
ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS DE METRO Y BUS EN UN CORREDOR SEGREGADO DE TRANSPORTE PÚBLICO

Louis de Grange C.

Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Universidad Diego Portales, Santiago de Chile.

FONO: (56-2) 676 8118 ; E-mail: louis.degrange@udp.cl

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de la estructura de costos para un corredor bi-direccional de transporte público, el cual puede ser atendido por Buses o por una Línea de Metro. El análisis se basa en comparar la suma de costos de provisión del servicio, más los costos en que incurren los usuarios, y más los costos correspondientes a externalidades relevantes (emisiones y accidentabilidad) que son posibles de cuantificar, tanto para tecnología de Bus y tecnología de Metro. La comparación se realiza para diferentes niveles de oferta y diferentes estructuras de demanda, considerando costos observados para Santiago.

Se concluye que para bajos niveles de oferta, el costo total unitario por pasajero transportado, desde una perspectiva social (operadores, usuarios y externalidades), es inferior en el caso del Bus. Sin embargo, cuando aumenta el nivel de producción, el costo por pasajero transportado tiende a ser menor en la alternativa Metro. La principal justificación de ello es que la congestión generada por las detenciones de los buses en paraderos, que para flujos superiores a 150 buses por hora genera efectos importantes tanto en los costos de provisionamiento como en los tiempos de viaje de los usuarios.

Palabras clave: *transporte público, deseconomías de escala, externalidades, costos modales*

ABSTRACT

This work present a comparative analysis of the costs structure for a bi-directional public transport corridor, which can be attended by Buses or Metro. Comparison consider the sum of provision costs, user costs and externalities. The comparison is realized for different production levels, considering observed costs for Santiago. We conclude that, for low production levels, the social cost by passenger is lowest in case of Buses. Nevertheless, when production level increases, the cost passenger tends to be lowest in Metro. The principal justification for this result is the congestion generated by the detentions of the buses both in whereabouts and in crossings semaforizados, that for flows upper than 150 buses per hour, it generates important effects on both provision costs and user costs.

Keywords: *public transport, diseconomies of scale, externalities, modal costs*

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo presentamos un análisis comparativo de la estructura de costos totales para un corredor bi-direccional de transporte público, el cual puede ser atendido por un sistema de Buses o por una Línea de Metro. El análisis se basa en comparar, tanto para un sistema de Buses como para una Línea de Metro, la suma de costos de provisión del servicio, más los costos en que incurren los usuarios, y más los costos correspondientes a externalidades (emisiones y accidentabilidad). La comparación se realiza para diferentes niveles de oferta, lo que permite determinar rangos de economías y deseconomías de escala desde la perspectiva del sistema en su conjunto.

El principal aporte de este trabajo es que incorpora explícitamente el fenómeno de congestión tanto en la vía como en los paraderos que puede afectar de manera importante a los Buses, cuando existen altos niveles de producción. Al incorporar el fenómeno de congestión, se generan deseconomías de escala en la operación de los Buses. La estructura analítica del modelo de costos de operación para transporte público (Bus y Metro) fue extraída de Fernández et al (2005), que se caracteriza por incorporar explícitamente el impacto de la congestión de los Buses en el tiempo de viaje. Por otra parte, los costos de los usuarios consideran el tiempo de viaje en vehículo, tiempo de acceso y egreso al paradero o estación, y el tiempo de espera; también incorporamos el efecto de la variabilidad del tiempo sobre el costo generalizado del viajero, de acuerdo a la metodología desarrollada por Shao et al (2006). La suma de los costos de provisión del servicio más los costos percibidos por los usuarios, sumando también algunas externalidades factibles de cuantificar como accidentes de tránsito (Alcoholado, 2006) y emisiones contaminantes (Cifuentes, 2001), proporcionan un costo total desde la perspectiva del sistema en su conjunto. Los parámetros considerados para el modelo de costos de provisión de servicios de Buses fueron actualizados a partir de un estudio de SECTRA, 2005. Para el caso del Metro, los costos de provisionamiento fueron proporcionados directamente por la empresa Metro S.A. y correspondieron a los costos reales correspondientes al proyecto de Metro a Maipú. Para capturar la congestión en el corredor segregado de buses se consideró un conjunto de microsimulaciones realizadas sobre corredores tipo que operarían en diversos ejes de Santiago de Chile (SECTRA, 2002). el modelo formulado no es un modelo de equilibrio oferta-demanda ni un modelo de optimización. El modelo presenta el costo total social de provisión de servicio para diferentes niveles de producción. Los resultados deben analizarse en este contexto

2. FORMULACIÓN DEL MODELO DE COSTOS DE PRIVISIONAMIENTO DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

2.1. Función de Gasto

De acuerdo a Fernández et al. (2005), la función de gasto del operador del servicios de transporte público (Bus o Metro en nuestro caso) es la siguiente:

