$$

La expresión 6 permite obtener la diferencia entre tiempos medios y marginales para cada una de las rutas alternativas de un par 0-D

Para obtener una función de congestión representativa de la red, considerando todas las rutas que sirven un determinado par 0-D, es necesario agregar las curvas de congestión de rutas alternativas o paralelas. En la red de la figura 2, las rutas alternativas para viajar de A a B son: 1 - 2 - 4, 3 - 4 y 5; con la fórmula de agregación en serie es posible obtener fácilmente las funciones flujo - velocidad en tales rutas.

La figura 3 presenta un conjunto posible de curvas de congestión de las tres rutas de nuestro ejemplo. Si aceptamos el Primer Principio de Wardrop según el cual los tiempos medios de viaje serán iguales para todas las rutas paralelas que sean utilizadas, entonces para cada tiempo medio de viaje (tme^*), el volumen (V^*) que circula por la red corresponde a la suma

de los volúmenes en todas las rutas ($V_1 + V_2 + V_3$), resultado de las correspondientes curvas de congestión para el tiempo medio de viaje. Así se construye la curva de congestión de todas las rutas alternativas del par 0-D (tme 0-D).

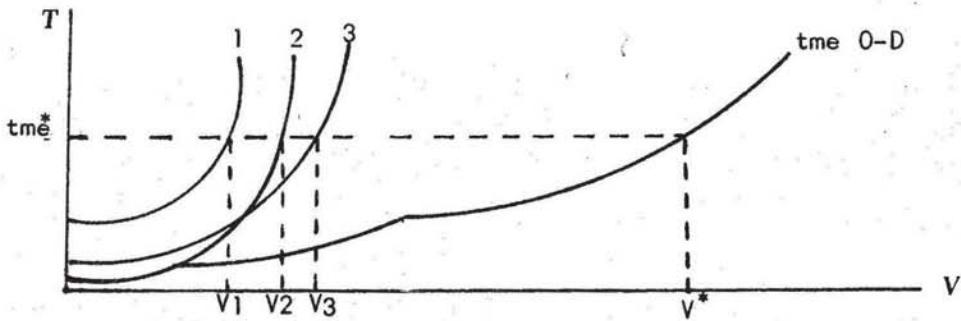


Figura 3. Construcción gráfica de la curva de congestión agregada para la red que sirve un par 0-D

Supongamos que $f_i(V_i)$ es la función de congestión de la ruta i , esto es

$$tme_i = f_i(V_i), \quad (7)$$

cuya función inversa es

$$V_i = f_i^{-1}(tme_i), \quad (8)$$

que establece el volumen en la ruta correspondiente al tiempo medio de equilibrio en la red.

Bajo ciertas condiciones, se cumple que

$$\frac{dy}{dx} = \left(\frac{dx}{dy} \right)^{-1} \quad (9)$$

Luego, aplicando esta ecuación en 7 se obtiene

$$\frac{\delta f_i}{\delta V_i}(V_i) = \left[\frac{\delta f_i^{-1}}{\delta tme}(tme) \right]^{-1} \quad (10)$$

Por otra parte, el tiempo marginal de viaje en la ruta i es

$$TMg_i = \frac{\delta T}{\delta V_i} = \frac{\delta(tme_i \times V_i)}{\delta V_i} \quad (11)$$

Derivando la ecuación anterior se obtiene

$$TMg_i = tme_i + V_i \frac{\delta f(V_i)}{\delta V_i} \quad ; \quad (12)$$

reemplazando la ecuación 10 en 12, se tiene la expresión de la diferencia entre tiempo medio y marginal para cada ruta, esto es

$$[TMg - tme]_i = v_i \left[\frac{\delta f^{-1} (tme)}{\delta tme} \right]^{-1} \quad (13)$$

