

USO DE UN MICROSIMULADOR DE TRAFICO PARA LA REPRESENTACION DE CORREDORES SEGREGADOS DE BUSES

Justin Siegel S.

Modelos Computacionales de Transporte - MCT Ltda.

Lota 2257, Of. 401, Santiago, CHILE.

FAX: (56-2) 234 1578;

e-mail: jsiegel@MCTsoft.com

Antonio Gschwender K.

SECTRA

Teatinos 950 Piso 16, Santiago, CHILE

FAX: (56-2) 696 6477;

e-mail: agschwender@sectra.cl

Louis de Grange C.

Fernández y de Cea Ingenieros Ltda.

Lota 2257, Of. 402, Santiago, CHILE

FAX: (56-2) 234 1578;

e-mail: ldegrang@FDCconsult.com

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra cómo a través del uso de un microsimulador de tráfico, es posible analizar con mayor detalle la operación del transporte público de buses e inferir los comportamientos y variables críticas necesarias para describir estos sistemas en el contexto de un modelo macro de planificación de transporte. En particular, se plantea el uso integrado del modelo micro GETRAM con el modelo macro de planificación de transporte ESTRAUS para el análisis de corredores segregados de buses. Utilizando el enfoque planteado, es posible complementar las ventajas que ambos niveles de modelación poseen.

Se presentan una serie de aplicaciones prácticas utilizando la metodología anterior. Específicamente, se analizaron los efectos de diferentes variables de diseño y operación de corredores exclusivos en las velocidades promedio de buses. Utilizando los resultados simulados fue posible construir funciones analíticas que relacionan el flujo de buses en un corredor con la velocidad promedio resultante y que fueron posteriormente incorporadas al modelo macro ESTRAUS, representando así de manera detallada la operación de diferentes tipos de corredores.

1. INTRODUCCION

Una adecuada representación de la operación del transporte público urbano es fundamental para analizar políticas y proyectos que involucran modificaciones en este sistema. Particularmente importante es estimar de forma adecuada las velocidades comerciales, pues éstas influyen fuertemente en los beneficios sociales de estos proyectos. Además, si se quiere optimizar la frecuencia de los servicios de buses, es fundamental conocer cómo varía la velocidad ante diferentes niveles de flujo. En este trabajo se muestra cómo a través del uso de un microsimulador de tráfico es posible analizar con mayor detalle la operación de buses urbanos e inferir los comportamientos y variables críticas necesarias para describir estos sistemas en un modelo macro de planificación de transporte. En particular, se plantea el uso integrado del modelo de microsimulación de tráfico GETRAM (TSS, 2002a) con el modelo macro de planificación de transporte ESTRAUS (MIDEPLAN, 2002), de manera de poder complementar las ventajas que ambos niveles de modelación poseen.

2. INTEGRACION MODELOS MICRO Y MACRO

En el momento de recurrir a un modelo para evaluar un determinado proyecto o política de transporte, es indispensable identificar los alcances que estos tendrán al igual que el nivel de detalle que se desea lograr en la modelación. En el caso del transporte público, y para efectos del presente trabajo, se consideran proyectos de infraestructura asociados a la construcción de vías segregadas o corredores de buses, y a políticas de gestión tendientes a reestructurar los servicios (trazados y frecuencias) de buses de Santiago. Este tipo de proyectos se define como de carácter estratégico, ya que su implementación no sólo afecta la elección de rutas (y/o recorridos de buses) de los viajeros en el sistema, sino que también puede afectar la decisión de elección de modo (partición modal), en especial entre modos de transporte público (e.g. bus y metro). Considerando estas necesidades, sólo un modelo macro, capaz de representar las elecciones de modo y ruta, puede ser utilizado. Sin embargo, este último tipo de modelo carece de la posibilidad de representar de manera explícita ciertos fenómenos tácticos a nivel de tráfico, como características geométricas de las vías, adelantamientos y bloqueos de buses en paraderos, e interacción con cruces semaforizados. Este último tipo de fenómenos pueden ser representados de manera precisa con un microsimulador de tráfico. Dado lo anterior, parece razonable aprovechar las ventajas que presenta cada enfoque de modelación e integrarlos de manera consistente.