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\frac{A}{Costo}}_{Administración} + \underbrace{p_m \cdot M}_{Costo Terminales} + \underbrace{p_b \cdot B}_{\substack{Costo \\ Adquisición Buses}} + \underbrace{p_h \cdot H}_{\substack{Costo \\ Mano de Obra \\ (conducción)}} + \underbrace{\sum_t C_b^{kt} \cdot B_t \cdot L_t \cdot N_t}_{\substack{Costo \\ Operación Buses}} + \underbrace{C_r \cdot \tau \cdot Y}_{\substack{Consumo \\ Ralentí}}
\end{aligned} \tag{1}$$

Las unidades consideradas son tal que el costo total definido en (1) queda expresado en (\$/día), que es fácil de expandir a (\$/mes). A continuación se define cada una de las variables y parámetros contenidos en la expresión (1).

- t*: número de períodos al día que opera el servicio.
- A*: costos de administración de la empresa (\$/día).
- B*: número de vehículos (Buses o Trenes) utilizados en la operación del servicio.
- p_m*: valor unitario de operación de un terminal con capacidad *M* (m²). Dado que existe una relación directa entre la capacidad o tamaño del terminal *M* y el tamaño de flota *B*, expresada como *M* = *m*·*B*, con *m* igual al número de vehículos que es capaz de satisfacer el terminal de capacidad *M*; luego, la unidad de *m* es (m²/ vehículo), y se obtiene finalmente que las unidades de *p_m·m* son (\$/día- vehículo) y las de *p_m* son (\$/día-m²).
- M*: capacidad del terminal (m²).
- p_b*: valor unitario de adquisición de un vehículo (Bus o Tren), expresado en términos de su depreciación. La unidad considerada será de (\$/día-vehículo).
- p_h*: valor unitario de la mano de obra de conducción de los vehículos. Tal como se explicó en el caso de la capacidad *M* de los terminales, también existe una relación directa entre el tamaño de flota *B* y el número de conductores utilizados (*H*). La relación en este caso se expresa como *H* = *ηB*, con *η* igual al número de conductores necesarios para operar una flota de tamaño *B*. Luego, las unidades de *η* son (hombre/vehículo) mientras que las de *p_h* son (\$/(hombre-día)).
- H*: número de conductores necesarios para operar una flota de *B* vehículos.
- C_b^{kt}*: costo unitario de operación por distancia recorrida de un vehículo de capacidad *k* (Bus o Tren, por ejemplo) durante el período *t*. Este costo incluye: el consumo de combustible o energía (sólo del vehículo en movimiento), consumo de lubricantes, consumo de neumáticos, y costos de mantenimiento y reparación periódicos realizadas sobre los vehículos. La unidad de este parámetro es (\$/km). Notar que vehículos de mayor capacidad presentan un mayor costo por kilómetro recorrido. En términos analíticos, esta característica puede expresarse como $\frac{\partial C_b^{kt}}{\partial k} > 0$.
- L*: distancia recorrida por los vehículos del servicio analizado en una vuelta (kilómetro/vuelta).
- N*: número de vueltas que realiza un vehículo durante un día (vuelta/día-vehículo).
- C_r*: costo del consumo en ralentí de los vehículos producto de las detenciones en paradero o estaciones (\$/hora).
- τ*: tiempo que tarda un pasajero en subir y bajar del vehículo (hora/pax).
- Y*: número de pasajeros que transporta la flota de *B* vehículos durante un día (pax/día).

La minimización de la función de gasto definida en (1), sujeto a la restricción de tecnología determinada por la función de producción, es posible obtener la función de costos. La función de producción para un servicio de transporte público de superficie se presenta en la siguiente sección.

2.2. Función de Producción

Las variables relevantes para el análisis, además de las expuestas en la sección 2.1, son las siguientes:

- y : número total de viajes demandados sobre el recorrido por unidad de tiempo; en nuestro caso son los pasajeros transportados durante una hora (pax/hora).
- T_v : tiempo de viaje de un ciclo de operación (ida y vuelta) sobre la ruta sin considerar las paradas intermedias (hora).
- t_c : tiempo total del ciclo del recorrido de un vehículo (horas).
- α : parámetro adimensional asociado a la dispersión de la demanda de pasajeros dentro del recorrido ($0 < \alpha \leq 1$).
- v : velocidad de operación los vehículos sobre la ruta, por lo que $v = \frac{L}{T_v}$ (km/hora).
- k : tamaño de embarque (pax/vehículo).
- f^o : frecuencia ofrecida por el operador del servicio (vehículo /hora).
- f^d : frecuencia demandada por los usuarios del servicio (vehículo /hora).

