

# **FUNCIONES DE CONGESTIÓN EN CORREDORES DE TRANSPORTE PÚBLICO**

Leonardo J. Basso, Universidad de Chile, lbasso@ing.uchile.cl  
Cristián E. Cortés, Universidad de Chile, ccortes@ing.uchile.cl  
Jaime Orrego, UOCT - Ministerio de Transporte, jorrego@uoct.cl

## **RESUMEN**

En este trabajo, se estudia el impacto de no considerar de manera explícita los detalles de las operaciones de detención en paraderos, además de particularidades de diseño y características propias de los servicios de transporte público, como parte de las metodologías actuales de evaluación y diseño de sistemas de transporte público urbano. En este trabajo, se propone utilizar la simulación microscópica de tráfico, incorporando explícitamente un módulo de transporte público diseñado para tratar de superar las limitaciones que se observan en los microsimuladores comerciales disponibles, en el sentido de representar mejor la realidad de las operaciones de transporte público bajo diferentes escenarios y condiciones de diseño. Se propone un conjunto de escenarios de simulación para corredores de transporte público. Los datos generados son utilizados para calibrar un modelo de regresión, cuyos resultados son contrastados en un escenario simplificado contra un enfoque que no considera congestión.

*Palabras claves: Transporte público, buses, corredor exclusivo, flujo-demora, funciones de congestión*

## **ABSTRACT**

In this work, we study the impact of not including explicitly the details in the bus stop operations, together with specify design issues as well as other features of the public transport services. As part of the current evaluation methodologies and design of urban public transport systems. In the present work, we propose the use of microscopic traffic simulation, incorporating explicitly a public transport module designed to model details and interactions of transit systems under different conditions and scenarios, feature currently not available in commercial softwares. We propose a set of simulation scenarios for different exclusive corridors for buses. The data generated are utilized to calibrate a regression model; the results are contrasted in a simplified scenario against an approach where congestion is not considered.

*Keywords: Public transport, buses exclusive corridor, congestion functions*

# 1. Introducción

La congestión de tráfico es un fenómeno que incide directamente en la calidad de vida de las personas; esto explica los esfuerzos de entidades planificadoras de transporte para enfrentar el problema con políticas de desincentivo al uso del automóvil en conjunto con mejoras considerables en el sistema de transporte público. Bajo esta perspectiva, cualquier iniciativa que busque afectar al sistema de transporte debe poder ser evaluada en forma rigurosa y confiable; lo anterior requiere un esfuerzo importante en la generación de herramientas de evaluación confiables y robustas.

Del análisis de varios modelos analíticos para tratar la congestión de tráfico, se observan especificaciones que no incorporan factores que diferencien el comportamiento entre autos privados y buses de transporte públicos, así como de su interacción en la vialidad. Este tema ha sido escasamente tratado en la literatura, con esfuerzos mucho menores que aquellos que se han hecho para capturar bien los efectos de congestión sólo entre automóviles. Por ejemplo, para el caso de vías sin detenciones y sólo con vehículos privados, Del Castillo and Benítez (1995) desarrollaron una especificación de la velocidad en función de la densidad incorporando un nuevo parámetro conocido como la velocidad de onda cinemática a densidad de embotellamiento, la cual les permitió obtener una formulación general del velocidad en función del flujo. Li (2008) amplió esta especificación general basándose en elasticidades de la velocidad con respecto a la densidad, a partir de una metodología general para encontrar ese tipo de funciones. En el caso particular del estudio de vías urbanas, Geroliminis and Daganzo (2008) encontraron evidencia empírica para apoyar la existencia de diagramas fundamentales de tráfico urbano. Siguiendo esta misma línea, Helbing (2009) deriva un diagrama fundamental del tráfico incorporando detención por intersecciones, lo que representa un avance importante en el desarrollo de una modelación urbana más consistente con la realidad.

La impresión general de la literatura en este ámbito es que no existen a la fecha, herramientas o funciones que capturen en forma real como las interacciones entre modos de naturaleza distinta, que generan efectos de congestión cruzada, afectan el nivel de servicio en los arcos de circulación urbana, el cual puede cuantificarse razonablemente por medio de la velocidad comercial; este fenómeno de congestión producto de la interacción depende fuertemente de la eficiencia en la operación de los sistemas de transporte público, y es por lo mismo sorprendente que no exista este reconocimiento a pesar de lo cruciales que parecen ser estas relaciones en el análisis y evaluación de proyectos de transporte urbano. En este artículo se desarrolla una herramienta de modelación de la operación de buses -usando como base el desarrollo de una plataforma de microsimulación de tráfico urbano que incorpora herramientas desarrolladas ad-hoc para simular fenómenos de transporte público- que permita comprender de mejor manera los efectos de la operación de los buses así como la influencia de distintas configuraciones del sistema, sobre la velocidad comercial en los arcos urbanos; la simulación incorpora operaciones complejas de detención en paraderos, además de particularidades de diseño y características propias de los servicios que se ofrecen, por lo cual con esta nueva herramienta es posible evaluar en forma consistente y realista el impacto de medidas de gestión en el ámbito del diseño de sistemas de transporte público y privado en áreas