Para desarrollar la fórmula que permite agregar rutas en paralelo, supongamos a priori que $F(V)$ es la función de congestión agregada de la red, presentada en la figura 3 por la curva tme_{0-D} , y $f_i(v_i)$ las funciones de congestión de las n rutas alternativas, luego por construcción

$$F^{-1} (tme) = \sum_{i=1}^n f_i^{-1} (tme) \quad (14)$$

es decir, el volumen vehicular en la red es la suma de los volúmenes en cada ruta, correspondientes a cada curva de congestión para un tme de viaje único. Por analogía con la deducción de la ecuación 13, se puede escribir que

$$(TMg - tme)_{0-D} = v \left[\frac{\delta F^{-1} (tme)}{\delta tme} \right]^{-1} \quad (15)$$

donde V es el flujo vehicular en el par 0-D. Derivando la ecuación 14 se tiene que

$$\frac{\delta F^{-1} (tme)}{\delta tme} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta f_i^{-1} (tme)}{\delta tme} ; \quad (16)$$

además, $\frac{\delta f_i^{-1} (tme)}{\delta tme}$ se obtiene de la ecuación 13 sumando para todas las rutas. Reemplazando el resultado en la ecuación 15 resulta una expresión que permite estimar la diferencia entre el tiempo medio y marginal que experimentan los usuarios de la red vial que realizan viajes entre un par 0-D, esto es:

$$(TMg - tme)_{0-D} = v \left[\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{(TMg - tme)_i} \right] . \quad (17)$$

La ecuación 6 permite la agregación en serie de curvas de congestión para los tramos que constituyen cada ruta, y la agregación de rutas en paralelo queda establecida por la ecuación 17. Ambas ecuaciones conducen a solucionar el problema de establecer la diferencia entre los tiempos medios y marginales de los vehículos de superficie para cualquier configuración de la red.

Ahora bien, el algoritmo general para el análisis de redes, consiste en calcular $TMg - tme$ para todas las rutas posibles entre un par 0-D y luego agregar las rutas en forma paralela; esta regla permite solucionar redes complicadas. En aquellos casos que la red lo permite (debido a su forma), se puede simplificar el cálculo; para ello conviene tener presente la equivalencia en las siguientes formas de agregación, para la red de la figura 4 con viajes entre A y B:

i. $((1) // (2)) + ((3) // (4))$
ii. $((1) + (3)) // ((1) + (4)) // ((2) + (3)) // ((2) + (4))$

donde "+" y "://" denotan agregación en serie y paralela respectivamente, de tramos de la red.

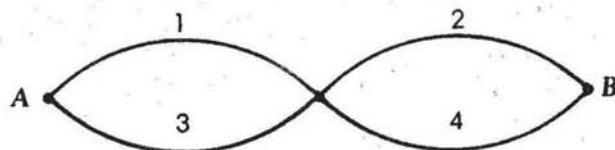


Figura 4. Ejemplo de red vial

3. Funciones de congestión

El corredor Las Condes - Centro será representado por una red vial que incluye todas las vías principales al Norte del Eje Bilbao, en particular considera las vías más importantes utilizadas por los automovilistas que viajan en sentido Oriente-Poniente. En especial, esta red incluye las vías que presentan algún grado de congestión en la hora punta de la mañana. La figura 5 presenta un esquema de la red.

Con el propósito de analizar el problema de congestión y la contribución en modelos de tarificación en diferentes pares O-D, se define una zonificación del corredor. Los criterios de zonificación son consecuentes con el estudio de tarificación en el cual se inserta este trabajo*. Se definen ocho zonas utilizando los ejes Av. Presidente Kennedy - Los Conquistadores y Av. Colón - Eleodoro Yáñez - Providencia en sentido Oriente-Poniente y las calles Circunvalación Américo Vespucio y Pedro de Valdivia en sentido Norte-Sur. Los límites zonales se muestran con línea punteada en la figura 5 y la figura 6 muestra un esquema de las zonas.

3.1. Metodología de medición de velocidades

Es necesario establecer un plan de mediciones de velocidad que conduzca a obtener estimaciones de relaciones flujo-velocidad, en todos aquellos tramos de la red que pertenezcan a alguna de las rutas posibles del par O-D.

La amplitud de esta tarea y el ámbito en que se inserta este estudio lleva a proponer una metodología simplificada. En este caso, se obtendrán

* Estudio de Tarificación de Locomoción Colectiva desarrollado por el Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. En prensa.