La frecuencia que es capaz de ofrecer un operador es $f^o = \frac{B}{t_c}$, donde el tiempo de ciclo $t_c = T_v + \frac{\tau y}{f^o}$ corresponde al tiempo de viaje en vehículo más el tiempo utilizado durante las paradas. Por otra parte, la frecuencia requerida para transportar los y pasajeros por hora corresponde a $f^d = \frac{\alpha y}{k}$. Para que exista equilibrio, debe cumplirse que $f^o = f^d$. Resolviendo $\frac{\alpha y}{k} = \frac{B}{t_c}$, además de utilizar la expresión $t_c = T_v + \frac{\tau y}{f^o}$, se obtiene $y = \frac{Bk}{(\alpha T_v + \tau k)}$. Esta expresión puede interpretarse como una relación básica de la función de producción del servicio. Ella expresa que la cantidad de pasajeros que es posible transportar por unidad de tiempo depende de: el tamaño de flota, la capacidad de los vehículos, la velocidad de operación de los vehículos y del largo promedio de viaje de los pasajeros, así como también del tiempo que éstos tardan en subir y bajar de los vehículos y la dispersión que presente la demanda en el trayecto (determinada por el parámetro α).

Por otra parte, y siguiendo a Fernández et al. (2005), existe una relación directa entre el tamaño de flota B , el número de conductores H y la capacidad de terminales M . Luego, la función de producción corresponde a una función de coeficientes fijos que está caracterizada por que la elasticidad de sustitución entre los diferentes factores es nula. En consecuencia, la utilización óptima de cada factor productivo se dará cuando $y = \frac{B}{a} = \frac{H}{b} = \frac{M}{c}$. Desde este punto de vista, el tamaño de flota B , la mano de obra H y la capacidad de terminales M son factores perfectamente complementarios. Debe notarse lo siguiente:

a : cantidad de buses necesaria para producir una unidad de y .

b : cantidad de mano de obra necesaria para producir una unidad de y .

c : unidades de capacidad de terminal necesarias para producir una unidad de y .

Finalmente, la función de producción de la firma que ofrece servicios de transporte público puede ser expresada de la siguiente manera:

$$y = \min \left\{ \frac{Bk}{\alpha T_v + k \tau}; \frac{Hk}{\eta(\alpha T_v + k \tau)}; \frac{Mk}{m(\alpha T_v + k \tau)} \right\}, \quad k \leq K \quad (2)$$

donde K representa la capacidad máxima de los buses, y se cumple que $\frac{1}{a} = \frac{Bk}{\alpha T_v + k \tau}$,

$\frac{1}{b} = \frac{Bk}{\eta(\alpha T_v + k \tau)}$, y $\frac{1}{c} = \frac{Bk}{m(\alpha T_v + k \tau)}$. No obstante, y dado que también existe dispersión de

demandas a lo largo del día (además de dispersión en el trayecto, representada por el parámetro α), la demanda total diaria de pasajeros sobre el recorrido se puede escribir como $Y = \sum_{t=1}^T y_t$,

donde T representa las horas totales de operación durante un día e y_t es la cantidad de pasajeros transportados durante el período t .

2.3. Función de Costos

La función de costo se obtiene de resolver el siguiente problema de optimización (las variables y parámetros fueron definidas anteriormente):

$$\min_{\{M, B, H\}} \quad G_{TOT} = A + p_m \cdot M + p_b \cdot B + p_h \cdot H \cdot N + C_b^k \cdot B \cdot L \cdot N + C_r \cdot t \cdot Y \quad (3)$$

$$s.a.: \quad y_t = \min \left\{ \frac{B_t k_t}{\alpha_t T_v^t + k_t \cdot \tau}; \frac{H_t k_t}{\eta(\alpha_t T_v^t + k_t \cdot \tau)}; \frac{M k_t}{m(\alpha_t T_v^t + k_t \cdot \tau)} \right\} \quad (4)$$

$$y_p = \frac{BK}{\alpha_p T_v^p + K \cdot \tau} \quad (5)$$

$$Y = \sum_{t=1}^T y_t \quad (6)$$

$$M = mB \quad (7)$$

$$H = \eta B \quad (8)$$

$$k_t \leq K \quad (9)$$

Es importante analizar la expresión (5), donde y_p es la cantidad de pasajeros en el período punta, T_v^p es el tiempo de viaje en el período punta, α_p es el grado de heterogeneidad de la demanda a lo largo del corredor en el período punta ($0 < \alpha_p \leq 1$). B representa la flota total, la cual queda determinada por los requerimientos del período punta ($t = p$), y por lo tanto $B_p = B$. La resolución del problema de optimización (3)-(9) entrega como resultado la función de costo siguiente:

$$C_{TOT}^{LP} = A + (p_m \cdot m + p_b + p_h \cdot \eta) \left(\frac{\alpha_p T_v^p}{K} + \tau \right) \cdot y_p + \sum_t \left(\frac{\alpha_t T_v^t}{k_t} + \tau \right) \cdot C_b^{kt} \cdot L_t \cdot N_t \cdot y_t + (C_r \cdot \tau + \pi) \cdot Y \quad (10)$$

Notar que en (10) aparece y_p ; esto refleja que los costos que eran fijos en el corto plazo (flota, conductores y terminales), en el largo plazo se ajustan a la cantidad de viajes en el período punta. También se observa que en los períodos punta, los vehículos son usados a su máxima tasa de embarque ($k_p = K; k_t \leq K, \forall t \neq p$).