urbanas. En este artículo se presenta la primera etapa del trabajo global, presentando relaciones analíticas de velocidad comercial en arcos como función de diversas variables que describen la operación detallada de los sistemas de buses operando sobre corredores exclusivos; en una siguiente etapa, se considerará el análisis del caso más genérico que incorpore en el simulador la relación e interacción del transporte público con el tráfico privado en forma explícita.

El artículo se organiza de la siguiente forma. En la siguiente sección se presenta el microsimulador de tráfico con todos sus detalles en la modulación de los buses; luego, se muestran los escenarios de simulación, y se presenta la calibración del modelo y algunos resultados interesantes. Se entrega posteriormente un ejemplo de este modelo comparado con una visión clásica microeconómica, cerrando el artículo con conclusiones y trabajo futuro.

## **2. Microsimulación de tráfico**

### **2.1. Módulo de Transporte Público**

Castillo et al. (2011) intenta dar recomendaciones para la construcción de corredores de transporte público para diferentes condiciones de oferta-demanda, usando microsimulación de tráfico. En aquel estudio se identificaron las falencias que tenía la utilización de algún software comercial para modelar transporte público, especialmente en condiciones de congestión de tráfico severas; debido a lo anterior, se construyó un módulo de transporte público especializado vía API conectado a un software comercial de amplio uso en el mundo . Esta adición buscaba mejorar en forma significativa las limitaciones de modelos tradicionales, mejoras que se pueden sintetizar en el desarrollo de tres aspectos fundamentales en la operación de los buses. El primero consistía en que los buses no tenían características físicas esenciales, específicas de cada tipo de bus, las que se agregaron asociadas a cada tipo de vehículo (por ejemplo, el número de puertas). El segundo aspecto consistía en que los pasajeros no se incorporaban explícitamente como una entidad concreta a la simulación; se representaban por medio de tasas de subida y bajada al momento de calcular tiempos fijos de subida o bajada; en este nuevo simulador, los pasajeros (pax en adelante) son agregados como agentes, lo que implica que cada pax individual tendrá asociado un set de características propias, como son los paraderos de origen y destino, conjunto de líneas comunes o atractivas, tiempos de entrada y salida y por cierto, demoras en paraderos. Por último, al considerar los pasajeros como agentes, se permite que existan modelos de interacción entre ellos y los vehículos, en particular, en los paraderos, lo que a su vez permite cuantificar estadísticas individuales en la evaluación o bien incorporar modelos de comportamiento. A modo de resumen se presenta las funcionalidades que entrega el microsimulador desarrollado por Castillo et al. (2011):

1. Definir una red vial con todos los detalles geométricos que esta requiere.
2. Un motor de microsimulación que provee los modelos de asignación, seguimiento vehicular y cambio de pista.

3. Un módulo API, programado en lenguaje C++, que permite intervenir el motor de simulación para agregar módulos casi a medida.
4. Una aplicación que permite correr muchas simulaciones en diferentes computadores a través de distintos *threads* de ejecución para procesos en paralelo .

A partir de lo anterior, en este trabajo se actualiza el módulo de transporte público desarrollado, agregando la funcionalidad de modelar la salida de los buses a través de un proceso estocástico, permitiendo así modelar a los pasajeros individualmente, obteniendo datos a nivel de usuario y asignando un proceso estocástico a sus llegadas al paradero. Además, se actualizó el software, para que por una parte, permitiera la entrada de vehículos privados y por otra modificara el tipo de resultados que se entregaban, para simplificar el tiempo de cálculo en la simulación. De forma ilustrativa, el módulo se divide en las siguientes partes: primero inicializa las redes, luego genera pasajeros y buses que van a simular, después de ello avanza en tiempo de simulación en paralelo con el microsimulador, e inmediatamente registra los resultados en una base de datos. En síntesis, se identifican las siguientes etapas:

1. Codificar la red de microsimulación identificando los paraderos y líneas.
2. Correr plugin recuperar\_datos\_corredor para recuperar datos, del modo que estén en el formato que necesita el módulo.
3. Codificar estos datos en un template llamado red\_corredor.sql.
4. Definir parámetros de simulación en archivo parametros.sql.
5. Generar base de datos con nombre de la red usando usando el template básico asociado al módulo para darle estructura y llenarlo después con los archivos sql generados en los pasos anteriores. En general, es posible modelar redes con diferentes características físicas u operacionales, Adicionalmente, y sin entrar en el detalle de las tablas incluidas en la base de datos, en esta etapa se debe llenar la tabla grupo de simulación que corresponda.
6. Utilizar script python para correr las simulaciones.
7. Finalmente todos los datos quedan guardados en la base de datos de la red.