El tema de la integración de diferentes niveles de modelación no es nuevo. En el caso de GETRAM, se ha desarrollado aplicaciones (Barceló et. al, 1998, 2000) para integrar este modelo con el modelo EMME/2 (INRO, 2002), incluso se ha desarrollado una interfaz especial en GETRAM para facilitar la comunicación entre estos modelos (TSS, 2002b). En el caso de ESTRAUS, también se ha desarrollado aplicaciones para aprovechar el detalle del modelo GETRAM e implementar sus resultados en ESTRAUS, en particular para el análisis de la operación de vías de acceso a autopistas urbanas (Siegel y de Grange, 2001). El objetivo de la integración planteada en este trabajo es poder aprovechar las ventajas de detalle que puede lograr un microsimulador de tráfico e incluir estos resultados en un modelo de planificación de transporte, capaz de representar redes de gran tamaño y responder interrogantes a nivel estratégico como la elección modal. Las aplicaciones que aquí se presentan son parte de estudios de SECTRA (2002, 2003) desarrollados por Fernández & de Cea Ingenieros.

3. ANALISIS DE VARIABLES DE DISEÑO Y OPERACION DE CORREDORES EXCLUSIVOS DE BUSES

3.1. Antecedentes Generales

Una caracterización adecuada de las velocidades comerciales de buses operando en corredores exclusivos es fundamental para evaluar proyectos que involucran la habilitación de estas vías en la ciudad y en particular en su aplicación conjunta con políticas de gestión que consideran reestructuración de los recorridos de buses y sus frecuencias.

En el primero de los estudios de SECTRA (2002) antes citados se analizó el efecto que diferentes variables de diseño y operación tienen sobre las velocidades comerciales de buses en corredores exclusivos. Lo anterior se llevó a cabo utilizando el microsimulador de tráfico GETRAM, con el cual se simularon los diferentes escenarios de diseño y operación. Los resultados obtenidos fueron utilizados posteriormente (SECTRA, 2003) en el modelo macro ESTRAUS de manera de representar de manera más afinada la operación de los buses en diferentes tipos de corredores. Antes de haber realizado este estudio, los corredores modelados en ESTRAUS consideraban una velocidad comercial fija que debía ser ingresada de manera exógena por el modelador. Sin embargo, con los resultados obtenidos con el microsimulador fue posible construir curvas flujo-velocidad, para relacionar la velocidad de los buses con su flujo respectivo en el corredor.

GETRAM es un simulador microscópico de tráfico que representa vehículo a vehículo las interacciones reales producidas entre ellos, tales como adelantamientos, cambios de pista, bloqueos de intersecciones, formación de colas, etc. Además, considera una representación detallada de las calles e intersecciones, considerando su geometría (curvatura, pendiente, largo y número de pistas, etc.), y la señalización presente (señales de prioridad, presencia de semáforos, etc.). En la Figura 1 se muestra la visualización de una simulación con GETRAM utilizando el módulo 3D.



Figura 1: Simulación Corredor Tipo GETRAM 3D

3.2. Supuestos de Diseño y Operación Corredores de Buses en GETRAM

Para analizar el efecto en GETRAM de cada una de las variables de diseño y operación, se construyeron corredores con los elementos que se muestran en la Figura 2.

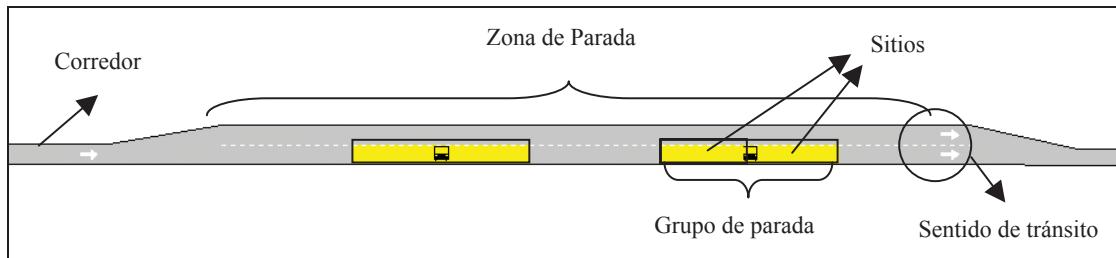


Figura 2: Elementos Corredor Buses

Como se observa, cada zona de parada se caracteriza por poseer diferentes grupos de parada, en los cuales se puede detener un número de buses dado por el número de sitios disponibles. Para todas las simulaciones que aquí se describen, a menos que se indique lo contrario, se consideraron las características que se indica en la Tabla 1 para paraderos, corredor y buses.