El costo medio de largo plazo se obtiene directamente dividiendo (10) por Y :

$$C_{ME-TOT}^{LP} = \frac{A}{Y} + \frac{(p_b + m \cdot p_m + \eta \cdot p_h) \left(\frac{\alpha_p T_v^p}{K} + \tau \right) \cdot y_p}{Y} + \frac{\sum_t \left(\frac{\alpha_t T_v^t}{k_t} + \tau \right) \cdot C_b^{kt} \cdot L_t \cdot N_t \cdot y_t}{Y} + C_r \cdot \tau \quad (11)$$

El costo marginal se obtiene derivando (10) respecto a y_t . Notar que la congestión tanto en vías como en paraderos significa que T_v^t deja de ser constante, y se tendrá que $\frac{\partial T_v^t}{\partial y_t} > 0$ si existe congestión, y $\frac{\partial T_v^t}{\partial y_t} = 0$ si no existe congestión. Por lo tanto, el costo marginal de largo plazo es en ausencia de congestión es:

$$C_{MG}^{LP} = \left(\frac{\alpha_p T_v^p}{K} + \tau \right) \cdot (\tilde{p}_b + C_b^{kt} \cdot L_p \cdot N_p) + C_r \cdot \tau, \quad si : t = p \quad (12)$$

$$C_{MG}^{LP} = \left(\frac{\alpha_t T_v^t}{k_t} + \tau \right) \cdot C_b^{kt} \cdot L_t \cdot N_t + C_r \cdot \tau, \quad si : t \neq p \quad (13)$$

Análogamente, en presencia de congestión, el costo marginal de largo plazo se puede escribir de la siguiente forma:

$$C_{MG}^{LP} = \left[\frac{\alpha_p}{K} \left(T_V^p + y_p \frac{\partial T_V^p}{\partial y_p} \right) + \tau \right] \cdot \left(\tilde{p}_b + C_b^{kt} \cdot L_p \cdot N_p \right) + C_r \cdot \tau, \quad si : t = p \quad (14)$$

$$C_{MG}^{LP} = \left[\frac{\alpha_t}{k_t} \left(T_V^t + y_t \frac{\partial T_V^t}{\partial y_t} \right) + \tau \right] \cdot C_b^{kt} \cdot L_t \cdot N_t + C_r \cdot \tau, \quad si : t \neq p \quad (15)$$

2.4. Cuantificación de los Parámetros de la Función de Costos Para Bus y Metro

La cuantificación de los parámetros para el caso de los Buses se obtuvo del Estudio “Análisis Modernización Transporte Público, Etapa VI” (Sectra, 2005). Para el caso del Metro, se utilizó información correspondiente al nuevo proyecto de Metro a la comuna de Maipú, la cual fue proporcionada por la empresa Metro S.A.

Tabla 1
Parámetros Estimados Para Costos de Bus y Metro

PARÁMETRO	BUS	METRO
α (**)	1	1
k	140 (pax/bus)	1,267 (pax/tren)
F (*)	10,000,000 (\$US/km) ↓ 41,666.7 (\$US/km-mes)	52,000,000 (\$US/km) ↓ 216,666.7 (\$US/km-mes)
A	315,000 (\$US/mes)	315,000 (\$US/mes)
$p_m \cdot m$	600 (\$US/bus-mes)	6,000 (\$US/tren.-mes)
p_b (*)	170,000 (\$US/bus) ↓ 708.3 (\$US/bus-mes)	8,260,000 (\$US/tren) ↓ 34,416.7 (\$US/tren-mes)
$p_h \cdot \eta$	3,000 (\$US/bus-mes)	3,000 (\$US/tren-mes)
C_b^k	1.0 (\$US/bus-km)	8.8 (\$US/tren-km)
$C_r \cdot \tau$	0	0

(*): F es la inversión en infraestructura (corredor segregado o túnel de Metro) es efectuada por el Estado, por lo que no forma parte de los costos del operador ni de los usuarios. Para obtener el valor mensual de F y P_b se consideró una perpetuidad con una tasa de descuento del 8% anual. La perpetuidad se dividió por 12 para obtener un valor mensual.

(**): el valor de α dependerá de la estructura de demanda del corredor, y debiera ser sensibilizado.

