

# Estudio con el Modelo TRIPS de Efectos sobre la Demanda de Transporte Producto de Medidas de Gestión de Tráfico

Natalia Durán A.  
Steer Davies Gleave  
Mariano Sánchez Fontecilla 310 Piso 16, Santiago, Chile  
Fax: +56-2-473 6969, e-mail: natalia.duran@sdgworld.net

Rodrigo Fernández A.  
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes  
Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago, Chile  
Fax: +56-2-214 1752, e-mail: rfa@miuandes.cl

## RESUMEN

Las medidas de gestión de la demanda de tráfico están diseñadas para restringir el uso de los automóviles e incentivar modos de transporte alternativos. Es difícil evaluar el impacto de estas medidas utilizando modelos estratégicos, y tampoco son apropiados modelos puramente operacionales. Este trabajo muestra la aplicación de un modelo más flexible (TRIPS) que permite modelar las cuatro etapas del modelo clásico de transporte y al mismo tiempo representar una red en detalle. Se implementó el modelo en una ciudad de tamaño medio (Valdivia) y se probaron diversas medidas de gestión de tránsito. Los resultados más destacables son que las calles exclusivas para buses producen cambios en la partición modal, no así en la distribución de viajes; pero en la asignación se encontraron cambios en un área bastante mayor, incluyendo el centro. La tarificación en el centro produjo una reasignación en un área bastante mayor a la intervenida; además, hizo cambiar la partición modal, no sólo de los viajes con origen o destino el centro, sino que los de toda la ciudad.

*Palabras clave:* gestión de demanda de tráfico, modelación, TRIPS

## ABSTRACT

Traffic demand management is designed to restraint the use of cars and to encourage people to use other modes of transport. However, it is difficult to evaluate these measures by using strategic models, for they consider aggregated traffic relationships such as speed-flow curves and ignore short-term variations in junction capacity. In addition, purely operational models are not appropriated because some measures can change not only traffic assignment but also other the demand stages. This article shows the application of a more flexible model (TRIPS) which make use of the classic four-stage model, but also represents the traffic network in detail. Results show that bus only roads make changes in modal split, but do not modify trip distribution; however, this measure changes traffic assignment not only in the adjacent roads, but also in a broader area. Cordon road pricing in the city centre changed traffic assignment in a wider area and made changes in modal share not only for city centre journeys, but also in the entire city.

*Keyword:* traffic demand management, modelling, TRIPS

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de tráfico consiste en manejar el grado de saturación de dispositivos viales (vías, intersecciones, estaciones, redes). El grado de saturación ( $x$ ) de un dispositivo vial es la razón entre el flujo ( $q$ ) o demanda de tráfico y su capacidad ( $Q$ ) u oferta de tráfico. Analíticamente esto se expresa como:

$$x = \frac{\text{Demanda de tráfico (flujo)}}{\text{Oferta de tráfico (capacidad)}} = \frac{q}{Q}$$

Por lo tanto, las medidas de gestión de tráfico se pueden clasificar en dos categorías: gestión de la oferta de tráfico, que busca maximizar la capacidad  $Q$  la red y gestión de la demanda de tráfico, cuyo objetivo consiste en reducir los flujos vehiculares  $q$  sobre la misma red. Según Wallace et al (1999) las medidas de gestión de la demanda están diseñadas para regular el deseo de los viajeros por usar automóviles e incentivarlos a usar modos de transporte alternativos (transporte público, bicicletas, caminata). Esto se refleja en la disminución del grado de saturación de los diferentes dispositivos viales, producto de la disminución del flujo de vehículos a igual capacidad vial y, a través de éste, en los impactos urbanos derivados del tráfico como congestión (colas, demora, detenciones), polución, ruido, riesgo, segregación, intimidación, intrusión visual, etc. (Ferguson, 1991).

Entre algunas medidas de gestión de la demanda de tráfico que parecen atractivas figuran las prioridades al transporte público, las facilidades a peatones y ciclistas, el control de estacionamientos en áreas céntricas, la tarificación vial por congestión, el control de la saturación mediante la programación de semáforos (*gating*). Cada una de estas tiene objetivos específicos e impactos diferentes. Por ejemplo las prioridades al transporte público se orientan a cambios modales, mientras que el *gating* puede lograr cambios en los horarios y asignación de los viajes. Con la tarificación vial se busca variar el destino o partición modal de algunos los viajes o la asignación de éstos a la red (IHT, 1997; Victoria Transport Policy Institute).

Aunque han sido utilizados con este fin, resulta inapropiado evaluar el impacto de este tipo de medidas utilizando modelos de carácter estratégico, ya que consideran algunas variables de tráfico de manera agregada (e.g., curvas flujo-velocidad) o ignoran otras (e.g., variación en la capacidad de una intersección durante el ciclo de un semáforo). Modelos de este tipo, como ESTRAS (MIDEPLAN, 2001) o EMME/2 (INRO, 1998), son insensibles a aspectos fundamentales de gestión de tráfico (e.g., cambio en las demoras en intersecciones). Por ello, no logran modelar bien la variación en el patrón de flujos y la capacidad. En consecuencia, no obtienen una buena estimación del grado de saturación y sus impactos asociados. Tampoco son del todo apropiados modelos puramente operacionales, como TRANSYT (Vincent et al, 1980), SATURN (Van Vliet, 1993) o GETRAM

(TSS, 2000), ya que algunas medidas de gestión de tránsito pueden incidir sobre la asignación de tráfico, sobre la partición modal, o aún en la distribución o generación de viajes (Montero et al, 1998; Siegel y de Grange, 2001). Sin embargo, un modelo más flexible como TRIPS TRansport Improvement Planning System (CITILABS, 2002), que permite modelar las cuatro etapas del modelo clásico de transporte y, al mismo tiempo, construir y modelar una red con detalle (e.g., varias formas de regulación de intersecciones como rotondas, semáforos, cruces prioritarios, pasos cebra y enlaces), tiene las características necesarias para poder hacer este tipo de análisis. TRIPS no ha sido probado con este objetivo en Chile.