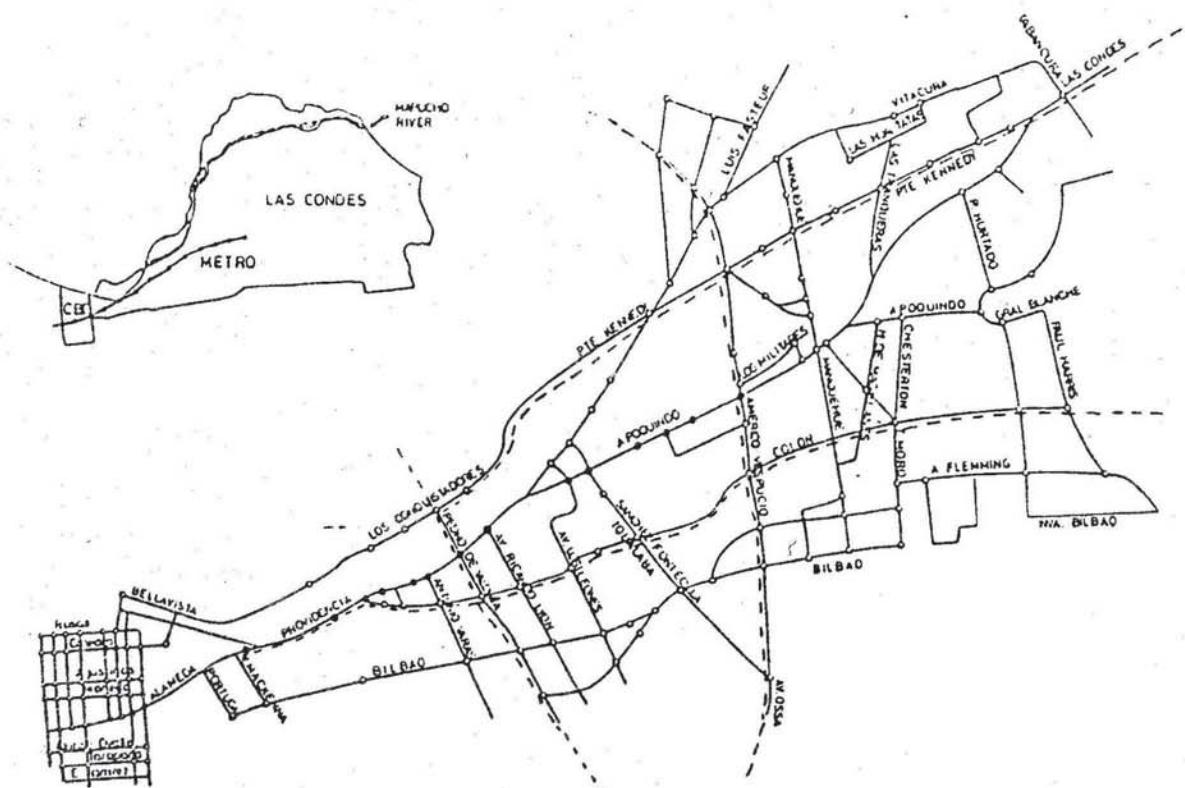


Figura.5. Red del corredor Las Condes - Centro

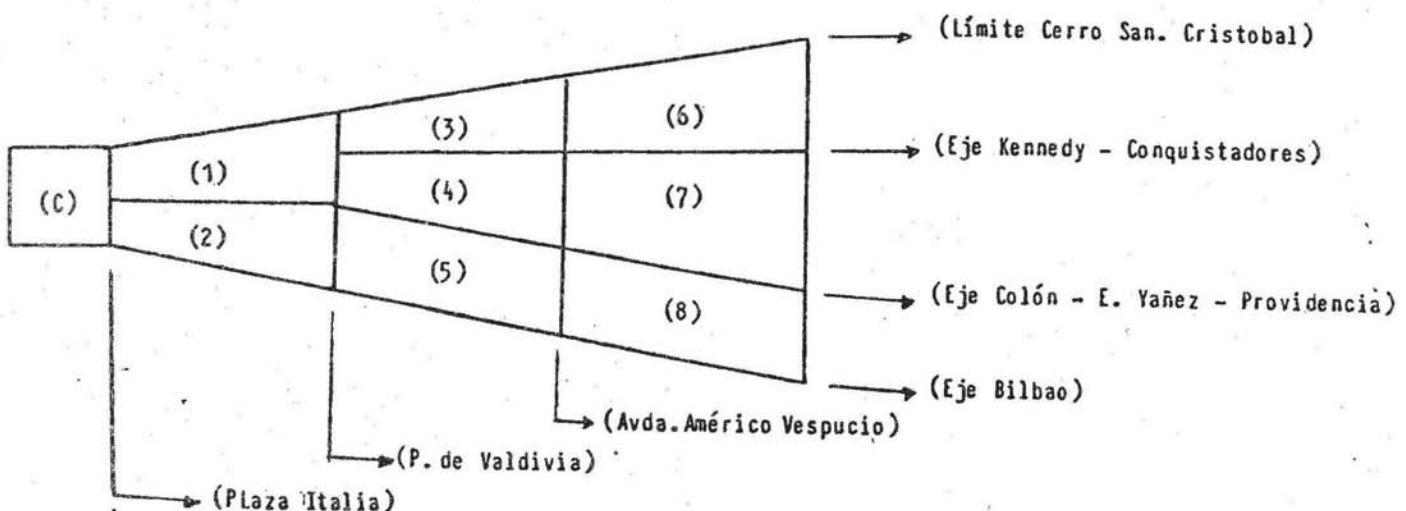


Fig.6. Zonificación del corredor Las Condes - Centro

relaciones flujo-velocidad en algunos tramos de la red (ver Tabla 1), los cuales se consideran representativos de tramos de una extensión mayor así como de otros tramos cuyas curvas de congestión no se estimarán aquí. En el último caso se tendrán en cuenta características similares de composición del flujo, ancho y número de pistas, actividades predominantes del entorno, etc.

Nombre del Tramo	Entre las calles:	Longitud (m)
Vitacura	A. de Córdova y Nueva Costanera	662
Kennedy	A. de Córdova y Paul Claudel	734
Apoquindo (Manquehue)	Estadio Italiano y El Faro	620
Apoquindo (El Golf)	Alcántara y T. El Golf	532
Providencia	Los Leones y Lyon	499
Bilbao	Jumbo y Tobalaba	326
Conquistadores	El Cerro y Hotel Sheraton	1.280
Costanera	Bucarest y F. Noguera	650

TABLA 1. Definición de tramos en que se estimarán curvas de congestión.

3.2. Medición de velocidades

La medición de velocidades se realizará utilizando equipos de radio. Este método consiste en instalar estaciones con equipo de radio al comienzo y fin de cada tramo. Los operadores de la primera estación anotan la hora de pasada de un vehículo y envían una descripción de éste al operador de la estación aguas abajo, el cual anotará la hora de pasada del vehículo y la descripción previamente recibida; la primera estación se ubica aguas abajo de un semáforo con el fin de obtener un comportamiento de pelotón. Interesa obtener la velocidad media del pelotón, por lo cual es necesario medir en cada ciclo del semáforo, el tiempo de viaje del mayor número de vehículos y que estos estén dispersos en el