2.5. Tiempos de Viaje en Vehículo y Efectos de la Congestión

En el caso del Metro, el tiempo de viaje en vehículo (T_v) puede ser considerado constante, y queda determinado por la longitud del recorrido (15 km en cada sentido) y la velocidad comercial (35 km/hr en nuestro caso). Sin embargo, en el caso de los Buses, la fuerte interacción que se genera entre ellos, principalmente en los paraderos, en los cruces semaforizados y al interior de la vía, produce una congestión que se traduce en aumentos en los tiempos medios de viaje cuando el flujo de Buses supera los 70 vehículos por hora, según se establece en un Estudio de SECTRA (2002).

En la Figura 1 se observa cómo varían los tiempos de viaje en un corredor segregado de Buses con paraderos de alta capacidad, conforme aumenta la frecuencia para los ejes viales analizados en el estudio de SECTRA (2002). En la Figura 2 se presentan las velocidades. El detalle de las características físicas del corredor y de sus vehículos, y los supuestos más relevantes de su operación, se pueden consultar en el estudio mencionado. El tiempo de viaje modelado en función del flujo de Buses en el corredor segregado se representa por la curva fucsia de la Figura 1. La expresión analítica que mejor se ajustó fue la siguiente:

$$T_v = \begin{cases} T_0 & \forall f \leq 70 \text{ buses/hora} \\ T_0 \cdot \exp(\beta \cdot f + \gamma \cdot f \cdot \ln(f)) & \forall f > 70 \text{ buses/hora} \end{cases} \quad (16)$$

donde T_0 es el tiempo a flujo libre en el corredor de Buses; β y γ son parámetros de calibración. Los resultados de la estimación econométrica del modelo (16) están en la Tabla 1:

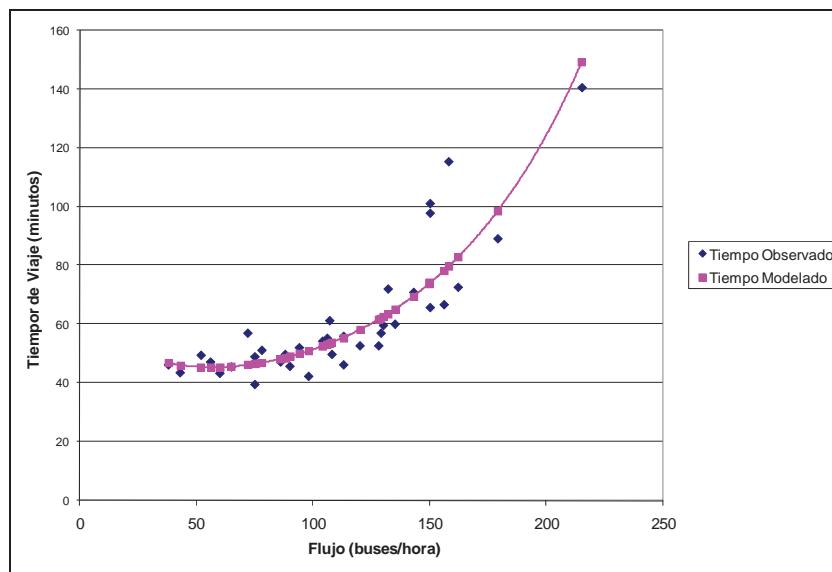


Figura 1
Tiempo de Viaje en Corredores Segregados: Modelado vs Observado

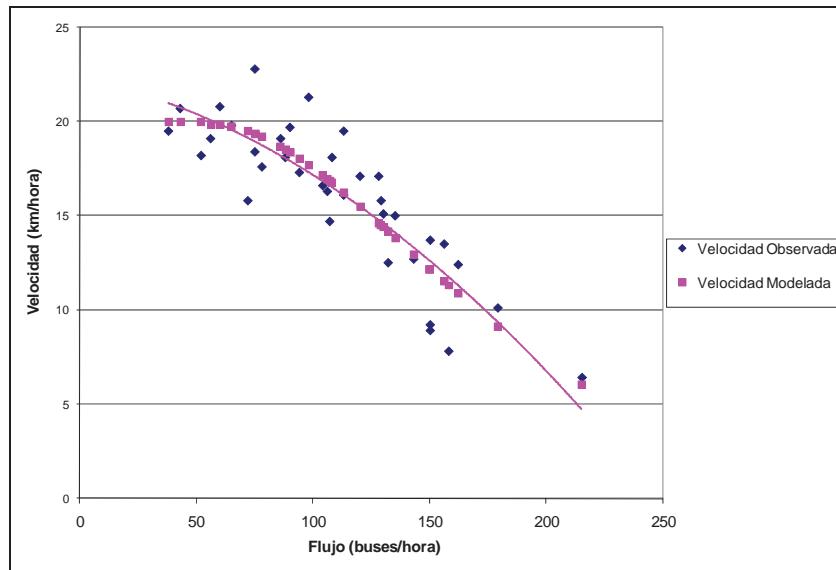


Figura 2
Velocidad de Viaje en Corredores Segregados: Modelado vs Observado

Tabla 2
Parámetros Modelo Flujo-Demora

Parámetro	Valor	Test-t
$\ln(T_0)$	4.34 (*)	16.24
β	-0.0466	-3.22
γ	0.00925	3.64
$R^2 = 0,79$		

(*): este parámetro dependerá de la velocidad a flujo libre que se defina, por lo que es modificado por distintos factores de ajuste de tal forma que, con un flujo menor a 70 buses por hora, el tiempo a flujo libre queda determinado por la distancia (15 km) y la velocidad a flujo libre.