Tabla 1
Características Básicas Corredores y Buses en GETRAM

Paraderos	Distancia entre zonas de parada Distancia entre grupos Tiempo medio de parada	400 m 25 m 20 s
Corredor	Distancia entre semáforos Ciclo Semáforos Verde + amarillo para el corredor Velocidad máxima en corredor	800 m 100 s 60 s 60 km/hr
Buses	Longitud buses Tasa aceleración máxima Tasa de desaceleración máxima	18 m 1,2 m/s ² 1,5 m/s ²

Por otro lado, se supone un comportamiento “ordenado” de los buses en su circulación. Esto se traduce en que cada bus se detiene (para efectos de tomar o dejar pasajeros) sólo una vez en cada una de las zonas de parada, y lo hace en el grupo de parada que le corresponde. En cuanto a los tiempos de detención, éstos se suponen aleatorios y obtenidos partir de una distribución normal truncada considerando un tiempo medio con una desviación estándar igual a la mitad de la media. Se utilizó una programación fija para los semáforos en cada escenario, excepto en el ejercicio donde se modifica el tiempo de ciclo. Por otra parte, en cada escenario se simuló diferentes condiciones de aleatoriedad en los flujos para obtener un valor promedio para cada caso.

3.3. Simulaciones con GETRAM y Resultados

A continuación se describen los diferentes ejercicios desarrollados con GETRAM para el análisis de corredores de buses y los resultados obtenidos en cada caso. Para más detalles, ver SECTRA (2002).

- **Análisis de Diferente Número de Grupos por Parada y Sitios por Grupo**

Se analizó el efecto de considerar diferente número de grupos y sitios en cada una de las paradas. Para realizar las simulaciones se consideró un corredor de 1 pista con adelantamiento en las zonas de parada. Se modelaron corredores de 3, 4 y 5 grupos de 1 y 2 sitios. En la Figura 3 se muestra la relación flujo-velocidad obtenida de las simulaciones para un corredor con 3, 4 y 5 grupos de 1 sitios cada uno.

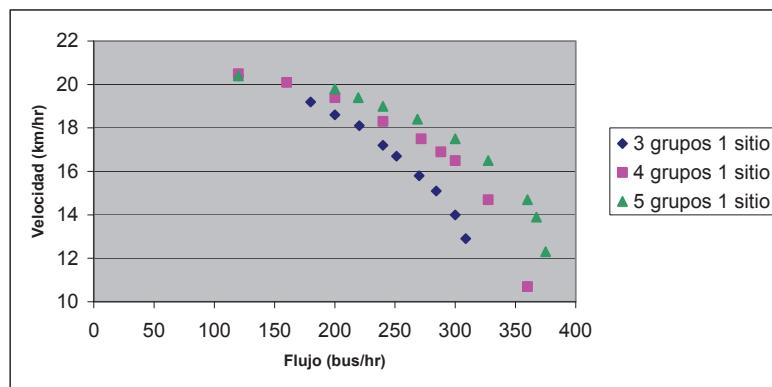


Figura 3: Velocidad Corredor para Diferente Número de Grupos de Paradas

Como resultado de esta tarea se concluyó que un mayor número de grupos de parada aumenta la velocidad y capacidad del corredor. Sin embargo, dado un número fijo de sitios, las simulaciones arrojan que resulta más eficiente (i.e. mayor velocidad y capacidad) utilizar menos grupos de más sitios que más grupos de menos sitios, ya que se limitan las interacciones entre los buses.

Es interesante contrastar este resultado con las recomendaciones que realizan Gibson y Fernández (1995) a partir de los resultados de capacidad obtenidos con el microsimulador de paraderos IRENE. Éstos indican que la capacidad de un paradero crece menos que proporcionalmente con el número de sitios, resultado que es consistente con lo obtenido con GETRAM. No obstante, asumen que al aumentar la cantidad de grupos la capacidad del paradero crece en forma proporcional, es decir, que no hay interacciones importantes en las zonas de parada entre buses que utilizan diferentes grupos (cada grupo funciona en forma independiente). De esto se desprende que en términos de la capacidad del paradero es más eficiente aumentar el número de grupos que incrementar la cantidad de sitios por grupo. ¿Por qué las simulaciones con GETRAM indican lo contrario? Porque en estas modelaciones los grupos no están funcionando en forma independiente. En efecto, en la Figura 3 se observa que al aumentar el número de grupos la capacidad no se incrementa proporcionalmente¹. Esto se debe seguramente a que la distancia que se consideró entre los grupos (25 m) no es suficiente para lograr una operación independiente en cada grupo, dada la longitud de los buses (18 m). Gibson y Fernández (1995) sugieren una distancia entre grupos equivalente a 3 ó 4 buses para lograr un funcionamiento independiente de estos grupos. Dado el fuerte impacto que esta dimensión tiene en los requerimientos de espacio para el diseño físico de los paraderos, surge aquí un aspecto que sería interesante estudiar a futuro: ¿cómo varía la interacción entre grupos para diferentes distancias entre ellos? ¿Qué

¹ Por ejemplo, en el caso de un sitio al pasar de 3 grupos a 4 grupos la capacidad aumenta de 310 a 360 bus/hr. Si el aumento fuese proporcional debería llegar a $310 * (4/3)$, es decir, 413 bus/hr.

separación mínima se requiere para que no haya interacciones relevantes? Estas interrogantes pueden ser enfrentadas con un modelo de microsimulación como GETRAM.