## 2.2. Modelos TSP

Una de las grandes ventajas del modulo de transporte público es el modelo de tiempo de servicio de pasajeros (TSP), que estima cuanto tiempo estará detenido un bus en un paradero de transporte público, en función del número de pasajeros y las características físicas del bus. Se presenta la especificación utilizada en este trabajo:

$$\text{TSP} = \beta_0 + \text{máx} \left\{ (\beta_1 + \beta_{dum_9} \delta_{P_s > 9}) P_s; \beta_2 \frac{P_b}{p} + \right\} \quad (1)$$

La especificación supone que el bus opera en zona no paga, es decir, que todos los que suben los hacen por la primera puerta y los que bajan por el resto de ellas. Entonces, el tiempo de operación estará compuesto de un tiempo muerto  $\beta_0$  (que indica el tiempo de apertura de puertas y el tiempo

de desaceleración y aceleración del bus al llegar al paradero), más el máximo del tiempo entre los pasajeros que suben con los que bajan. Notar que adicionalmente el término de pasajeros que suben incluye una *dummy* por congestión, que se activa si los pasajeros que suban son más que 9. Este modelo se calibró con datos de Castillo et al. (2011); los resultados se detallan a continuación:

Cuadro 1: Calibración de los modelos

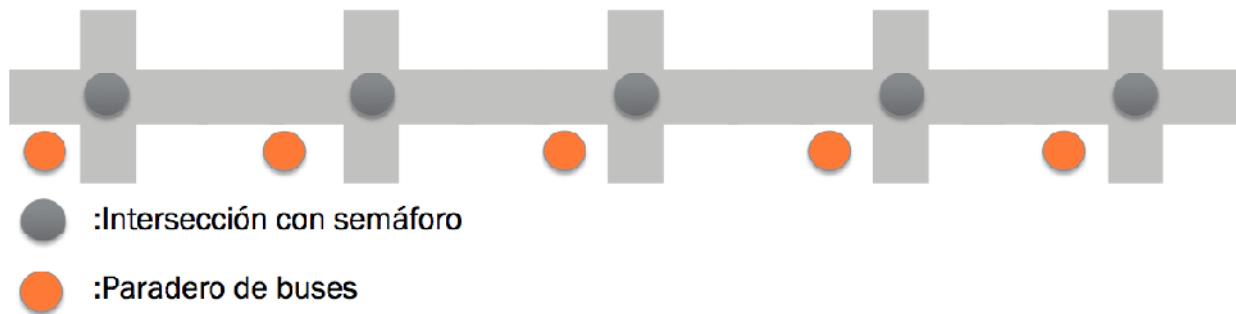
Parámetro	Modelo Actualizado
$R^2$	0.587
$\beta_0$	8.293(19.98)
$\beta_1$	1.215 (15.00)
$\beta_2$	1.949 (4.32)
$\beta_{dummy}$	0.810 (8.80)

Este modelo de transferencia de pasajeros es suficientemente robusto para el objetivo propuesto en esta investigación, y representa en forma muy razonable los tiempos reales de parada de los buses en paraderos producto de la interacción de los pasajeros y vehículos en paradas y terminales; esta especificación fue implementada como parte del módulo de transporte público, para desarrollar el experimento que se explica en detalle en la siguiente sección, cuyo objeto final es poder calibrar la relación analítica de la velocidad comercial versus variables relevantes de operación y diseño que se busca desarrollar en este artículo.