3. COSTOS DE LOS USUARIOS DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

El costo medio en que incurre un usuario del sistema de transporte público, definido como la suma del gasto en tiempo de acceso, de espera y de viaje, se puede escribir de la siguiente forma (la tarifa no la consideraremos, pues es una transferencia entre los usuarios y los operadores):

$$C_{us} = \phi_a t_a + \phi_e t_e + \phi_v t_v \quad (17)$$

en donde:

- ϕ_a : valor del tiempo de acceso al paradero o estación.
- ϕ_e : valor del tiempo de espera al paradero o estación.
- ϕ_v : valor del tiempo de viaje.
- t_a : tiempo de acceso al paradero o estación.
- t_e : tiempo de espera al paradero o estación.
- t_v : tiempo de viaje en vehículo.

El tiempo de acceso a un paradero (t_a) es constante e independiente de la frecuencia del servicio o del nivel de demanda Y . Por lo tanto, y por simplicidad, se denominará al tiempo de acceso simplemente t_a . No obstante, como las estaciones de Metro están más distanciadas entre sí que las paradas de Buses, el tiempo de acceso al Metro será mayor que el tiempo de acceso al Bus (ver Tabla 1).

Respecto al tiempo de espera (t_e) supondremos que es igual a $t_e = \frac{1}{2f} = \frac{k}{2\alpha y}$. Esta expresión ha sido considerada intensamente en la literatura especializada por las economías de escala que genera en el transporte público (al aumentar la producción, se reducen los costos unitarios de los viajeros).

El tiempo de un viaje dentro del vehículo (t_v) dependerá de la velocidad de operación de los vehículos, la distancia recorrida por los usuarios y el tiempo utilizado en las paradas realizadas. El tiempo de viaje de los usuarios se puede escribir como la distancia recorrida, dividida por la velocidad promedio de operación de los buses. Considerando una distancia promedio l para los viajeros, y una velocidad de operación v_c promedio durante el ciclo, el tiempo de viaje de las personas será $t_v = \frac{l}{v_c} = \frac{l}{L/t_c} = \frac{lt_c}{L} = \frac{l}{L} \left(T_v + \frac{k\tau}{\alpha} \right)$. El término $\frac{l}{L} T_v$ representa el tiempo durante el viaje mismo, que dependerá del largo l del viaje del usuario y de la velocidad a la que circulan los vehículos. Si existe congestión, la velocidad disminuirá y el tiempo T_v aumentará. El término $\frac{l}{L} \frac{k\tau}{\alpha}$ representa el tiempo gastado en las paradas.

Otro aspecto importante que es necesario incorporar a la estimación del tiempo de viaje, específicamente para los pasajeros, corresponde a la variabilidad de los servicios. Si el usuario desea llegar a la hora al menos un 95% de las veces, deberá salir de su casa con una anticipación igual a (ver detalles en Shao et al, 2006):

$$T_{TOT} = t_a + t_e + t_v + z \cdot \sigma_v \quad (18)$$

donde T_{TOT} es el tiempo total de viaje que enfrenta el pasajero desde que sale de su hogar. El término $z \cdot \sigma_v$ corresponde al tiempo adicional que debe gastar el usuario si requiere llegar puntualmente a su destino una determinada proporción de las veces (Shao et al, 2006); z es el valor crítico de una distribución normal estándar (por ejemplo, $z = 1,96$ para un 95% de confiabilidad) y σ_v es la desviación estándar del tiempo de viaje en vehículo. A partir del tiempo medio de viaje t_v y de la desviación estándar σ_v , es posible obtener el coeficiente de variación (CV) como $CV = \frac{\sigma_v}{t_v}$. Luego, obtenemos que $\sigma_v = CV \cdot t_v$. Reemplazando esta última expresión dentro de la ecuación (18) obtenemos:

$$T_{TOT} = t_a + t_e + t_v \cdot (1 + z \cdot CV) \quad (19)$$

Una vez determinadas las relaciones entre las distintas componentes del tiempo que asignan los usuarios y las características de tamaño de flota y frecuencia de operación del servicio, se puede definir los costos totales en que incurren los Y usuarios para acceder al servicio durante un determinado período:

$$C_{us} = \phi_a t_a Y + \frac{\phi_e k}{2\alpha} + \left(\frac{\phi_v l T_v}{L} Y + \frac{\phi_v l t k}{L \alpha} Y \right) \cdot (1 + z \cdot CV) \quad (20)$$