pelotón (evitar por ejemplo, vehículos que salen primeros de la línea de parada o bien vehículos rezagados). La experiencia obtenida indica que se pueden medir tiempos de viaje de tres vehículos por pelotón de los cuales, luego de validar los datos, se obtienen en general dos mediciones.

Instantáneamente se realizaron mediciones del nivel de flujo durante el período de verde del semáforo. Aquí se distinguieron dos tipos de vehículos: autos y buses. La longitud de los tramos (Tabla 1) está muy condicionada por las características de la vía, a saber, visibilidad, facilidades para instalar la estación, semáforos y recepción de la señal de radio.

En el anexo 1 se muestran gráficos del nivel de flujo versus tiempo medio de viaje en los tramos medidos.

Esta metodología permite análisis de algunas variables diferentes al flujo de automóviles (VA), que podrían explicar la variación del tiempo

medio de viaje. Por ejemplo, el flujo de buses (VB) y el instante en que el vehículo entra al tramo controlado (IE) a contar del comienzo del período de verde.

3.3. Estimación de funciones flujo-velocidad

En la búsqueda del mejor ajuste de una curva a la nube de puntos, se probaron varias formas funcionales.

La primera, desarrollada por el Bureau of Public Road (BPR) para autopistas en EE.UU. (1),

$$tme = t_0 (1 + \alpha (V/C)^\beta)$$

donde t_0 es el tiempo de flujo libre, V el nivel de flujo vehicular y C la capacidad de la vía. α y β son parámetros a estimar. También se utilizó una forma modificada de la fórmula anterior, donde se especifica $V = VA + \delta VB$, donde δ es un coeficiente a estimar que representa un tipo de factor de equivalencia entre ambos modos. Ambas funciones se regresaron utilizando métodos no lineales de ajuste.