A partir de lo anterior, surgen preguntas a las que se le buscó respuesta en una investigación de mayor alcance (Durán, 2009): ¿Cómo impactan medidas de gestión de tránsito en la demanda de tráfico? ¿En qué proporción lo hacen en un medio como el chileno? ¿Qué tan apropiada es una herramienta como TRIPS para captar estos cambios? Para lo anterior, el objetivo general de este trabajo es medir cuantitativamente los impactos de medidas de gestión de tránsito sobre la demanda de tráfico, es decir, sobre la magnitud de los flujos vehiculares, utilizando como herramienta un modelo apropiado de carácter táctico como TRIPS. De esta manera, los objetivos específicos del estudio se pueden resumir en los siguientes:

a) Revisar diversas medidas de gestión de tránsito que potencialmente afecten la demanda de tráfico y sus impactos reportados en la literatura internacional.

b) Usar TRIPS para probar las distintas medidas de gestión, estimar dichos impactos e implementarlo en un área de tamaño apropiado (ciudad de tamaño medio).

c) Definir distintos esquemas de gestión de tránsito en el área de análisis, comparar y discutir los resultados con los efectos observados y esperados.

Ese documento se compone de 7 secciones. La sección 2 está dedicada a revisar las medidas de gestión de la demanda de tráfico. La sección 3 describe la metodología usada en el estudio. Las secciones 4, 5 y 6 están dedicadas a la descripción de los experimentos y presentación de sus resultados. Por último, la sección 7 contiene algunos comentarios finales sobre el trabajo.

## 2. MEDIDAS DE GESTIÓN DE DEMANDA DE TRÁFICO

Ferguson (1991), define a la gestión de la demanda de tráfico como el arte de modificar lenta y gradualmente el comportamiento individual de los viajeros, en vez de expandir la capacidad vial cada vez que se observa o se espera un aumento en la congestión. Esto se puede hacer a través de una gran variedad de medidas o conjuntos de éstas que tienen diferente tipo de impactos sobre el sistema de transporte. Estas medidas pueden producir cambios en los horarios, los destinos, las rutas o los modos de los viajes. Por ejemplo, se pueden mejorar las opciones existentes de transporte por medio de mejoras al transporte público o bien otorgando facilidades a peatones y ciclistas que incentiven cambios modales. A continuación, se presentan algunos ejemplos de medidas, con los mecanismos que se usan para su implantación y los cambios en las etapas del modelo clásico que transporte que conllevan.

**TABLA 1: Ejemplos de Medidas de Gestión de Demanda de Tráfico y sus Efectos**

Medidas de gestión de demanda de tráfico	Mecanismo	Efectos esperados
Desarrollo urbano y uso del suelo controlado	Proveer servicios en áreas residenciales	Reduce uso de vehículos y longitud de los viajes
Horarios de trabajo flexibles	Incentivos para cambiar los horarios o permitir trabajo remoto	Desplaza flujos desde las horas punta
Tarificación vial	Cobro al entrar a un área o vía congestionada en automóvil	Reduce flujos en esas vías o áreas
Prioridades al transporte público	Mejora en la infraestructura y operación del transporte público	Incentiva uso de transporte público en desmedro del privado motorizado
Prioridades a peatones y ciclistas	Mejora física de las condiciones de viaje para estos modos	Incentiva el uso de bicicletas y los viajes a pie
Uso compartido del automóvil	Provisión de pistas exclusivas para HOV o exenciones en tarificación vial	Aumenta la ocupación de los automóviles, disminuyendo su flujo
Aquietamiento del tráfico	Rediseño vial en áreas sensibles	Reduce la velocidad y flujo de esas áreas

Fuente: basado en [www.vtpi.org/tdm/tdm14.htm](http://www.vtpi.org/tdm/tdm14.htm) y elaboración propia

En el contexto internacional, Cairns et al (2002), cita ejemplos de más de 60 casos donde se han implementado medidas de gestión de tránsito, enfocadas principalmente a cerrar parte de la red vial para uso exclusivo de algunos usuarios: peatones, ciclistas o transporte público. Los resultados en al menos el 80% de los casos muestran que los niveles de flujo alrededor del área donde se aplicó la medida disminuyeron, contradiciendo las predicciones y aprensiones tradicionales. En todos estos casos se logró que las personas modificaran sus decisiones de viajes y cambiaran el modo, destino o incluso suprimieran los viajes.

Generalmente, las medidas de gestión no se han implementado individualmente, sino que en conjuntos coherentes. En el caso de prioridad al transporte público en el último tiempo en Latinoamérica la tendencia ha sido a implementar no sólo medidas de gestión de tránsito, sino acompañarlas con cambios más profundos en el funcionamiento de las empresas de buses, el sistema de cobro de la tarifa, la tecnología de los buses y la provisión de infraestructura especializada. Ejemplos son los proyectos Transmilenio en Bogotá, Ecovía en Quito, Transantiago en Santiago y Transmetro en Guatemala.

En el caso particular de Transmilenio, al cabo de un año de operación se realizó una evaluación ex-post y se pudo ver que se realizaba un 15% más de viajes que los estimados. Además, en encuestas a usuarios un 10% dijo haber cambiado de modo desde el vehículo particular, variable que no fue considerada en la modelación inicial, lo que explicaría en parte la diferencia en la demanda del sistema (Chaparro, 2002).

El hecho de que no se haya considerado la posibilidad de cambios de modo entre el vehículo particular y Transmilenio o no se reporten cambios en la demanda cuando se hacen estudios de medidas aisladas de gestión de tránsito, evidencia la tendencia que existe a no asociar que cambios en la gestión de tránsito pueden tener impactos relevantes en la demanda del sistema de transporte. Algo similar ocurre cuando se revisan los casos donde se han implementado vías reversibles, en el sentido es que lo que se reporta son las mejoras en la congestión y tiempo de viaje en la misma vía, pero no respecto a si existen cambios en la demanda.