### 3. Escenarios de Simulación

Entendiendo que existe una estrecha relación entre todas las variables y que por lo mismo es difícil aislar los efectos de cada una, se hace necesario diseñar distintos tipos de experimentos que permitan comprender las distintas relaciones. Para ello, se plantea como base una red sencilla (como muestra la figura 1), en donde se definen diferentes escenarios para demanda, frecuencia de buses, tipos de buses, número de pistas, forma de pago, largo de intersección y posición del paradero. Se discutió en este punto acerca de la posibilidad de cambiar la distancia entre paraderos exclusivamente, pero debido a su estrecha relación con el largo de tramo entre intersecciones, se determinó que ambas variables se cambiarían en conjunto: posición del paradero con la longitud del arco, siendo la primera representada con una proporción del largo. Además, se variará la posición relativa del paradero en el arco; esto es, inmediatamente antes, inmediatamente después de la intersección o al medio del arco. En cuanto a los escenarios se variarán de dos maneras: por una parte diferenciado la red codificada en el microsimulador, es decir, largo de intersecciones, y por otro variando parámetros en cada escenario simulado; en particular, demanda de pasajeros, posición del paradero, frecuencia de los buses, tipo de bus y forma de pago. Esto parámetros se simularán todos contra todos, definiendo la cantidad de puntos por combinación, haciendo diez réplicas por escenario, número que se determinó a través de pruebas preliminares para definir el mínimo de repeticiones que se necesitaba para obtener resultados robustos.

Figura 1: Esquema de red base



En cuanto a la indicación de los parámetros, se pondrán de dos formas, primero la demanda y la frecuencia, con un máximo y un mínimo, indicando la cantidad de puntos entre tales cotas en los cuales se dividirá el tramo resultante, asimilando una cierta variable continua y segundo, para todas las otras que resultan ser variables "discretas" se considera sus posibles valores; para un detalle de estas indicaciones, ver el detalle en cuadros 2 y 3.

Cuadro 2: Parámetros del grupo de simulaciones: variables continuas

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Número de puntos
Pax/Paradero	100	2000	10
Flujo buses	10	120	10

Cuadro 3: Parámetros del grupo de simulaciones: variables discretas

Parámetro	#1	#2	#3
Ciclos	60	120	-
Paraderos	Inmediatamente después (d)	Inmediatamente antes (a)	Al medio (m)
Largo de arco	150 (Corredor1)	250 (Corredor2)	300 (Corredor3)
Tipo de bus	Chico (2 Puertas)	Grande (3 Puertas)	Articulado (4 Puertas)
Forma de pago	Zona Paga	Zona No Paga	-

De lo anterior, se contabilizan 10.800 escenarios por simular con 10 repeticiones para cada caso. En la siguiente sección se presenta el detalle de la calibración del modelo, así como algunos resultados interesantes de relaciones modeladas entre velocidad comercial versus demanda y oferta (frecuencia).

## 4. Resultados y calibración de modelo

Para efectos del análisis, se decide graficar todos los datos obtenidos en la simulación, los cuales corresponden a la velocidad comercial versus demanda de pasajeros en azul, así como frecuencia en rojo. Se presentan los tres escenarios de longitud de tramo, correspondientes a 150, 250 y 300 metros; el resto de las variables fueron agregadas en la representación, cuales son posición relativa de los paraderos, ciclo de los semáforos y tamaño de los buses. Es importante notar que la demanda en este caso da cuenta de la suma de los pasajeros que suben y bajan; acá la simulación genera demanda uniforme, por lo que estos datos son prácticamente iguales.

Figura 2: Velocidad comercial vs Demanda/Frecuencia [C1ZNPC60]

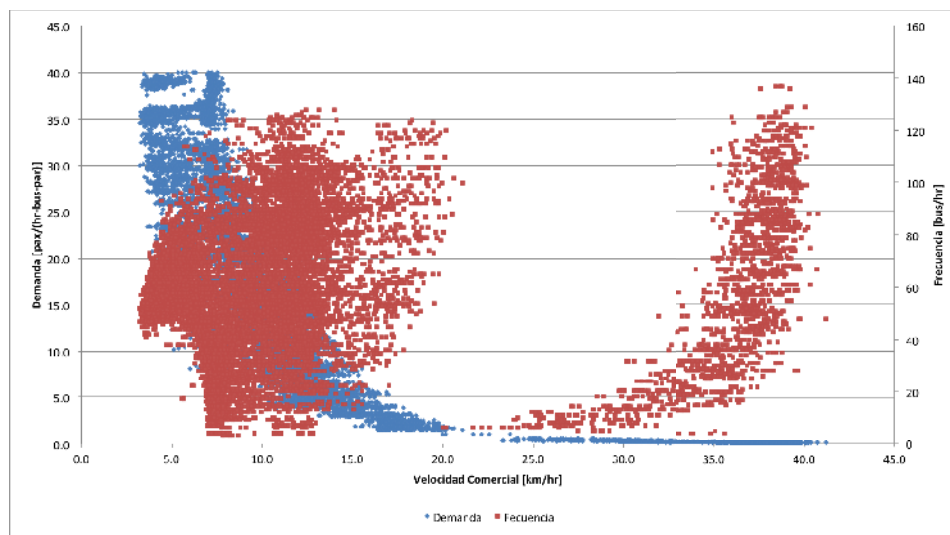


Figura 3: Velocidad comercial vs Demanda/Frecuencia [C1ZNPC60]