La tercera forma funcional corresponde a una función logarítmica que se asemeja a la fórmula del BPR pero permite una regresión lineal, esto es

$$\log(tme - t_0) = \log \alpha + \beta \log(V) ;$$

finalmente se probó una forma funcional flexible, llamada "cuadrática", utilizando diversas variables explicativas. La expresión más general utilizada es:

$$tme = C + \sum_{i=1}^3 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1, i \neq j}^3 \gamma_{ij} X_i X_j$$

donde α_i , β_i y γ_{ij} son parámetros a estimar con $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$; X_i son las variables explicativas dispersadas respecto de la media, es decir:

$$X_1 = (VA - \bar{V}A), X_2 = (VB - \bar{V}B) \text{ y } X_3 = (IE - \bar{IE}).$$

Por otra parte, cada forma funcional fue probada con dos archivos de datos para cada tramo. El primero (ARCH1), contiene los datos de cada vehículo observado y el flujo correspondiente al período de verde en que ingresó al tramo. Para analizar el comportamiento del pelotón, se creó un segundo archivo (ARCH2) con los tiempos de viaje promediados entre todos los vehículos observados en un período de verde.

En la Tabla 2 se presentan los resultados más importantes de las regresiones obtenidas.

NOMBRE DEL TRAMO	REGRESION		ESTADISTICA			LONGITUD DEL TRAMO OBSERVADO	tme - TM _g DEL TRAMO
	CUADRATICA		Nº obs	R ²	Test t(α)		
	VARIABLES EXPLICATIVAS	ARCHIVO DE DATOS			M	Seg/Km	
VITACURA	X ₁ , X ₂	ARCH2	19	0,7	5,4	662,0	-22,9
KENNEDY	X ₁	ARCH2	38	0,14	1,7	773,6	-12,47
APOQUINDO - MANQUEHUE	X ₁ , X ₂ , X ₃	ARCH1	75	0,4	1,9	617,5	-20,41
APOQUINDO- EL GOLF	X ₁ , X ₂ , X ₃	ARCH1	71	0,6	2,5	632,0	-12,95
PROVIDENCIA - LYON	X ₁ , X ₂ , X ₃	ARCH1	77	0,3	2,1	498,2	-29,44
BILBAO- JUMBO	X ₁ , X ₂ , X ₃	ARCH1	147	0,3	4,2	326,2	-22,45
CONQUISTADORES	X ₁ , X ₃	ARCH1	46	0,5	1,9	1280,0	-32,74
COSTANERA	-	ARCH1	-	-	-	-	0,0

Tabla 2 . Relaciones flujo - velocidad. Resultado de regresiones

Los resultados del tramo Costanera son consecuentes con la densidad de semáforos y la falta de coordinación de los mismos, es decir, el flujo vehicular no constituye una variable explicativa significativa, dadas las restricciones impuestas por los semáforos a la conducción. En todos los casos, la función cuadrática entregó el mejor ajuste a la nube de puntos observados. Este es un resultado esperado, dado que los tramos observados incluyen varias intersecciones y, por lo tanto, el tiempo de viaje debe ser explicado por otras variables además del flujo. La variable IE resultó muy significativa, más aún que VB, sin embargo su signo resulta impredecible.

Para funciones cuadráticas, la diferencia TM_g - tme evaluada en la media de las variables está dada por

$$TM_g - tme = \frac{\alpha_1 \bar{VA}}{1}$$

donde $\bar{V}A$ es el flujo vehicular medio en el período de análisis y L es la longitud del tramo observado. En la Tabla 2 se entrega, además, el valor del estadígrafo t del parámetro α_1 . Los resultados de $TMg - tme$ muestran valores relativos que concuerdan con la realidad observada en cada tramo.

En esta ocasión, resulta imposible estimar curvas de congestión en todos los tramos de la red, por ello los valores del $TMg - tme$ utilizados en los tramos restantes, se obtienen en base a una comparación de las características físicas y de operación con los tramos medidos.

Por otra parte, el efecto de congestión en los accesos de la zona céntrica (al Poniente de Plaza Italia) fué estimado a partir de funciones de oferta obtenidas con métodos de simulación, por la Universidad Católica de Chile (2) considerando un flujo en hora punta igual al 80% de la capacidad efectiva.

4. Cálculo del efecto de congestión para cada zona de origen y discusión de resultados

En la Tabla 3 se presentan los valores de $TMg - tme$ para todos los tramos de la red, que forman parte de alguna de las rutas posibles entre las ocho zonas de origen y el destino Centro de Santiago. Se incluyen los valores de $TMg - tme$ para tres accesos al Centro: acceso Bilbao, acceso Plaza Italia y acceso Bellavista.