La experiencia de tarificación de cordón en el centro de una ciudad sobre la cual más información se puede encontrar es la de Londres. En febrero de 2002 se comenzó a cobrar por circular en el área centro de Londres durante el día. Esto generó cambios en los patrones de viajes dentro de la ciudad. Mori (2004) realizó un

estudio detallado de los impactos sociales de la medida en Londres, recopilando información con cuestras realizadas antes de implementar la medida y más de un año después. La siguiente información es sobre un viaje específico que las personas describieron en detalle antes y después de la implementación de la tarificación.

**TABLA 2: Cambios en los Viajes realizados en Londres entre 2002 y 2003**

	Viajes originados en la zona centro (%)	Viajes originados en el resto de la ciudad (%)
Sin cambios	79	68
Con algún cambio	21	32
-Cambio de modo*	11	16
-Cambio de periodo*	9	15
-Cambio de destino*	5	6
-Cambio de destino dentro de la zona**	9	8

\* Los valores pueden sumar más de 21% o 32% pues se pueden hacer más de un tipo de cambio.

\*\* Valor calculado sólo sobre los viajes cuyo destino final estaba dentro de la zona de cobro Fuente: (Mori, 2004)

En el ámbito nacional se han implementado algunas medidas como pistas y calles sólo bus y prohibición de estacionamientos. Estas medidas se han efectuado sin tener una evaluación de sus beneficios a priori o se han evaluado ex-post, no siempre aplicando metodologías adecuadas. También se han implementado algunas medidas que van en sentido opuesto a su objetivo general, el uso racional del automóvil como vías reversibles, que ofrecen un aumento de la capacidad en el sentido de mayor demanda de tráfico. Estas medidas logran bajar los tiempos de viaje de los usuarios de transporte privado, pero no queda claro que sean positivas al revisar la situación en un nivel más amplio, como comuna o ciudad.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Recopilación de Datos y Factibilidad de Experimentos

Se buscó información de modelos clásicos de transporte calibrados para ciudades de tamaño medio en Chile. La Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA) constantemente desarrolla estudios donde se deben calibrar este tipo de modelos. Debido a la disponibilidad de información, se eligió la ciudad de Valdivia (CIS, 1998b) como área de estudio de este trabajo.

La elección de las medidas que fueron modeladas se hizo por variados criterios. Por un lado, debido al interés de cuantificar impactos potenciales de algunas medidas que se han implementado en lugares como Santiago de Chile. Por otra parte, para revisar si las medidas eran factibles de implementar en un programa como TRIPS. Se buscaron medidas en se pudieran modelar sólo mediante cambios en la oferta de transporte (arcos, nodos, líneas de transporte público, costo generalizado), para observar el efecto de medidas puras de gestión de tránsito sobre la demanda. Las medidas seleccionadas fueron las siguientes, todas ellas cumpliendo con los requisitos de ser medidas de gestión, es decir, requieren sólo señalización, demarcación, rediseños menores y, en el caso de la tarificación, portales de cobro sin detención.

- Prioridad al transporte público mediante calles sólo bus.
- Implantación de una vía reversible en función de la demanda de tráfico.
- Tarificación de cordón en la zona céntrica de la ciudad en estudio.

#### 3.2 Pertinencia y Ajuste de la Herramienta

Se realizó un análisis para ver si el modelo TRIPS era capaz de modelar las medidas anteriores. Este análisis se basa en revisar los cambios que se tendrán que realizar sobre la red para modelar los experimentos y cómo internaliza el programa estos cambios.

Medidas de prioridad al transporte público como una pista sólo bus implica la protección de una pista para el transporte público, pero no el confinamiento de éste a esa pista; es decir, se debe permitir que los buses usen las demás pistas para adelantar, ya sea en paraderos o por variaciones de velocidad. TRIPS no modela bien esta regla, ya que no permite la salida de los buses desde la pista sólo bus, debido a que se modelan los distintos modos en arcos separados. Por ello, se decidió no incluir pistas sólo bus dentro de los experimentos, pero sí la provisión de una calle exclusivas, ya que esta no requiere una modelación por pista. Otro problema que se presenta en general con el transporte público es que no se puede modelar de manera adecuada el tiempo detenido en paraderos, por lo cual el “efecto paradero” se incluye dentro de la curva flujo-velocidad de los arcos.

TRIPS tiene flexibilidad y al mismo tiempo internamente tiene operaciones ya programas que ayudan a realizar la modelación. Se pueden hacer diversas operaciones viales, por lo que se pueden desarrollar los modelos de generación y atracción de viajes. También tiene un módulo especial de distribución con modelos como el gravitacional doblemente acotado. Además, tiene programados diversos modelos de partición modal entre los cuales se encuentra el logit multinomial y el logit jerárquico.

Para la asignación, la red que permite crear TRIPS es bastante completa y el usuario debe proveer la función flujo-velocidad. Para los vehículos livianos esto no genera ninguna complicación, ya que existen relaciones clásicas. Para el transporte público, sin embargo, no se puede usar las mismas curvas flujo-velocidad, debido a que los vehículos de transporte público tienen detenciones por transferencia de pasajeros. Para ello se desarrolló un enfoque alternativo (Durán, 2009). Este consistió en calibrar una forma funcional de la velocidad promedio del transporte público como la siguiente (Fernández y Valenzuela, 2003).

$$V_c = V_r \exp(-\alpha_1 F_{dp} - \beta_1 T_{dp} - \alpha_2 F_{dt} - \beta_2 T_{dt}) \quad (1)$$

Donde  $V_c$  es la velocidad comercial del transporte público (km/h), es decir, la velocidad promedio de viaje incluidas todas las demoras en el arco;  $F_{dp}$  y  $T_{dp}$  son respectivamente la frecuencia de detenciones (det/km) y tiempo por detención (s/det) en paraderos;  $F_{dt}$  y  $T_{dt}$  son la frecuencia de detenciones (det/km) y tiempo por detención (s/det) en intersecciones, respectivamente;  $V_r$  es la velocidad de recorrido o en movimiento; y los  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  son parámetros a calibrar.