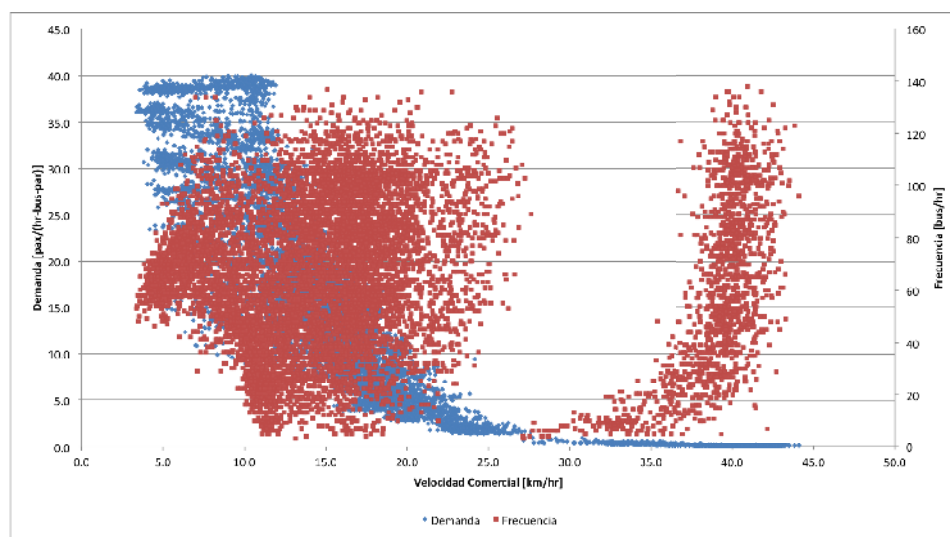
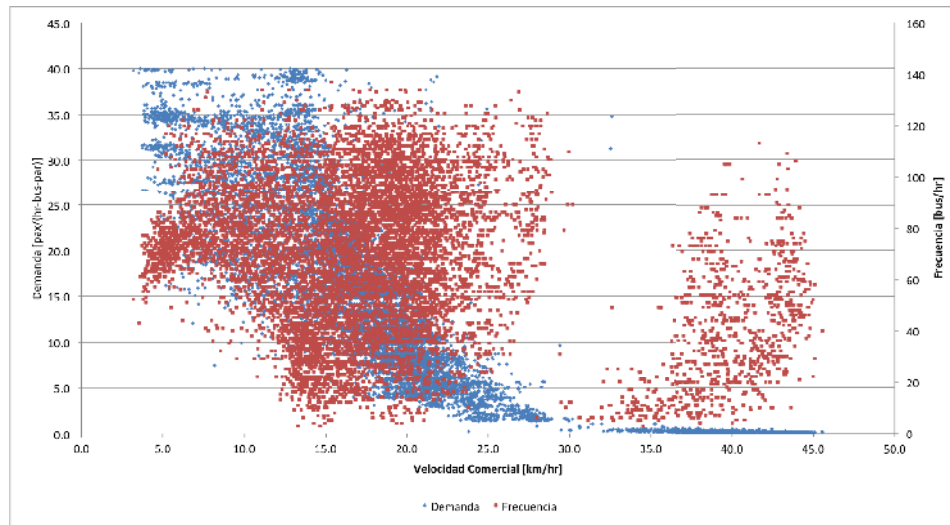


Figura 4: Velocidad comercial vs Demanda/Frecuencia [C1ZNPC60]



De los gráficos se observan patrones bastante similares entre un caso y otro. Primero se nota en todos los gráficos que existen dos regímenes claramente diferenciables. El primero al lado derecho, que no es congestionado notando las velocidades altas independientes de la frecuencia de los buses, pero dependiente de demandas bajas. Esto induce a la hipótesis de que no existiría congestión vehicular en los corredores si no que solamente congestión en los paraderos debido al incremento en el tiempo por la demanda de pasajeros, o simplemente debido a que más pasajeros abordan. El segundo caso, congestionado, corresponde al lado izquierdo donde existen velocidades menores para diferentes tramos de frecuencia y demanda.