- **Análisis de Dos Pistas Continuas versus Pista de Adelantamiento Sólo en Paraderos**

Se comparó la operación de un corredor con dos pistas continuas versus uno con una pista pero con pista de adelantamiento en las paradas. En ambos casos se considera en los paraderos 2 grupos con 2 sitios cada uno. En la Figura 4 se muestran las relaciones flujo-velocidad resultantes de las simulaciones con GETRAM para cada uno de los corredores.

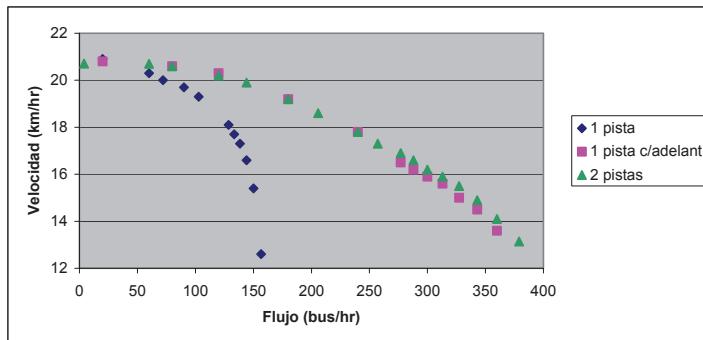


Figura 4: Velocidad Corredor 1 Pista, 1 Pista con Adelantamiento y 2 Pistas Continuas

Se observa que el aumento en capacidad es mínimo al pasar de 1 pista con adelantamiento a 2 pistas continuas (de 370 a 390 bus/hr). Esto confirma los resultados de análisis teóricos de capacidad de corredores de buses, los cuales indican que la congestión principal en un corredor (punto de capacidad) se produce en las zonas de parada y no en el corredor mismo (Fernández y Planzer, 2002). Llama la atención, sin embargo, el que prácticamente no haya diferencia en la velocidad para los diferentes niveles de flujo de buses.

Cabe preguntarse cómo varía este resultado si en el corredor circulan también buses expresos, es decir, vehículos que no se detienen en todos los paraderos. Para responder a esta pregunta, se realizó simulaciones similares a las anteriores, pero considerando que un tercio de los buses no se detiene en los paraderos. Nuevamente, los resultados indicaron que no hay diferencia entre el corredor de 1 pista con adelantamiento en paraderos y el corredor de 2 pistas continuas. Esto permite concluir que el beneficio de diseñar un corredor de 2 pistas continuas versus 1 pista con adelantamiento en paraderos no es considerable en términos de capacidad ni velocidad. Cabe destacar que esta conclusión es válida en el ámbito de la operación “ordenada” de los buses que se supuso en las microsimulaciones: cada bus se detiene sólo en el grupo que le corresponde y realiza sólo una detención. Además, los buses respetan el límite máximo de velocidad impuesto de 60 km/hr. Los resultados obtenidos dejan de ser válidos si no se respeta este comportamiento, por ejemplo, si los buses se detuvieran en lugares no habilitados como paradero, o si en el corredor los buses tuviese interferencias con otros vehículos (camiones estacionados, autos que viran a la derecha, etc.).

- **Análisis de Corredor de una Pista sin Adelantamiento**

En este ejercicio se analizó la operación de corredores de buses de una sola pista. Este tipo de corredor es el más limitado en cuanto a capacidad y velocidad debido que los buses detenidos en paraderos producen un bloqueo a todo el corredor (no existe forma de adelantar). Para las simulaciones se consideró 1 grupo de parada (pues no tiene sentido que haya más de un grupo si no hay posibilidades de adelantamiento). Al pasar de 1 sitio por zona de parada a 2 se observó, como era de esperar, un importante aumento en la capacidad (de 100 a 160 buses/hr). Estas capacidades se dan por supuesto a velocidades de operación muy deterioradas, como puede verse, para el caso de 2 sitios, en la Figura 4.