El valor de  $V_r$  puede ser reemplazado por el valor de la velocidad de recorrido de los demás vehículos del arco (de la curva flujo-velocidad de vehículos privados) y se puede recoger la influencia de los paraderos en la velocidad comercial del transporte público. Para lograr esto se debió realizar el cálculo de la velocidad de recorrido mediante la siguiente función:

$$t_v - t_d = \frac{L}{V_r} + \frac{V_r}{\gamma} n_d \quad (2)$$

Donde  $t_v$  es el tiempo de viaje (s);  $t_d$  es el tiempo detenido (s);  $L$  es la longitud del tramo (m);  $n_d$  es el número de paradas en el tramo. Los valores a calibrar son  $V_r$  (m/s) y  $\gamma$ , la tasa de aceleración y frenado de los buses (m/s<sup>2</sup>). Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 4: Velocidad de Recorrido y Tasas de Aceleración y Frenado**

Parámetro	Valor	Error estándar	t
$V_r$ (m/s)	10.72	0.12	89.4
$\gamma$ (m/s <sup>2</sup> )	1.329	0.030	43.6
$r^2$	0.327		

Fuente: Elaboración propia

Así, se recalculó la velocidad de recorrido  $V_r$  y se calibró la forma funcional propuesta en la Ecuación (1), cuyo resultado se muestra a continuación.

**TABLA 5: Calibración del Modelo de Velocidad Comercial**

Parámetro	Valor	Error estándar	t
$\alpha_1$	0.0874	0.0020	44.6
$\alpha_2$	0.0961	0.0032	29.9
$\beta_1$	0.0275	0.0016	17.6
$\beta_2$	0.0176	0.0017	10.1
$r^2$	0.976		

Fuente: Elaboración propia

Para usar esta forma funcional en el modelo y recoger el efecto de la variación de flujo en la velocidad de los buses, se reemplazo la velocidad de recorrido por la proveniente de la relación flujo-velocidad usada para los demás vehículos, sin considerar detenciones por semáforo. De esta forma se obtuvo una curva flujo-velocidad para los buses, que incorpora el efecto de las detenciones en los paraderos, pero no considera las detenciones en semáforos, ya que la red tiene incluido este tipo de regulación y modifica el tiempo de viaje incluyendo las demoras en semáforos.

Con la misma base de datos de Fernández y Valenzuela (2003), pero sólo con los casos con detenciones por paraderos, se calibraron las relaciones entre cantidad de pasajeros, frecuencia de detenciones y demora en las detenciones.

$$t'_d = \rho_{td} P_t \tag{3}$$

$$v'_d = \rho_{nd} P_t$$

Donde  $t'_d$  es el tiempo detenido por kilómetro (s/km);  $n'_d$  es el número de paradas por kilómetro;  $P_t$  son los pasajeros que sube y bajan (pax/km). Los parámetros a calibrar son  $\rho_{td}$ , tiempo detenido por pasajero (s/pax) y  $\rho_{nd}$ , número de paradas por pasajero (1/pax). Los resultados se muestran a continuación.

**TABLA 5: Relación Tiempo Detenido y Número de Detenciones con Transferencia de Pasajeros**

Parámetro	Valor	Error estándar	t	R2
$\rho_{td}$	0,3130	0,030	10.302	0.414
$\rho_{nd}$	0,233	0,017	13.630	0.553

Fuente: Elaboración propia

Con estas relaciones se modificaron los tiempos y frecuencia de las detenciones, cuando se presentan cambios importantes en la cantidad de pasajeros transportados por los modos de transporte público en los experimentos.

En lo que sigue se muestra las medidas probadas con la herramienta así calibrada y su resultados.

#### 4. CALLES SÓLO BUS

Se eligieron 3 vías para implementar esta medida, teniendo en cuenta que son las que en la red real mueven la mayor cantidad de vehículos de transporte público. Dos de ellas se encuentran en el centro de la ciudad y la tercera conecta la parte sur de la ciudad con el centro. Las vías escogidas tienen todas dos pistas por sentido; las dos del centro son unidireccionales y la que conecta con el centro es bidireccional. La Figura 1 muestra la red y aspectos de las vías elegidas.



**FIGURA 1: Vías Elegidas para Transformar en Calles Sólo Bus**

Para realizar la modelación se plantearon dos escenarios: situación base y con calle sólo bus. Para esto se realizaron modificaciones sólo a la red. En el escenario con calle sólo bus se hace la capacidad igual a cero para la red de transporte privado, mientras que la de transporte público mantiene una capacidad de 2 pistas. La medida está dada para vehículos de transporte público mayor (buses y taxibuses) y menor (taxis colectivos). El objetivo de la medida es dar prioridad a los vehículos de transporte público sobre los demás vehículos. Se decidió dejar las dos pistas de las calles como exclusivas que los vehículos de transporte público pudiesen realizar adelantamientos, al menos en las áreas de parada, sin aumentar el número de detenciones y las demoras de aquellos que no necesiten detenerse en un paradero.

##### 4.1 Cambio en la Distribución de Viajes

Para analizar los posibles cambios en la distribución de viajes se optó por hacer una comparación celda a celda de las matrices y obtener el porcentaje de viajes que cambia su par origen-destino, tanto de todos los viajes como por propósito del viaje. En el caso de las calles sólo bus, un 3,4% de los viajes modifican su par origen destino. Este cambio es más pronunciado en los viajes con propósito trabajo, donde en un 4,3% de los viajes cambia su par origen destino. A continuación se muestran las zonas con mayores cambios, en magenta las zonas origen, en azul las zonas destino.



FIGURA 2: Ubicación de Zonas con Mayor Variación en la Distribución de Viajes

Los mayores cambios no se producen necesariamente en las zonas más cercanas a las calles sólo bus. Al revisar el caso de los mayores cambios por zona origen, estas no se localizan cerca de las vías donde se implementó la medida, pero sí lo hacen de manera más pronunciada en las zonas de destino.