#### 4.1. Modelo

A partir de este análisis gráfico se propone formular un modelo de regresión lineal múltiple que incorpore estos efectos sobre el modelo de velocidad.

$$V_{com} = \beta_0 + \beta_1 f + \beta_2 pax f + \beta_3 pax + \beta_4 PR + \beta_5 (L - 150) + \beta_6 PR * L + \beta_7 (K - 40) + \beta_8 \frac{L}{C} \quad (2)$$

Para la generación de esta especificación se discutió en primer lugar la estrecha relación que existe entre la frecuencia y la demanda. Para eso se decidió, además de incluir parámetros a cada uno de sus valores, incluir el producto entre ambas variables. Además se incluyen como variable explicativa la capacidad de los buses de manera continua. El ciclo se incluye dividiendo al largo, donde el largo del tramo sería la variable explicativa de la forma en que se dispersan los flujos de una intersección a la siguiente, asimilando de cierta forma la coordinación del semáforo. Por último la posición relativa, en el análisis por largo de tramo, mostró tener un efecto negativo en la velocidad cuando el largo de tramo es corto y positivo cuando este es largo; por ello se incorporó del siguiente modo  $PR(\beta_4 - \beta_6 * L)$ . El cuadro 4 presenta los resultados de la calibración.



Cuadro 4: Escenario para corredor de tramos de 150, 250 y 300 metros con ZNP y ciclo 60-120

Parámetro	Modelo 1
$R^2$	0.901
$\beta_0$	15.906
$\beta_1$	0.005 (6.52)
$\beta_2$	-0.004 (93.76)
$\beta_3$	-0.188 (-73.79)
$\beta_4$	-1.981 (-13.21)
$\beta_5$	0.035 (85.03)
$\beta_6$	0.007 (11.66)
$\beta_7$	-0.010 (-42.26)
$\beta_8$	0.603 (61.78)

## 5. Modelo de velocidad, un ejemplo microeconómico

Para el siguiente análisis se plantea agregar el modelo de velocidad antes calibrado al enfoque Jansson (1980). Este enfoque plantea optimizar el bienestar social, entendiendo este como el gasto económico de los operadores más el gasto en tiempo de los usuarios, a través de la frecuencia y la capacidad de los buses. El modelo físico propuesto por Jansson (1980) y Jansson (1984), establece que existe una demanda  $Y$  de pasajeros por hora distribuidos homogéneamente en un tramo de vía de largo  $L_r$ . Se defineo primero el tiempo de ciclo como:

$$t_c = T + t * \frac{Y}{f} \quad (3)$$

donde  $t$  es el tiempo de subida y bajada de los pasajeros incluyendo los tiempos muertos de detención y  $T$  es el tiempo de circulación del bus cuando este no está detenido. Además,

$$\frac{Y}{f} \quad (4)$$

corresponde al número de pasajeros que se suben a un bus en cada ciclo. Utilizando este término se puede obtener el tamaño de flota multiplicándolo por la frecuencia  $f$

$$ft_c = Tf + tY = B \quad (5)$$

De acá, Jansson propuso una forma para calcular el gasto de los operadores por hora como:

$$GO = B(C_0 + C_1K) \quad (6)$$

$$GO = (Tf + tY)(C_0 + C_1K) \quad (7)$$

Respecto del gasto de los usuarios de sistema, se cuantifica por medio de su tiempo de espera y su tiempo de viaje arriba del bus.

$$GU = P_w \frac{Y}{2f} + P_v \frac{l}{L_r} t_c Y \quad (8)$$

Con esto obtenemos el gasto total del sistema,

$$GT = (Tf + tY)(C_0 + C_1K) + P_w \frac{Y}{2f} + P_v \frac{l}{L_r} t_c Y \quad (9)$$

Se optimiza suponiendo igualdad entre capacidad  $K$  y ocupación  $\frac{Yl}{Lf}$ , de donde resulta la conocida regla de la raíz cuadrada:

$$f^* = \sqrt{\frac{Y}{Tc_0} \left( \frac{1}{2} P_w + tY \frac{l}{L_r} (P_v + C_1) \right)} \quad (10)$$

$$K^* = \frac{l}{L} \sqrt{Tc_0 Y \left( \frac{1}{2} P_w + tY \frac{l}{L_r} (P_v + C_1) \right)^{-1}} \quad (11)$$