- **Efecto del Tiempo de Ciclo de los Semáforos**

En la literatura se reporta que los semáforos afectan la capacidad y velocidad de los corredores de buses en al menos tres aspectos: tiempo de ciclo, razón de verde efectivo y distancia entre paradero y semáforo aguas abajo (Gibson y Fernández, 1996; Fernández y Peñailillo, 2000). En el siguiente experimento se busca analizar aisladamente el efecto del tiempo de ciclo sobre la velocidad del corredor, por lo que se mantiene el resto de las variables fijas. Se analizó cómo influye el tiempo de ciclo de los semáforos en las velocidades promedio resultantes para los buses. Para realizar las simulaciones se consideró un corredor de 1 pista con adelantamiento y 2 grupos de 2 sitios en cada zona de parada. Como se indica en la Tabla 1, la distancia entre semáforos es de 800 m y la distancia entre paraderos de 400 m. Así, entre cada semáforo se ubicó 2 grupos de parada. Por esto, entre la salida del paradero y el semáforo aguas abajo se dan 2 distancias diferentes, para las cuales se definió los siguientes valores: 150 y 540 metros. En la Figura 5 se muestra las velocidades promedio resultantes en el corredor al variar el ciclo entre 80, 100 y 120 segundos (manteniendo un reparto de verde para el corredor de 60% del ciclo).

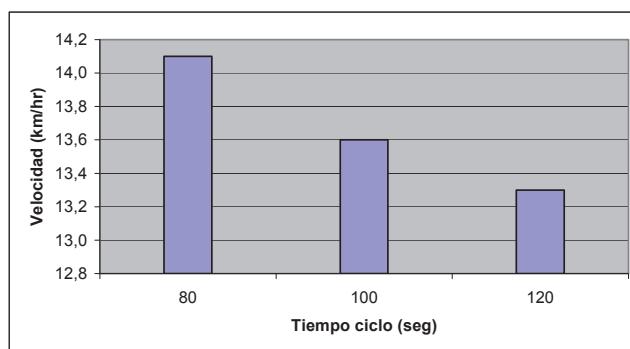


Figura 5: Velocidad Corredor para Diferentes Tiempos de Ciclo en Semáforos

A partir de los resultados de las simulaciones se pudo corroborar la regla de que ciclos menores de semáforos aumentan las velocidades promedio del corredor (minimizan demoras), aunque aumentan las paradas. También fue posible concluir que la disminución en las velocidades es marginalmente menor al aumentar el ciclo. Es interesante hacer notar que, dado que en los corredores de buses la restricción de capacidad principal se da en los paraderos y no en las intersecciones (como se comprobó al comparar un corredor de 1 pista con adelantamiento en paraderos versus un corredor de 2 pistas continuas), mayores tiempos de ciclo no implican una mejora en la operación del corredor. En efecto, la principal ventaja de aumentar el tiempo de

ciclo es que se incrementa la capacidad de la intersección al haber menos pérdidas de capacidad por el tiempo en que nadie está pasando. Lo contrario ocurre en el caso del transporte privado, donde las intersecciones sí son el punto crítico en cuanto a capacidad. Por esto, el “mejor” tiempo de ciclo para el transporte privado puede no coincidir con el “mejor” tiempo de ciclo para un corredor de buses.

- **Efecto de la Longitud de los Buses**

Se analizó cómo influye el tamaño de los buses en las velocidades y capacidades del corredor. Para esto se simuló con dos tipos de vehículos: buses “grandes” de 18 metros de longitud y capacidad para 150 pasajeros, y buses “pequeños” de 12 metros de largo en los que caben 80 personas. Se analizó además un tercer caso “mixto” en el que la mitad de los buses son pequeños y la otra mitad grandes. Para las simulaciones con GETRAM se consideró un corredor de 1 pista con adelantamiento y 2 grupos de 2 sitios por cada zona de parada². En la Figura 6 se muestra los resultados obtenidos de la simulación para las velocidades en relación al flujo de buses y flujo de pasajeros.