4.2 Cambio en la Partición Modal

Analizando los resultados de la modelación de las calles sólo bus se puede ver que si bien se presentan cambios en la partición modal, estos cambios son pequeños: variaciones de menos del 6% en la partición modal de toda la ciudad y variaciones de menos de 8% cuando se analizan sólo los viajes que llegan o salen de la zona centro. A continuación se presentan la partición modal de modos no motorizados, de transporte público y privado.

Las variaciones más fuertes se ven cuando se revisan sólo los viajes que llegan al centro, ya que por el período modelado (punta mañana) y la estructura de la ciudad, es en el centro donde se concentra la mayor atracción de viajes (ver las últimas dos columnas de la siguiente figura). También se observa que los cambios en la partición modal se dan de manera más fuerte entre la caminata y los modos de transporte público. Esto ocurre porque para la mayoría de los viajes no están disponibles los modos de transporte privado, por lo cual mejoras en el transporte público implican una disminución de la participación de la caminata.

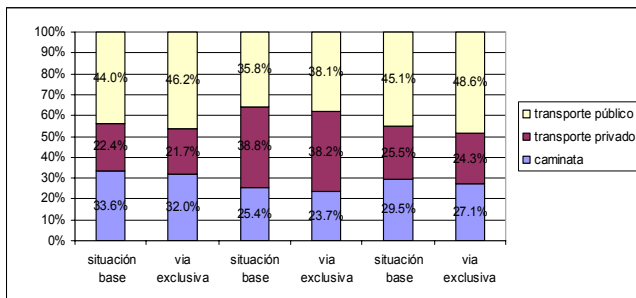


FIGURA 3: Cambio en Partición Modal por Calles Sólo Bus

4.3 Cambio en la Asignación de Viajes

Con la eliminación de las tres calles sólo bus de la red para el transporte privado es esperable que se produzca un cambio en la asignación de los viajes. Hay cambios importantes en los

corredores donde se aplica la medida y en los paralelos más cercanos. Pero también hay variaciones en un área mayor. En la siguiente figura se muestran los cambios en la asignación: bandas rojas muestran las calles con aumento de flujo y azules las con reducciones. En la figura también se observa cómo esta medida, que sólo se aplica en 3 corredores de la ciudad, tiene un impacto importante en la asignación a toda la red, y no sólo sobre las vías inmediatas a los corredores donde se aplicó.

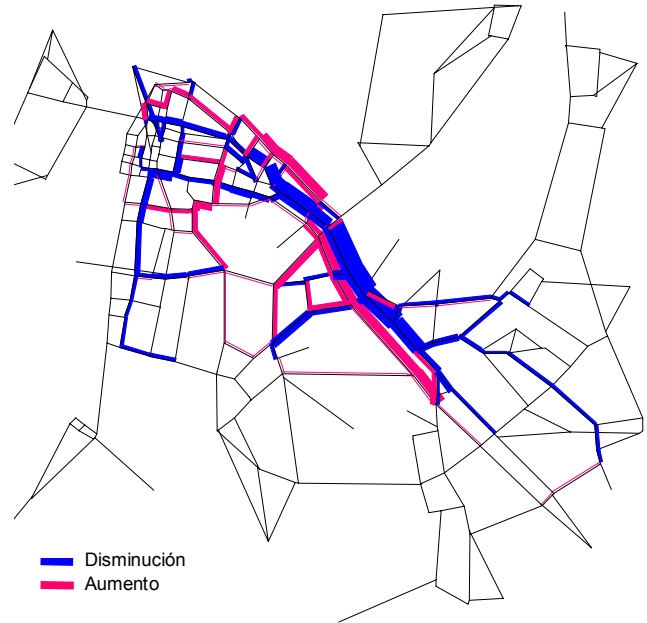


FIGURA 4: Cambios en la Asignación de Flujo a la Red

4.4 Índice de Rendimiento de la Red

Para comparar los beneficios de las medidas se construyó un índice de rendimiento (IR) dependiente del tiempo de viaje y del costo de combustible. Su forma funcional es la siguiente:

$$IR = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Z \sum_{k=1}^Z C_{TV} TV_{ijk} V_{ijk} + \sum_{l=1}^A \sum_{m=1}^T C_{cc_{lm}} q_{lm} \quad (4)$$

Donde  $C_{TV}$  es el precio social del tiempo de viaje;  $TV_{ijk}$  es el tiempo de viaje para el modo  $i$  entre el par  $j, k$ ;  $V_{ijk}$  es el número de viajes en el modo  $i$  entre el par  $j, k$ ;  $C_{cc_{lm}}$  es el costo del consumo de combustible en el arco  $l$  para el tipo de vehículo  $m$ ; y  $q_{lm}$  es el flujo en el arco  $l$  de vehículos tipo  $m$ . Además,  $M$  son los modos considerados,  $Z$  el número de zonas,  $A$  la cantidad de arcos y  $T$  los tipos de vehículos.

Este índice se calculó para cada grupo de modos: no motorizados (caminata), transporte público (buses y taxis colectivos) y transporte privado (auto chofer y acompañante). Se dividió por la cantidad de pasajeros del modo para comparación. En la Tabla 7 se presentan los valores de en el período punta mañana. En este caso se logró una disminución en los índices de la caminata y del transporte público. La baja en el índice de caminata se explica porque los viajes que se cambian al transporte público son los más largos, por lo que se acorta la distancia promedio de viaje en este modo. El índice para el transporte público baja producto de la disminución del tiempo de viaje promedio por pasajero en casi un 12% y una pequeña reducción del consumo de combustible del transporte público en un 0,3%. Por su parte, los mayores costos del transporte privado no alcanzan a compensar la baja en los índices del transporte público,

permitiendo una reducción en el *IR* del 2,3%, pasando de 2,55 a 2,49 millones de pesos. En definitiva, la medida de calles exclusivas resulta positiva para todo el sistema.