Para efectos de comparar este desarrollo bastante tradicional con el modelo propuesto y calibrado en este trabajo, se debe encontrar los pasajeros de la función de congestión, que son los pasajeros por paradero y bus, en los términos de la demanda que utiliza la versión de Jansson, donde se asume una densidad de pasajeros lineal en un tramo determinado  $L_r$ . Entonces, es posible computar

$$Pax_t = \frac{2LY}{fL_r} \quad (12)$$

Luego, a partir del mismo enfoque microeconómico presentado, pero ahora tomando en consideración la función de congestión, el gasto total queda como:

$$GT = \frac{L_r f (C_0 + C_1 K)}{\beta + \beta_1 f + \beta_3 \frac{2YS}{fL_r[m]} + \beta_7 (K - 40)} + \frac{P_w Y}{2f} + \frac{P_v l}{\beta + \beta_1 f + \beta_3 \frac{2LS}{fL_r[m]} + \beta_7 (K - 40)} \quad (13)$$

con

$$\beta = \beta_0 + \beta_2 \frac{YL}{L_r} + \beta_4 PR + \beta_5 (L - 150) + \beta_6 (L * PR) + \beta_8 \frac{L}{C} \quad (14)$$

Luego, se propone resolver el siguiente problema análogo

$$\text{Min}_{K,f} GT = \frac{L_r f (C_0 + C_1 K)}{\beta + \beta_1 f + \beta_3 \frac{2YL}{fL_r[m]} + \beta_7 (K - 40)} + \frac{P_w Y}{2f} + \frac{P_v l}{\beta + \beta_1 f + \beta_3 \frac{2YL}{fL_r[m]} + \beta_7 (K - 40)} \quad (15)$$

$$\text{s.a } k(f) = \frac{Yl}{L_r f} \leq K \quad (16)$$

Para su resolución se recurre al software Wolfram Mathematica; los valores a utilizar se presentan en el siguiente cuadro y están basados en Jara-Díaz and Gschwender (2009).

Cuadro 5: Datos utilizados

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$\beta_0$	15.906	$P_v$	1.48
$\beta_1$	0.005	$P_w$	4.44
$\beta_2$	-0.004	$C_1$	0.203
$\beta_3$	-0.188	$C_0$	10.65
$\beta_4$	-1.981	$t$	0.0014
$\beta_5$	0.035	$L$	[150,300]
$\beta_6$	0.007	$L_r$	[30,60]
$\beta_7$	-0.010	$l$	[5,10]
$\beta_8$	0.603	$Y$	[0,20.000]
$C$	[60,120]	PR	[0,1]

Debido a la naturaleza multivariable del problema, se utiliza para la presentación de los resultados la función Manipulate de Mathematica que permite modificar los resultados en función de un intervalo de posibles valores para los casos en que el valor está entre paréntesis en el cuadro 5. A continuación se presentan los gráficos de frecuencia óptima en función de la demanda con  $L$ ,  $l$ ,  $L_r$ ,  $C$  y PR variables y la función de capacidad como ocupación en relación a la demanda.

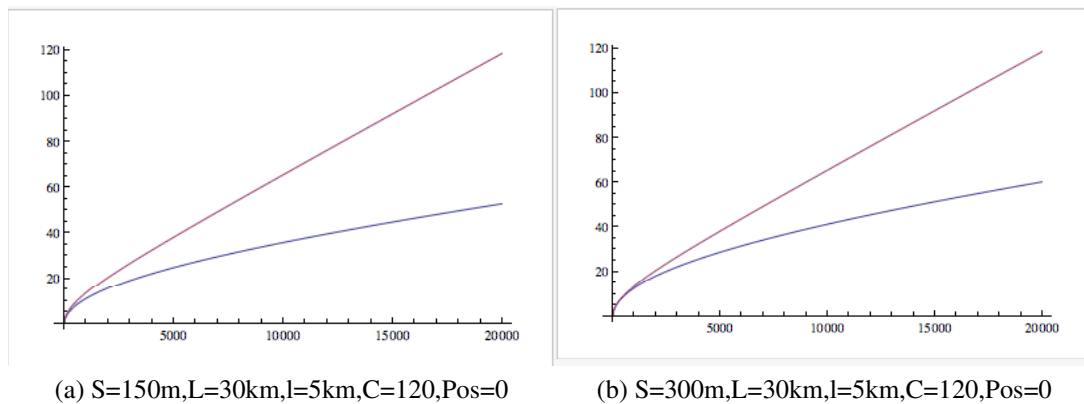


Figura 5: Frecuencia vs Demanda, Rojo:Jansson clásico y Azul:Jansson con modelo de velocidad