Tabla 1
Imputación de Costos por Ítem al Modelo Analítico

COMPONENTES	PARÁMETRO	BUS	METRO
Valor del Tiempo	ϕ_a, ϕ_e, ϕ_v	1.0 (\$US/hora)	1.0 (\$US/hora)
Tiempo de Acceso	t_a	5 (min)	8 (min)
Coeficiente de Variación	CV	0.1	0.06
Largo Medio de Viaje	l	7.5 (km)	7.5 (km)

4. EXTERNALIDADES DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Consideramos dos tipos de externalidades en la provisión de servicios de transporte público: accidentes y contaminación. De acuerdo al anuario estadístico la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET, 2007), la cantidad de usuarios de buses involucradas en accidentes de tránsito Santiago de Chile fue de 3.339 personas. De estas, 87 fallecieron y 455 fueron catalogados como grave. En el Metro las cifras son considerablemente inferiores, y los fallecimientos registrados y catalogados como accidentes promedian sólo 1 por año. Es decir, los accidentes en el Metro son despreciables en comparación con los Buses.

En la tesis de Magíster de Alcoholado (2006), se obtiene que el costo asociado a la externalidad del accidente asociado al transporte público de la Región Metropolitana es de \$188 por bus-kilómetro, en moneda de Agosto de 2006. Reajustando por IPC, el valor actual sería un 13% superior, es decir, \$212,4 por bus-kilómetro, equivalente a US\$0,43 por bus-kilómetro.

Respecto a las emisiones de gases, y de acuerdo al estudio de Cifuentes (2001), el costo total asociado a la contaminación producto del material particulado fino ($\mu_{2,5}$) se puede estimar en US\$0,45 por bus-kilómetro. Respecto al material particulado grueso (μ_{10}), el costo por emisión asociado a los buses aumenta a US\$0,6 por bus-kilómetro. Metro, por su parte, no emite ningún tipo de contaminación atmosférica, por el hecho de utilizar energía eléctrica. Por otra parte, y si bien podría argumentarse que la generación de electricidad genera contaminación, dicha contaminación es comparativamente mucho menor que la generada por los Buses, y además se produce en lugares geográficos que no presentan el gran inconveniente de Santiago de ser una cuenca limitada por dos cadenas montañosas.

5. COMPARACIÓN DE COSTOS TOTALES DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

5.1. Síntesis y Definiciones Básicas Para la Comparación entre Bus y Metro

- i. El corredor base para el análisis corresponde a un eje de 15 km. de longitud.
- ii. El corredor segregado de Buses corresponde a un servicio de alto estándar, con paraderos de alta capacidad (dos andenes por paradero y dos sitios en cada andén).
- iii. La velocidad a flujo libre en el corredor es de 22,6 km/hora. Esta velocidad se obtuvo de simulaciones realizadas en un estudio de SECTRA (2002).
- iv. La velocidad comercial considerada para el servicio de Metro en el corredor de 15 km. fue de 35 km/hora.
- v. La oferta tanto de Buses como de Metro se define de acuerdo al siguiente plan operacional: 4 horas punta y 14 horas valle. La oferta en los períodos punta (2 horas en la mañana y 2 horas en la tarde) queda determinada por la demanda máxima (período de carga máxima en el día dentro del corredor). La oferta en los períodos valle corresponde a un 80% de la oferta en los períodos punta. Por lo tanto, basta definir un determinado nivel de demanda o carga en el período punta, para luego obtener el plan operacional del día completo.
- vi. Los costos fijos del Bus y del Metro son determinados para ser capaces de atender los períodos punta de operación. Durante el resto del día, ambos servicios operan sólo a costo marginal correspondiente a un 80% de la capacidad del período punta.
- vii. El servicio de Buses considera una frecuencia mínima de dos Buses por hora, con una capacidad de 140 pasajeros por Bus. En el caso del Metro, la frecuencia mínima es de dos trenes por hora, y el tamaño mínimo de los trenes es de 7 coches de 181 pasajeros de capacidad cada coche.
- viii. Se considera que un mes equivale a 25 días hábiles.

5.2. Costos Totales del Sistema: Operadores, Usuarios y Externalidades

Considerando la suma de costos de operación, usuarios y externalidades, se obtiene una curva de costos medios totales para usuarios de Bus y Metro, que se muestra en la Figura 1.