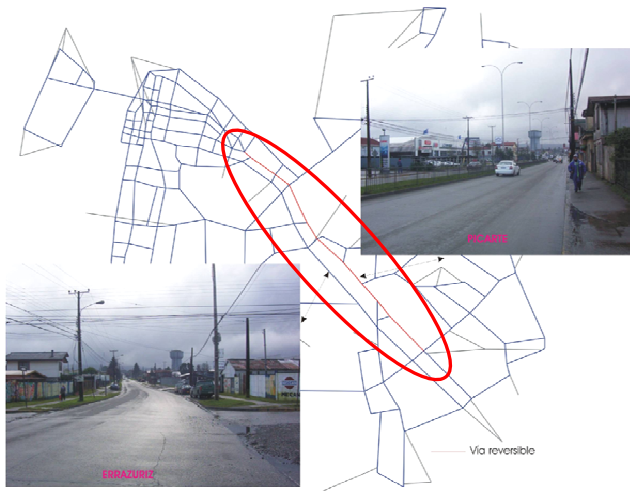
**TABLA 6: Índice de Rendimiento por Modo (\$/h-pax)**

Modo	Situación base	Calles sólo bus
Caminata	2,90	2,79
Transporte privado	83,26	87,80
Transporte público	149,75	137,48

Fuente: Elaboración propia

## 5. REVERSIBILIDAD DE VÍAS

En este experimento se modeló la reversibilidad de una vía, es decir, el cambio de dirección en ciertos periodos del día en función de la dirección del flujo predominante. La calle escogida es una de las vías con mayor longitud que conecta el centro con la zona sur-oriente de la red (calle Picarte). Esta vía, en la situación base, es bidireccional y la cantidad de pistas por sentido varía: cerca del centro tiene 2 pistas por sentido y en su tramo sur tiene una pista por sentido. En la siguiente figura se muestra la ubicación de la vía en la red y su aspecto físico.



**FIGURA 5: Vía Elegidas para Adoptar la Reversibilidad de Vías**

Se compararon dos situaciones: la actual y una en que la vía es unidireccional hacia el centro de la ciudad. Para modelar la vía unidireccional se dejó el arco en un solo sentido y se aumentó su capacidad al doble. Además, se debió modificar los recorridos de transporte público que ocupaban esa vía.

Cada periodo del día tiene asociada una estructura de viajes diferente, que tienen implícita la localización de viviendas y actividades. La red, al menos la parte de infraestructura, es la misma. Como se quería observar la utilidad de hacer una vía reversible, se planteó variar la generación y atracción de viajes para tener estructuras de demanda que pudieran representar distintos periodos del día y distintas conformaciones de ciudad. Se construyeron 11 escenarios con distinta estructura de vectores de origen destino para representar estas diferentes conformaciones de ciudad.

### 5.1 Resultados Generales

En general los efectos implantar un vía reversible pronosticados por la modelación son moderados en el contexto en que se aplicó. No se observaron grandes cambios en la partición modal o en los tiempos de viaje, y las variaciones en el índice de rendimiento no

superaron el 1,6%, siendo en general menores al 1%. Todo esto se confirma cuando se revisa el área de influencia de la medida que se reduce a impactos sólo en las calles paralelas a la vía reversible.

La reversibilidad de vías es una medida que puede ser polémica, ya que no siempre están claros sus beneficios. En este caso la medida fue aplicada en una vía por la que transita casi todo el transporte público de la ciudad y, además, conecta funcionalmente de manera directa las dos zonas con mayor concentración de viajes. Estas condiciones hacen que el esquema, tal como fue evaluado, sea beneficioso en la mayoría de los casos, ya que mejoró el tiempo de viaje promedio de los usuarios de transporte público. Aunque, debido a cambios de rutas, aumenta el tiempo del transporte privado.

## 6. TARIFICACIÓN DE CORDÓN EN LA ZONA CENTRO

Con este experimento se intentó revisar los efectos de definir un cordón alrededor del centro donde se cobre cada vez que se entre o salga de éste. Se eligió el cordón como el límite de la zona centro, definida por la zonificación de la modelación del área de estudio (CIS, 1998b), ya que, por la agregación de la información, no es imposible modelar un área más pequeña. Se tuvo especial cuidado de no tarifcar ninguna ruta obligada, por lo cual, se dejó un anillo libre alrededor de la zona tarifcada.



**FIGURA 6: Zona Tarifcada**

Para modelar el efecto del cobro se varió la tarifa desde \$0 (situación base) hasta \$500 pesos (pesos de diciembre de 1996). Esta variación de tarifa es equivalente a aumentar el costo del viaje en auto desde 0 hasta 10 veces su valor promedio. Los valores de ingreso líquido promedio mensual por hogar por categoría fueron, bajo: \$75.000, medio: \$325.000, y alto: \$750.000 (pesos de diciembre de 1996).

### 6.1 Cambio en la Partición Modal

Se presentaron cambios en la partición modal, aunque, cuando se analizaron a nivel de toda la ciudad éstos resultan drásticos. Para el modo de auto, con una tarifa de \$50 (igual un costo de operación promedio del auto), la partición modal disminuyó entre 1 y 3 puntos porcentuales, llegando a una disminución de más de 5% con la tarifa más alta. Sin embargo, al revisar lo que ocurre con los viajes con destino a la zona centro, se ve una modificación dramática en la partición modal. Esta varía entre un 10% y 20%, aun con la menor tarifa.

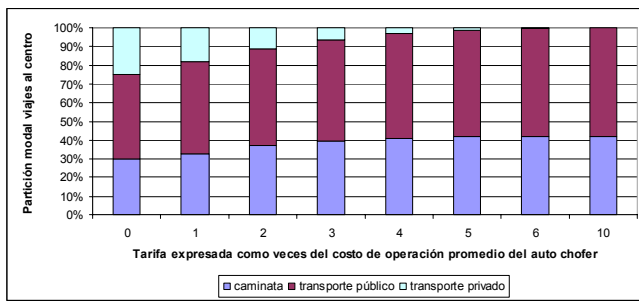


FIGURA 7: Partición Modal de Viajes al Centro según la Tarifa Aplicada

Los resultados son más pronunciados de lo esperado debido a que las tarifas usadas son altas si se comparan con el costo de viaje promedio del modo auto. Esto, acompañado a una elasticidad precio de la demanda para el modo auto de 0,34, mayor a la que se da en el contexto chileno (CIS, 1998a; CITRA LTDA, 1998; SUROESTE Consultores, 2000), explicaría las importantes variaciones en la partición modal.