Con estos valores y las fórmulas de agregación en serie y paralelo, se obtienen valores de la diferencia $TMg - tme$ para los viajes entre los diferentes pares de Origen-Destino, en el período entre 7:30 y 9:30 hrs. Los resultados para cada zona origen aparecen en forma esquemática en la figura 7.

C	-132,8 (1)	-179,3 (3)	-215,3 (6)
	-161,5 (4)	-188,3 (7)	
	-152,5 (2)	-183,0 (5)	-244,9 (8)

Figura 7. Valores de $tme - TMg$ (en segundos) para los viajes entre cada zona y el Centro*.

* El número de la zona aparece entre paréntesis

Nombre del tramo	Entre las calles:	Tme - TMg (seg/Km)
* Vitacura	Manquehue y Hospital Militar	-22,9
* Kennedy	Manquehue y Puente Lo Saldes	-12,5
* Apoquindo (Manquehue)	Est. Italiano y R. O'Higgins	-20,4
* Apoquindo (El Golf)	R. O'Higgins y Los Leones	-12,9
Colón	Tomás Moro y Tobalaba	-13,0
* Bilbao (Jumbo)	Tomás Moro y Suecia	-22,5
Bilbao (Salvador)	Suecia y Vicuña Mackenna	-23,0
E. Yáñez	Tobalaba y Providencia	-12,5
* Providencia (Lyon)	Los Leones y M. Claro	-29,4
Providencia (Salvador)	Miguel Claro y Plaza Italia	-23,0
* Costanera (Lyon)	Rotonda Pérez Zujovic y M. Montt	0,0
Costanera (Salvador)	M. Montt y Puente Loreto	-13,0
* Conquistadores	Puente Lo Saldes y Hotel Sheraton	-32,7
Bellavista	Hotel Sheraton y Loreto	-30,0
Acceso Bilbao	Vicuña Mackenna y Plaza de Armas	-146
Acceso Plaza Italia	Puente Loreto y Plaza de Armas	-146
Acceso Bellavista	Puente Loreto y Plaza de Armas	-146

TABLA 3. TMg - tme para cada tramo de la red.

La primera conclusión, se obtiene a partir de la página 7. Se observa que la distancia entre el origen y el destino es, en efecto, una variable explicativa de los valores de TMg - tme en la red. Por otra parte, los valores de las zonas centrales del corredor (zonas 4 y 7), son claramente inferiores que aquellos correspondientes a zonas cuya distancia al centro es similar, pero se encuentran en los límites Norte y Sur del corredor. La explicación de este hecho radica en la mayor disponibilidad de rutas alternativas, algunas de las cuales incluyen tramos en que el valor del TMg - tme es pequeño; en particular incluyen el tramo Costanera. Además, la relación entre el valor de TMg - tme y el volúmen de cada ruta, definirá el valor de TMg - tme de cada zona; así, aquellos viajes desde zonas con escasa disponibilidad de rutas alternativas (por ej. zona 2), son más cautivos en el uso de una determinada ruta a pesar de su alto grado de congestión. Por esto, las zonas al sur del corredor presentan mayor grado de congestión.

La metodología utilizada en la estimación de relaciones flujo - velocidad puede ser mejorada en futuros estudios; en este sentido, se sugiere el método de vehículo flotante para medir velocidades.

Por otra parte, se comprueba la importancia de la falta de coordinación de semáforos, que en algunos casos impone restricciones en la circulación de tal magnitud, que el nivel de flujos resulta una variable poco explicativa del efecto de congestión.

En cualquier caso, en el gráfico tiempo de viaje - flujo vehicular se comprueba que la nube de puntos es muy dispersa sugiriendo que las variaciones de velocidad

de los vehículos, en un tramo que incluye intersecciones (semaforizadas y/o de prioridad), deben ser explicadas por otras variables además del flujo, por ejemplo el instante de entrada del vehículo al tramo (IE), los niveles de flujo que cruzan o se incorporan en intersecciones, virajes realizados por el flujo medido, etc. Por esto, resulta recomendable el uso de funciones flexibles (por ejemplo, la función cuadrática).