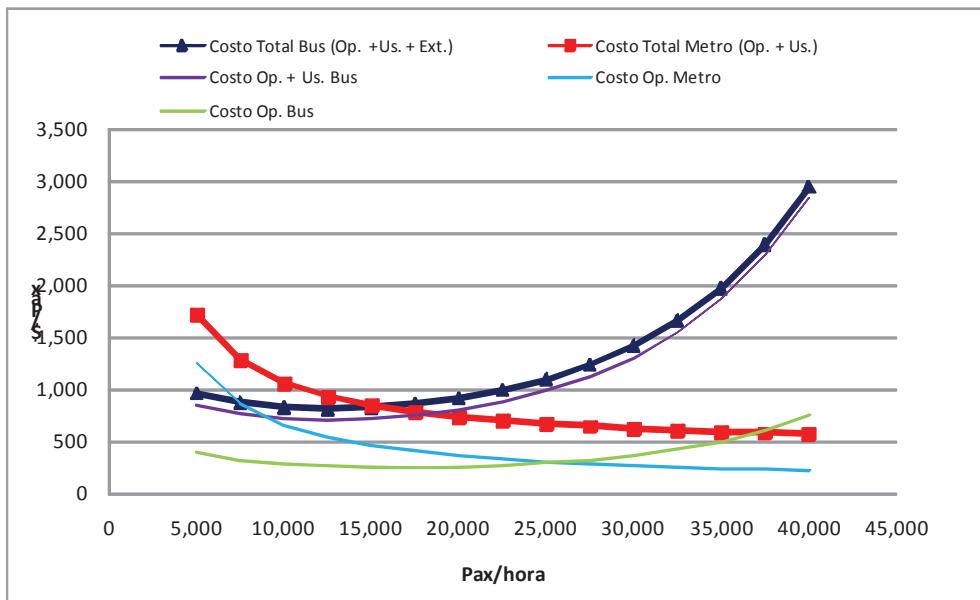


Figura 1
Costo de Operación por Pasajero Transportado en Bus y Metro, Según Nivel de Oferta

Por lo tanto, al incorporar en los costos los efectos adversos asociados a la emisión de material particulado grueso y fino de los Buses, además de los accidentes, obtenemos que el Metro supera al Bus a partir de una oferta de 16.000 pasajeros a la hora. Si se consideraran otras emisiones, como óxido de nitrógeno, azufre, ozono, monóxido de carbono, etc., este valor sería aún menor.

6. CONCLUSIONES

La principal conclusión obtenida es que para bajos niveles de oferta, el costo total unitario del sistema por pasajero transportado es inferior en el caso del Bus, pero cuando aumenta el nivel de producción, el costo por pasajero transportado tiende a ser menor en la alternativa Metro. Específicamente, para el caso estudiado con los antecedentes disponibles, estimamos que por sobre los 16.000 pasajeros por hora el costo total desde una perspectiva del sistema en su conjunto, la alternativa Metro es menos costosa que la alternativa Buses. La principal justificación corresponde a la congestión generada por las detenciones de los buses tanto en paraderos, que con flujos superiores a 150 buses por hora genera efectos importantes. Esta congestión aumenta significativamente los costos de operación, el tiempo de viaje de los usuarios y las externalidades.

Sin embargo, los resultados obtenidos pueden variar significativamente si se realizan ajustes respecto a la geometría del corredor segregado de Buses y de la línea de Metro, así como también de la existencia o no de servicios expresos. Del mismo modo, dependiendo del valor subjetivo del tiempo, del tiempo de detención en paraderos, estructuras de demanda espacial y temporal, y otros parámetros relevantes, los resultados también pueden variar de manera importante, variando los rangos para los cuales son válidas las conclusiones obtenidas. Todos estos análisis de sensibilidad formarán parte de un trabajo más extenso que ya está siendo elaborado por los autores.

REFERENCIAS

- Alcoholado, G. (2006). **Tarificación óptima de externalidades de accidentes**. Tesis de Magíster, Facultad de Ingeniería Civil, PUC.
- Cifuentes, L. A. (2001). Los Costos Sociales de la Contaminación y las Perspectivas del Diesel Limpio para la Región Metropolitana. **Seminario Internacional Ciudades Limpias y La Utilización de Combustibles en el Transporte Público de la Región**.
- CONASET (2007). **Anuario estadístico de accidentes de tránsito**. www.conaset.cl
- Fernández J.E., de Cea J., de Grange L. (2005) Production costs, congestion, scope and scale economies in urban bus transportation corridors. **Transportation Research**, 39A, 383-403.
- SECTRA, (2002). **Análisis Modernización Transporte Público**, IV Etapa, Orden de Trabajo N°13, Estimación de Velocidades Comerciales de Buses en Corredores Mediante Microsimulación.
- SECTRA, (2005). **Análisis Modernización Transporte Público**, VI Etapa, Estudio de la Estructura de Costos del Sistema de Transporte Público de Superficie de Santiago.
- Shao, H., Lam, W. H. K. and Tam, M. L. (2006) A reliability-based stochastic traffic assignment model for network with multiple user classes under uncertainty in demand. **Networks and Spatial Economics**, 6, 173-204.