

# Influencia del Espaciamiento de Paraderos en la Velocidad Comercial en Corredores de Transporte Público de Superficie

Alejandra Valencia V.  
Escuela de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
e-mail: alejandra.valencia@ucv.cl

Rodrigo Fernández A.  
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes  
e-mail: rfa@miuandes.cl

## RESUMEN

Este trabajo presenta la aplicación del criterio de espaciamiento óptimo en un modelo de simulación macroscópica de corredor segregado de transporte público de superficie (TPS) denominado CORBUS (CORredores de BUSes). Para este objetivo se realiza una descripción de algunos antecedentes de localización de paraderos y se presenta el modelo de espaciamiento. Para estudiar el espaciamiento óptimo en corredores se consideraron aquellas situaciones críticas de demanda y flujo de buses que fueron identificadas en estudios anteriores y que son sensibles al distanciamiento de paraderos. Los resultados indican en qué casos debe ser aplicado el modelo de espaciamiento y en cuáles considerar cotas máximas y mínimas de distancia entre paraderos.

## ABSTRACT

This paper presents the application of the optimal spacing criterion to a macroscopic simulation model of the segregated corridor for public surface transportation (PTS) known as CORBUS. To study optimal spacing in corridors, several scenarios already identified in previous works were considered. These contain both critical demand and bus flow scenarios sensitive to stop spacing. The results obtained allow the identification of those cases in which the spacing model should be applied. Moreover, they also show the cases to which both minimum and maximum stop spacing bounds have to be considered.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de modelos de diseño físico de infraestructura de transporte público de superficie (TPS) nos referimos a arquetipos que basan su análisis considerando aspectos de infraestructura en la modelación, como ubicación y tipo de paraderos, interacción de buses con semáforos, tipos de vías, etc. En el fondo, se trata de medidas para facilitar el flujo de transporte público en vías prioritarias o exclusivas. Se ha demostrado que la interacción entre los distintos elementos puede afectar la velocidad comercial (Fernández y Valenzuela, 2003) y se sabe que los paraderos y semáforos definen la capacidad de un sistema de TPS (Vuchic, 2005). Es decir, el cálculo de la capacidad en este tipo de dispositivos es más complejo que el número de vehículos que puede circular por un tramo de vía, multiplicado por la capacidad de los vehículos.

En este contexto, dos son los aspectos para el buen funcionamiento de paraderos. El primero corresponde a su operatividad, donde se han construido modelos detallados de operación en paraderos como permitir o no salir por la pista adyacente, existencia o no de congestión en el andén, el efecto de la ubicación de paraderos con distintos niveles de demanda, la progresión de los buses y los tiempos marginales de subida y bajada de los pasajeros, el efecto de estrategias de retención de buses (holding) sobre el tiempo de espera de los pasajeros, el impacto de la programación de semáforos sobre la operación de un paradero de buses, etc. Existen referencias en la literatura al respecto como: IRENE (Gibson et al, 1989), PASSION (Fernández, 2001) y MISTRANSIT (Burgos et al, 2005). El segundo aspecto es el espaciamiento de los paraderos y su ubicación. Para ello es necesaria la existencia de suficiente amplitud vial para los diseños requeridos, localización de acuerdo al entorno y la demanda, y un conveniente comportamiento de usuarios y operadores.

Este trabajo presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros incorporados en el espaciamiento óptimo de paraderos utilizado en un modelo de progresión de vehículos de transporte público de superficie desarrollado por Valencia (2008), presentado en el XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte (Valencia y Fernández, 2007) denominado CORBUS.

En el siguiente capítulo se especifican algunos criterios de localización de paraderos. El Capítulo 3 describe un modelo macroscópico de operación segregada de TPS, el capítulo 4 algunos experimentos y en el capítulo 5 resultados. Finalmente, se hacen comentarios sobre el trabajo realizado.

## 2. LOCALIZACIÓN DE PARADEROS

Diversos son los estudios que han propuesto rangos de distanciamiento entre paraderos. La mayoría de ellos determinados de acuerdo a estudios empíricos de uso de suelo, distancia de caminata, tipo de vías, etc. Estos criterios tienden a ser bastante similares entre sí, como los descritos por la Empresa Brasileira Dos Transportes Urbano (EBTU, 1982), el Manual de Transporte Público Canadiense (CUTA, 1985) y Pretty and Russell (1988). Así por ejemplo, se plantea que para áreas residenciales de baja densidad, se puede tener un distanciamiento entre 300 y 500 m (2 a 3 paraderos por km), considerando que en horario punta la concentración de pasajeros no sea muy elevada. En áreas céntricas, con gran concentración de comercio, servicios y áreas residenciales de alta densidad y de alto flujo de buses los paraderos deben ubicarse entre 150 a 300 m.

Con respecto al criterio de espaciamiento según tipos de vías, en vías locales o secundarias el distanciamiento es indiferente entre puntos de parada, ya que los paraderos no se ven influenciados por altos flujos vehiculares. En arterias con mayor flujo debe evitarse el número excesivo de buses que, combinado con las detenciones en los semáforos, produce un alza en el tiempo de viaje de todo el tráfico. Por lo tanto, en estas se recomienda una separación mínima de paraderos de 300 m. Finalmente, en vías con altas velocidades que cubren grandes distancias los paraderos deben estar localizados próximos a los puntos generadores de demanda con los correspondientes resguardos para los pasajeros, como por ejemplo, un buen diseño y funcionalidad de paraderos que cuente con paraderos divididos, diseño de refugios y andenes en concordancia con la demanda, pistas de adelantamiento para buses, detención única para estos últimos, accesos claros para llegar a ellos y medidas de seguridad como vallas peatonales en el caso que corresponda.