Como conclusión, en ciudades de tamaño medio sin grandes problemas de congestión, medidas como la de tarificación vial pueden reportar modificaciones importantes en el sistema de transporte, aun con tarifas reducidas.

### 6.2 Cambio en la Asignación de Viajes

Se esperaba que con la tarificación de cordón del centro los flujos al interior de esta área disminuyeran y aumentarían en el anillo libre de pago. Sin embargo, cuando se aplica la tarifa de \$50, la más baja del experimento, se nota un ligero aumento en los flujos de algunos arcos al interior del centro. Esto se explicaría por disminuciones de tiempos de viaje por cambios en los tiempos de verde por disminución de flujo en los arcos perpendiculares. También por disminuciones en el tiempo de viaje en una ruta completa, que usa algunos arcos donde bajó el flujo, y puede causar que se carguen más arcos intermedios.

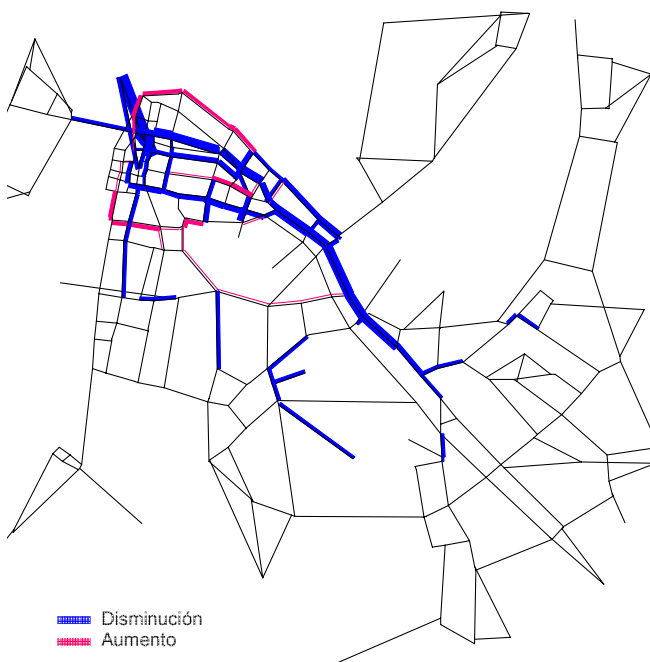


FIGURA 8: Cambios en la Asignación entre la Situación Base y Escenario con Tarifa de \$50

### 6.3 Índice de Rendimiento de la Red

Con la disminución en los flujos se mejoró la velocidad promedio tanto de los vehículos privados como de los vehículos de transporte público. Sin embargo, esta disminución no fue siempre creciente con la tarifa para el caso del transporte privado, dado que con los cambios de ruta y disminución de flujo sólo a partir de tarifas superiores a \$150 (3 veces el costo de operación promedio del auto) se comenzó a notar un descenso en la velocidad en el centro.

En concordancia con el aumento en la velocidad, se puede observar que el índice para el transporte público y privado disminuyó con la tarifa. Aunque esta disminución fue mayor en el transporte privado, lo cual es consecuente con las variaciones en las velocidades de los dos modos.

El caso de la caminata es distinto, ya que este índice está directamente relacionado con la distancia promedio del viaje. Con la tarificación de \$50 se produjo un cambio de viajes cortos al modo caminata, pero se van sumando cambios en los de mayor longitud a medida que aumenta la tarifa.

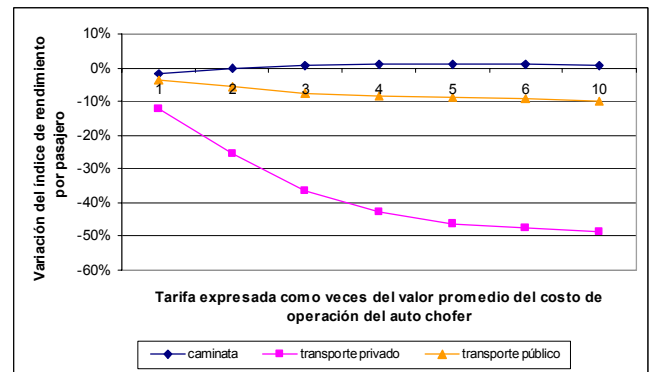


FIGURA 9: Diferencias de Índice de Rendimiento por Modo y Pasajero

Al observar el índice de rendimiento total el porcentaje de cambio estuvo más cercano al del transporte público, por su alta participación dentro de los modos disponibles y, además, por su alto valor en relación con los otros, casi 2 veces el IR del transporte privado y 50 veces el de la caminata.

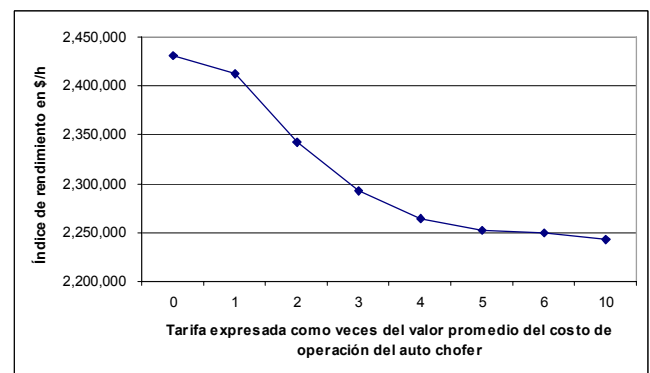


FIGURA 10: Diferencias de Índice de Rendimiento Total

## 7. COMENTARIOS

El objetivo de este artículo es mostrar la predicción de impactos de determinadas medidas de gestión de tránsito sobre la demanda de tráfico, utilizando como herramienta un modelo de carácter táctico (TRIPS). Se pudo establecer que, dada su flexibilidad, TRIPS resultó apropiado al permitir un buen detalle de la red y usar los resultados de costos generalizados para retroalimentar las diversas etapas del modelo de transporte. No obstante, para temas específicos de transporte público debe modificarse la forma en como se trata el tema de detenciones en paraderos, tal como se propone en este artículo.