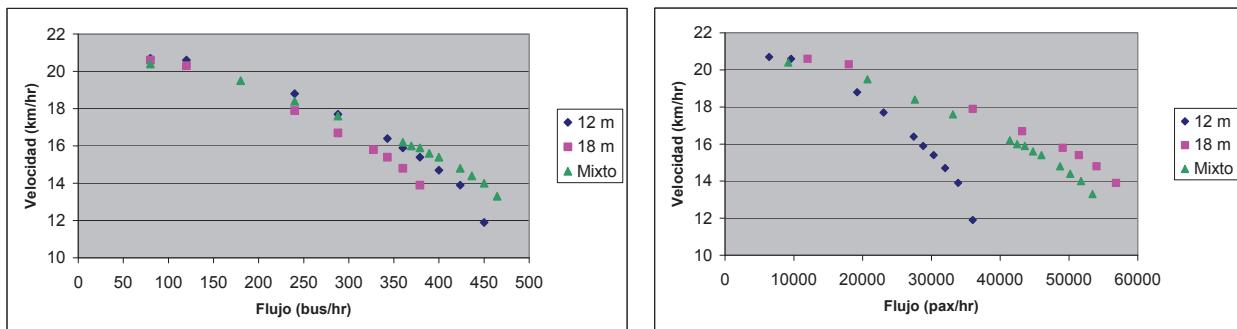


Figura 6: Velocidad Corredor para Diferentes Longitudes de Buses

Se observa que para niveles bajos de flujo, el largo de los buses no genera impactos relevantes en la velocidad. Como resultado, se pudo concluir que si bien buses más pequeños entregan una mayor capacidad a los corredores que buses grandes medido en buses/hr, en términos de pasajeros transportados por hora se obtiene una mayor capacidad al utilizar buses de mayor tamaño. Por otra parte, aun cuando el caso mixto puede atender más buses por parada, la capacidad en pasajeros resulta menor que el caso de buses de 18 metros.

- **Efecto del Tiempo de Parada**

Una de las variables más importantes al momento de definir la capacidad y operación de un corredor corresponde al tiempo de parada. Esta variable internaliza la demanda de pasajeros existente en cada uno de los paraderos. Para analizar su efecto, se realizaron diferentes ejercicios de simulación en los cuales se variaron los tiempos medios de parada de los buses. Para esto se consideró el corredor de 1 pista con adelantamiento, con 2 grupos de parada de 2 sitios cada uno. En la Figura 7 se muestran las importantes variaciones en las velocidades promedio de un

² En los casos donde todo los buses son del mismo tamaño, en los grupos de parada caben 2 buses. Sin embargo en el caso mixto, al permitir el espacio para 2 buses grandes, caben hasta 3 buses pequeños por lo que este caso presenta una mayor capacidad efectiva de atención.

corredor al variar los tiempos medios de parada (30, 20 y 10 segundos). Si bien es poco probable que todos los paraderos de un corredor presenten demandas suficientemente bajas como para que los tiempos de parada sean de 10 segundos en todos ellos, esta situación sí puede darse en algunos tramos de un corredor. Cabe destacar que de todos los análisis realizados, el tiempo de parada parece ser el que más fuertemente afecta la velocidad en el corredor, lo cual es consistente con lo reportado por Gibson *et al.* (1989) y Fernández y Valenzuela (2003).

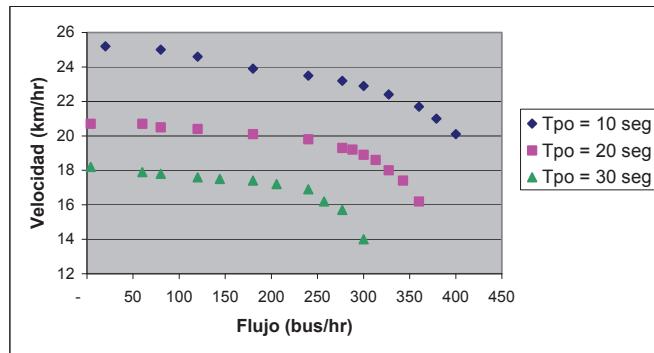


Figura 7: Velocidad Corredor para Diferentes Tiempos de Parada

4. USO DE RESULTADOS DE GETRAM EN ESTRAUS

De manera de representar en el modelo macro ESTRAUS la existencia de diferentes tipos de corredores de buses para Santiago, se utilizaron funciones flujo-demora para su caracterización. Estas funciones se obtuvieron a partir de los resultados de las simulaciones con GETRAM descritas en la sección anterior. En particular, se clasificó los corredores en 3 categorías: 1 pista, 1 pista con adelantamiento y 2 pistas continuas. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de las relaciones flujo velocidad obtenidas de las simulaciones con GETRAM. Utilizando los resultados de las simulaciones para cada tipo de corredor, se procedió a ajustar una función que relacionara la velocidad promedio en un corredor (v) con su flujo (f) y capacidad (K) utilizando la expresión que se muestra en la ecuación (1). Se buscó utilizar una función sencilla que capturará el efecto deseado y que se ajustara de manera adecuada a la forma funcional de las curvas simuladas. Para obtener los valores de los parámetros de la función (1) se consideró un término adicional en la formulación que corresponde al tiempo de parada de los buses en paraderos, como se muestra en la ecuación (2), donde $\alpha^* = \alpha \cdot Tp^\delta$ para la formulación (1) y Tp corresponde al tiempo medio de parada de los buses en los paraderos.