Finalmente, se comprueba que en el corredor Las Condes - Centro (en la hora punta de la mañana), efectivamente el modo automóvil particular presenta discrepancias entre la tarifa percibida por el usuario y el costo marginal en que incurre la sociedad, como efecto del fenómeno de congestión. Así, la evidencia de esta externalidad en el mercado de los viajes de pasajeros, constituye un argumento para estudiar el problema de tarificación considerando la teoría de Segundo Optimo y la presencia de bienes relacionados. En tal caso, el resto de los modos presenta, en general, tarifas superiores al costo marginal ($P - CMg > 0$), en cambio el fenómeno de congestión opera en sentido contrario en el modo automóvil particular, provocando un descenso de la tarifa óptima calculada en modelos de Segundo Optimo.

Referencias:

1. David Brauston (1976). Link capacity function: a review. *Transportation Research*, Vol 10, pp 223 - 236
2. Alejandro Echeverría (1983). Funciones básicas de oferta para transporte urbano. Tesis de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Chile.
3. Ralph Tuvey (1971). Economics analysis of public enterprises.
4. J.G. Wardrop, (1952). Some theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2 pp 325-378

ANEXO:

Gráficos de tiempos de viaje TV (en segundos) y volumen de automóviles en cada tramo (veh/ciclo).

IV
57.767

- 59 -

56.169

54.971

53.579

52.175

50.776

49.378

47.980

46.582

45.184

43.785

42.388

40.990

39.592

38.194

36.795

35.397

33.999

12.000 15.000 18.333 21.667 25.000 28.333 31.665 35.000 38.332 41.666 45.000

Tramo: Vitacura, entre A. Cordova y Nueva Costanera Ciclo 80 segundos

IV
53.835

52.845

51.854

50.864

49.874

48.883

47.893

46.903

45.912

44.922

43.932

42.941

41.951

40.961

39.670

38.980

37.990

36.999

56.000 60.091 64.636 69.182 73.727 78.273 82.818 87.364 91.909 96.454 101.000

Tramo: Kennedy, entre A. de Córdova y Paul Claudel Ciclo 80 segundos.

TY
110.456
115.174
113.932
110.671
117.4.7
114.145
111.683
97.521
64.359
91.086
67.83~
84.572
81.310
78.048
74.7.2
71.523
65.261
60.956

17.000 21.152 25.828 30.475 35.121 39.768 44.414 49.061 52.707 58.353 63.000

Tramo: Apoquindo - Manquehue, entre Estadio Italiano y El Faro Ciclo 80 segundos

TY
65.632
63.282
60.951
58.621
56.241
53.961
51.621
47.31
46.971
44.641
42.311
39.980
37.650
35.320
32.990
30.660
28.330
25.997

14.000 19.818 26.283 32.747 39.212 45.676 52.141 58.605 65.070 71.534 77.999

Tramo: Apoquindo - El Golf, entre Alcántara y T. El Golf Ciclo 80 segundos

IV
+7.165
+2.115
-17.146
+2.125
-27.126
-24.115
-67.116
-62.047
-57.087
-52.077
-47.067
-42.058
-37.048
-32.038
-27.028
-22.019
-17.019
-11.959

2

2.001 7.949 11.081 14.212 17.343 20.475 23.606 26.737 29.868 32.000

Tramo: Providencia, entre Los Leones y R. Lyon. Ciclo 60 segundos

IV
-53.660
-61.757
-59.835
-57.913
-55.950
-34.068
-32.146
-30.223
-28.301
-26.379
-14.456
-12.534
-20.612
-18.689
-16.767
-14.845
-12.922
-0.995

2

2 2

2 2

3 2

2 2

2 2

3 2

2 2

3 2

2 2

3 2

2 2

3 2

18.000 21.636 25.677 29.717 33.757 37.798 41.838 45.979 49.010 53.959 58.000

Tramo: Bilbao entre el Jumbo y Iobalaba Ciclo 70 segundos

TV
183.107
182.748
177.388
172.024
166.670
161.311
155.911
150.542
145.233
120.174
134.515
129.355
123.745
118.437
113.678
107.718
102.354
97.090

- 62 -

49.000 51.426 54.566 57.495 60.424 63.252 66.282 69.212 72.141 75.070 77.999
VA

Tramo: Conquistadores, entre el Cerro y Hotel Sheraton Ciclo 80 segundos

TV
177.592
166.146
157.699
149.252
140.806
132.359
123.912
115.466
107.039
98.572
90.126
81.479
73.232
64.786
56.339
47.892
39.446
30.999

64.000 82.727 103.535 124.343 145.151 165.959 186.767 207.575 228.383 249.191 269.997
VA

Tramo: Costanera, entre Budapest y F. Noguera Ciclo 75 segundos