En el caso de las calles sólo bus es esperable un cambio en la partición modal. Sin embargo, el cambio modal hacia el transporte público se produce con mayor intensidad en la caminata que en el transporte privado. Esto se explica debido a que una gran parte de los viajes no tiene al vehículo privado como modo disponible.

El índice de rendimiento por pasajero transportado para los modos caminata y transporte público disminuyen con el esquema de calles exclusivas. Por otro lado el índice de rendimiento por pasajero del transporte privado aumenta, pero no lo suficiente como para opacar los beneficios a los otros usuarios. Esto lleva a que el índice de rendimiento global mejore.

Es interesante ver que el área de influencia de la implantación de calles exclusivas, es decir, la parte de la red donde los flujos aumentan o disminuyen en forma notoria, no se limita a las calles más cercanas, si no que afecta a toda la red. Esto muestra que ésta no es una práctica de carácter local y que sus efectos deben considerarse en un área amplia.

Los efectos de la aplicación de reversibilidad de vías son menores. En la distribución y en la partición modal los cambios que se producen son mínimos. El efecto en la asignación de los viajes a la red es sólo perceptible para el eje y su paralelo y las diferencias en el índice de rendimiento resultan mínimas.

En general los resultados de la modelación de tarificación en una zona están en la línea de lo esperado. Con esta medida se ve una modificación dramática en la partición modal cuando se revisa sólo lo que ocurre con los viajes con destino a la zona centro. Cuando se revisan los viajes de toda la ciudad las modificaciones varían entre 10% y 20%, aun con la menor tarifa.

Estos resultados son más pronunciados de lo esperado debido a que las tarifas usadas, al compararlas con el costo de viaje promedio del modo auto chofer, parecen ser altas. Este hace, acompañado a una elasticidad precio de la demanda para el modo auto chofer de 0,34 –mayor al que se da en el contexto chileno–, explica las variaciones en la partición modal. Por lo tanto, en ciudades de tamaño medio sin grandes problemas de congestión, medidas como la de tarificación vial pueden reportar modificaciones importantes en el sistema de transporte, aun con tarifas bajas.

Al revisar lo que ocurre con la asignación de tráfico con tarificación vial, se esperaba que los flujos del área centro disminuyeran y aumentarían en el anillo libre de pago. Sin embargo, cuando se aplica la tarifa de \$50, la más baja del experimento, se nota un ligero aumento en los flujos de algunos arcos al interior del centro. Estos son producto de disminuciones de tiempos de viaje en otros arcos donde bajó el flujo.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido financiado por el Proyecto FAI Universidad de los Andes ICVI-002-07. Los autores agradecen también a la consultora Steer Davies Greave, Chile por otorgar tiempo a la publicación de este artículo.

## REFERENCIAS

- Cairns S., S Atkins y P. Goodwin (2002) Disappearing traffic? The story so far. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Municipal Engineer**. 151(1).
- Chaparro, I. (2002) Evaluación del impacto socio económico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá. El caso del sistema de transporte masivo, Transmilenio. División de recursos naturales e infraestructura, Unidad de transporte, CEPAL
- CIS (1998a) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de Osorno. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.
- CIS (1998b) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de Valdivia. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.
- CITILABS (2001) TRIPS (TRansport Improvement Planing System) Demo. www.citilabs.com. CITILABS Ltd, Surrey, UK.
- CITRA LTDA (1998) Estudio de Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Temuco, II° Etapa. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.
- Durán, N. (2009). Análisis de medidas de gestión de tránsito que afecten la demanda de tráfico. **Tesis** para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte, Universidad de Chile.
- Ferguson, E.T. (1991) Overview of Evaluation Methods with Applications to Transport Demand Management. **Transportation Research Record** 1321.
- Fernández, R. y Valenzuela E. (2003) Modelo para estimar la velocidad comercial del transporte público en Santiago de Chile. **Actas XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 247-256, Santiago.
- IHT (1997). Transport in the Urban Environment. The Institution of Highway & Transportation, London.
- INRO Consultant Inc. (1998) **EMME/2 User's Manual**.
- MIDEPLAN (2001) **Manual de operación** del modelo ESTRAUS, Versión 2.04. Ministerio de Planificación y Cooperación, Santiago, Chile.
- Montero, L., E. Codina, J. Barceló y P. Barceló (1998) Combining macroscopic and microscopic approaches for transportation planning and design of road networks". 19<sup>th</sup> Conference of the Australian Road Research Board. Proceedings of the 19<sup>th</sup> ARRB **Transport Research Conference**. Sidney
- Mori (2004) Central London congestion charge social impacts surveys 2002, 2003. **Research study conducted for Transport London**
- Siegel, J. y L. de Grange (2001) Utilización conjunta de modelos macro y microscópicos para el análisis de sistemas de transporte urbano. **Actas X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Concepción, 1-13.
- SUROESTE Consultores (2000) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Puerto Montt, I Etapa. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.
- Van Vliet, D. (1993) SATURN Version 8.4. A **User's Manual**–Universal Version. The Institute for Transport Studies, The University of Leeds.
- Victoria Transport Policy Institute (www.vtpi.org)
- Vincent, R., A. Mitchell and D.I. Robertson. (1980) User Guide to TRANSYT Version 8. **Transport and Road Research Laboratory**, Report LR 888, Crowthorne.
- Wallace, B, F. Mannering y G.S. Rutherford (1999) Evaluating Effects of Transportation Demand Management Strategies on Trip Generation by Using Poisson and Negative Binomial Regression. **Transportation Research Record** 1682.
- TSS–Transport Simulation Systems (2000) **GETRAM/AIMSUM2 User's Manual**.