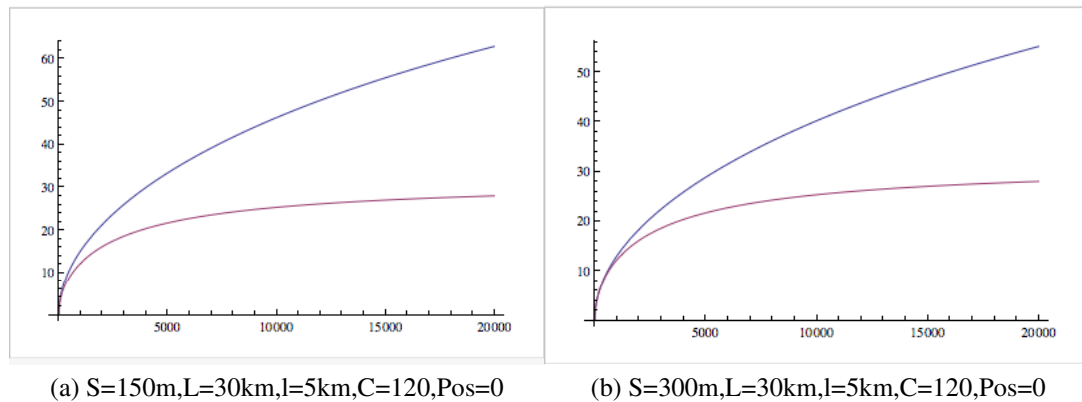


Figura 6: Capacidad vs Demanda, Rojo:Jansson clásico y Azul:Jansson con modelo de velocidad

En la figura 5 se observa como la frecuencia óptima está sobrestimada al no considerar un modelo de velocidad en la optimización. Esto lleva a pensar que la omisión de los factores incluidos en este trabajo podrían significar una frecuencia óptima más alta para los operadores. Al mismo tiempo, al tener mayor frecuencia, la capacidad de los buses, tal como lo muestra la figura 6, sería más baja que la óptima. Esto quiere decir que el diseño del servicio contaría con buses demasiado pequeños pero con frecuencias muy altas, con el consecuente gasto por parte de los operadores; lo anterior implicaría, asumiendo un diseño óptimo, mayores subsidios.

## 5.1. Conclusiones

Se planteó la carencia en la formulación de herramientas para evaluar consistentemente proyectos que involucraran tráfico de buses, en particular, la operación de paraderos. Para ello se implementó sobre un software de microsimulación de transporte público desarrollado en Castillo et al. (2011) un nuevo modelo TSP, que incorporara de manera simplificada, pero suficientemente precisa para este tipo de análisis, la congestión en zonas de parada y el efecto de la interacción de buses, vialidad y pasajeros en la operación y rendimiento del sistema de transporte. A partir de esta herramienta, se crearon y simuló diferentes escenarios de corredores exclusivos de transporte público, controlando entre ellos, la demanda de pasajeros por buses, la frecuencia de buses, el espaciamiento de paraderos y tramos entre intersecciones semaforizadas y los tipos de buses. Estas simulaciones generaron pseudodatos, difícilmente recuperables de situaciones reales, que se ocuparon en la producción de un modelo de velocidad para buses de transporte público, en base a todas las variables antes mencionadas. Finalmente se desarrolló un ejercicio simple al comparar, en un análisis microeconómico, el cálculo de la frecuencia óptima y capacidad óptima. De acá, se determinó, que ignorar los efectos en congestión, pueden provocar una sobrestimación en la frecuencia óptima subestimando así la capacidad de los buses. Esto propone la hipótesis que que no considerar los efectos de congestión en los operación de transporte público, puede provocar finalmente la decisión de tener un exceso de frecuencia de buses pequeños y por lo mismo de propiciar un exceso de gasto por los operadores, que a su vez desencadenarían un subsidio más grande.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Proyecto Fondecyt Chile 1100239 y al Instituto Milenio "Sistemas Complejos de Ingeniería" (ICM: P-05-004-F, CONICYT: 522 FBO16).

## Referencias

- E. Castillo, C.E. Cortés, R. Fuentes, C. Moya, and Rocco V. Análisis de la capacidad de corredores de transporte público mediante microsimulación. In *Actas del XV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Universidad Diego Portales, October 2011.
- J.M. Del Castillo and F.G. Benítez. On the functional form of the speed-density relationship. *Transportation Research B*, 29:373–406, 1995.
- N. Geroliminis and C.F. Daganzo. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research B*, 42:759–770, 2008.
- D. Helbing. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow. *European Physical Journal B*, 70(2):229–241, 2009.
- J.O. Jansson. A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Transport Economic policy*, (14):53–80, 1980.
- J.O. Jansson. *Transport System Optimization and Pricing*. John Wiley and Sons, 1984.
- S.R. Jara-Díaz and A. Gschwender. The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*, 36:65–75, 2009.
- M.Z.F. Li. A generic characterization of equilibrium speed-flow curves. *Transportation Science*, 42(2):220–235, 2008.