$$v = \alpha^* (K - f)^\beta \quad (1)$$

$$v = \alpha \cdot Tp^\delta \cdot (K - f)^\beta \quad (2)$$

Utilizando los resultados de las simulaciones con GETRAM, se determinaron valores para los parámetros α , β y δ para cada uno de los 3 tipos de corredores. Estos valores se presentan en la Tabla 2. Por su parte, en la Tabla 3 se muestra los valores obtenidos para la capacidad de los corredores anteriores, para diferente tiempos medios de parada.

Tabla 2
Parámetros de Ajuste por Tipo de Corredor (t-student)

	α	β	δ
Corredor 1 pista	11,518 (23,98)	0,161 (18,44)	-0,042 (1,37)
Corredor 1 pista c/adelantamiento	13,464 (23,89)	0,136 (13,99)	-0,120 (-3,50)
Corredor 2 pistas	13,360 (31,03)	0,149 (21,06)	-0,147 (-5,90)

Tabla 3
Capacidad por Tipo de Corredor

	K (bus/hr)	
	10 seg	20 seg
Corredor 1 pista	250	160
Corredor 1 pista c/adelantamiento	490	370
Corredor 2 pistas	520	390

Por otra parte, se calibró una función $Tp = f(demanda)$ que relaciona el tiempo de parada de un bus con el número total de pasajeros que suben y bajan durante la detención:

$$Tp = \theta_1 + \theta_2 \cdot \text{total_pax_suben_bajan} \quad (3)$$

Para calibrar esta función se recolectó información de subidas y bajadas de pasajeros y tiempos de parada de buses medidas en 4 ejes de Santiago (Pedro de Valdivia, Santo Domingo, Av. Matta y Sta. Raquel) en Punta Mañana durante el 2002. Si bien la formulación analítica es sencilla en comparación con otras presentes en la literatura (ver Cundill & Watts, 1973; Pretty & Russel, 1988; Gibson *et al*, 1989), mostró un adecuado nivel de ajuste para los fines que se buscaban en este estudio. Los resultados del ajuste logrado a partir de las 747 observaciones realizadas se muestran en la Tabla 4. Una vez calibrada esta última función, se utilizaron los resultados preliminares de demanda estimados por ESTRAUS para obtener valores para la variable Tp , con los que se determinaron las expresiones finales para las funciones (1) para cada tipo de corredor. El resumen de este proceso de integración GETRAM-ESTRAUS se presenta en el apéndice.

Tabla 4
Parámetros de Ajuste Tiempo de Parada

	θ_1 (seg)	θ_2 (seg/pax)	R^2
Valor (t-student)	0,81 (50,38)	1,22 (10,96)	0,84

Utilizando las funciones flujo-velocidad en ESTRAUS fue posible caracterizar de manera más precisa las velocidades en los corredores de buses operando con diferentes niveles de flujo. Esta representación detallada era particularmente importante considerando que el objetivo del estudio con ESTRAUS era analizar el diseño óptimo de servicios de buses (trazados y frecuencias) en la ciudad (SECTRA, 2003). El proceso de búsqueda para tal solución consideraba diferentes condiciones de frecuencias de buses en cada iteración, por lo que es de importancia que la velocidad asociada fuera consistente.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología en la que se utiliza de manera integrada un enfoque micro de modelación con un enfoque macro para representar la operación de servicios de buses urbanos operando en corredores exclusivos. Se presenta también un conjunto de aplicaciones prácticas de microsimulaciones de corredores exclusivos de buses con diferentes características físicas y operacionales. Utilizando el modelo de microsimulación de tráfico GETRAM se concluyó que el beneficio de diseñar un corredor de 2 pistas continuas versus 1 pista con adelantamiento en paraderos no es considerable en términos de capacidad ni velocidad cuando la circulación se realiza en forma ordenada. Además se analizó la operación de corredores con diverso número de grupos por parada y diferente número de sitios por grupo, lo que permitió detectar la necesidad de estudiar el efecto de la distancia entre los grupos sobre la operación del corredor, aspecto que puede ser enfrentado con un modelo de microsimulación como GETRAM. Por otra parte, se analizó el efecto del tiempo de parada, la longitud de los buses y el tiempo de ciclo de los semáforos sobre la operación del corredor de buses. Con respecto al tiempo de ciclo se pudo comprobar que, dado que en los corredores de buses la restricción de capacidad principal se da en los paraderos y no en las intersecciones, las mejores condiciones de operación se logran con tiempos de ciclo relativamente bajos (al contrario de lo que ocurre con los autos en condiciones de congestión), pues al disminuir las demoras en las intersecciones se consiguen mayores velocidades comerciales.

Integrando el uso de modelos micro y macro, es posible aprovechar las ventajas que cada uno de estos enfoques posee. En el caso de proyectos estratégicos, que por lo general requieren grandes áreas de modelación para capturar sus efectos (e.g. la ciudad de Santiago) y que tienen impactos al nivel de demanda de los usuarios (principalmente partición modal), es necesario recurrir a modelos de tipo macro como ESTRAUS. Sin embargo, este tipo de modelos no son capaces de internalizar ciertos detalles que pueden ser más relevantes dependiendo del tipo de proyecto. En el caso del estudio de SECTRA (2003) que dio origen a la utilización conjunta de GETRAM y ESTRAUS descrita en este trabajo, se analizó proyectos asociados a la optimización de trazados y frecuencias de buses, los cuales son muy sensibles a los niveles de servicio que sean supuestos. Antes de realizar ese estudio, ESTRAUS consideraba velocidades medias fijas para corredores de buses. Sin embargo, dado que el estudio incluía un proceso de optimización de frecuencias, era indispensable poder captar las relaciones entre los flujos de buses y sus velocidades resultantes. Esto último fue posible gracias a las simulaciones detalladas de GETRAM, que incorporaban las características de diseño y operación de los diferentes corredores tipo. Los resultados de estas modelaciones fueron incorporados a ESTRAUS a través de funciones analíticas calibradas con los datos simulados (curvas flujo-velocidad), lo cual permitió precisar de mejor manera los niveles de servicio en corredores y por ende en los requerimientos de flota resultantes.

REFERENCIAS

Barceló, J., P. Barceló, E. Codina, y L. Montero (1998) Combining macroscopic and microscopic approaches for transportation planning and design of road networks. **Proceedings of the 19th Australian Road Research Board Transport Research Conference**, Sidney.

Barceló, J. (2000) Putting the rush back in rush hour. **OR/MS Today, 27 (2)**, 36-41.

Cundill, M. A. y P. F. Watts (1973) Bus boarding and alighting times. **Transport and Road Research Laboratory Report LR 521**, TRRL, Crowthorne.

Fernández, R., y R. Peñailillo (2000) Un modelo microscópico de interacción entre paraderos de buses. **Actas del XI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, 235-248**. Gramado, Brasil, 19-23 Noviembre 2000.

Fernández, R., y R. Planzer (2002) On the capacity of bus transit systems. **Transport Reviews 22, 267-293**.

Fernández, R., y E. Valenzuela (2003) A model to predict bus commercial speed. **Traffic Engineering and Control 44(2), 67-71**.

Gibson, J., I. Baeza y L. Willumsen (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control, 30(6), 291-302**.

Gibson, J. y R. Fernández (1995) Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. **Apuntes de Ingeniería, 18(1), 35-50**. Ediciones Universidad Católica de Chile.

Gibson, J. y R. Fernández (1996) Efecto de una intersección semaforizada aguas abajo sobre la capacidad de un paradero de buses con sitios múltiples. **Apuntes de Ingeniería 19(4), 31-40**. Ediciones Universidad Católica de Chile.

INRO (2002). INRO Consultants Inc. **EMME/2 User's Manual**.

MIDEPLAN (2002) Ministerio de Planificación y Cooperación de Chile, **Manual de Usuario de ESTRAUS versión 3.0**.

Pretty, R. L. y D. J. Russel (1988) Bus boarding rates. **Australian Road Research, 18(3), 145-152**.

SECTRA (2002) Orden de trabajo N° 12 **Análisis Modernización de Transporte Público, IV Etapa**.

SECTRA (2003) **Análisis Modernización de Transporte Público, V Etapa**.

Siegel, J. y de Grange, L. (2001) Utilización conjunta de modelos macro y microscópicos para el análisis y modelación de sistemas de transporte urbano. **Actas X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 1-12**, Concepción.

TSS (2002a) Transport Simulation Systems, **AIMSUN User Manual, TEDI User Manual**.

TSS (2002b) Transport Simulation Systems, **GETRAM-EMME/2 Interface v4.1 User Manual**.

ANEXOS

Resumen Integración ESTRAUS-GETRAM Corredores de Buses