Estudios con mayor profundidad han incorporado características operacionales de los buses como tiempos de acceso, tiempos de espera, demanda, velocidades comerciales, etc. Ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por Hauer (1971) quien a través de la elección del tamaño de buses y las características del tamaño de flota, aborda el tema del espaciamiento entre paradas de buses a través del tiempo de ciclo de estos, el tiempo de viaje sin detenciones, el número promedio de paradas en el ciclo y la duración media de cada parada. Lesley (1976), por su parte, determina el espaciamiento óptimo desde el punto de vista del costo generalizado de los usuarios y Kikuchi (1985) buscó que el tiempo de viaje total de los usuarios se redujera ostensiblemente, relacionando las detenciones y el intervalo entre los servicios de transporte. Así pues, integrando el tamaño vehicular eficientemente, los resultados de esta investigación arrojaron que, aunque el óptimo número de paraderos aumenta rápidamente con el tamaño de vehículos, el número de detenciones efectivas realizadas por éstos se mantienen relativamente constante, porque los buses no se detienen en la mayoría de los paraderos. Wirasinghe y Ghoneim (1981) determinan el espaciamiento óptimo de las paradas de buses a lo largo de una vía exclusiva con demanda uniforme. Ghoneim y Wirasinghe (1987) proponen un modelo de optimización de los costos totales del sistema para optimizar la distancia entre las paradas, así como la frecuencia del bus y la longitud de la ruta. Gibson y Fernández (1995) reportan el único modelo encontrado en la literatura chilena, desarrollado por el primer autor para CADE-IDEPE (1988), que determina el espaciamiento óptimo entre paraderos considerando el costo social total de la detención de un bus, la que incluye el tiempo de caminata de los pasajeros al paradero, el costo en tiempo para pasajeros que permanecen en el bus y el costo de operación de los

buses por efecto de la detención. Van Nes y Bovy (2000) estudian el espaciamiento de las rutas y paradas desde tres puntos de vista diferentes: los usuarios, los operadores y las autoridades, concluyen que la minimización de los costos totales es el objetivo más realista en el diseño de una red de transporte público.

Saka (2001) propone un modelo para determinar el espaciamiento óptimo entre paradas de buses considerando los tiempos de viaje, el tiempo de permanencia en los paraderos, las maniobras de aceleración y desaceleración. Más tarde trata de determinar la frecuencia óptima de los buses sensibilizando el espaciamiento de los paraderos. Ibeas et al (2010) desarrolla un modelo de optimización para localizar paradas de buses minimizando el costo social del sistema de transporte. Su modelación considera distintos tipos de demanda según la localización de paraderos, la operación de los buses, la interacción con el resto del tráfico y las características socio demográficas de distintas zonas en áreas urbanas. Los resultados demostraron que el número y la ubicación de los paraderos esta asociada a la elección modal, a los problemas de congestión y al tamaño de la flota para un determinado servicio.

## 3. USO DEL ESPACIAMIENTO EN UN MODELO DE OPERACIÓN DEL TPS

El modelo de progresión de vehículos de transporte público de superficie operando segregados del resto del tráfico, desarrollado por Valencia (2008), demostró que la velocidad comercial aumenta entre un 10 a un 20% si los paraderos están óptimamente espaciados. Sin embargo, surge un problema ante niveles de demanda de pasajeros baja en relación al flujo de buses. En estos casos el espaciamiento óptimo resultante puede ser excesivo (i.e., más de 600 m), lo cual es inapropiado desde el punto de vista de la accesibilidad de las personas (tiempo de caminata).

La incorporación del espaciamiento óptimo en el modelo desarrollado por Valencia (2008) permite entregar índices de rendimiento como la velocidad comercial, demoras y colas en paraderos, intersecciones semaforizadas y en un tramo completo. Los paraderos son modelados a través de funciones que relacionan su capacidad con sus principales índices de rendimiento (colas, demoras y detenciones), calibradas previamente mediante un programa de simulación de paraderos (IRENE). En este modelo Gibson et al (1989) determinó que la demora media total en paraderos ( $d_T$ ) esta compuesta por la suma de la demora por transferencia de pasajeros ( $d_p$ ) la cual depende del tiempo detenido por pasajero ( $t_p$ ) y el tiempo perdido por aceleración y frenado ( $t_f$ ), las demoras por esperas internas ( $d_e$ ) y las demoras en cola ( $d_q$ ).

Cada una de las demoras anteriores, en [s], quedan definidas como sigue:  $d_p = d_p(T_s, T_b, a_i)$ , donde  $T_s$  y  $T_b$  son tasa de subida (s) y bajada (b) de pasajeros medidas en pasajeros por bus y  $a_i$  son parámetros calibrados por Gálvez (2000);  $d_e = d_e(T_s, T_b, b_i \delta_i)$ , donde  $b_i$  son parámetros calibrados por Jorquera (2002),  $\delta_1$  y  $\delta_2$  variables mudas que se activan respectivamente ante la posibilidad de salir por la pista adyacente y la existencia de semáforos aguas abajo a menos de 15 metros del paradero. Las demoras en cola se calculan según el grado de saturación en paraderos de uno o tres sitios. Para tres sitios la formulación es  $d_q^x = d_q(x, Q, c_i)$ , donde  $d_q^x$  es la demora media en cola para el grado de saturación  $x$ ,  $Q$  es la capacidad del

paradero en buses por hora,  $c_i$  son páramelos a estimar (Jorquera, 2002). Finalmente, la capacidad del paradero se calcula como  $Q = Q(T_s, T_b, e_i, \delta)$ , donde  $e_i$  son parámetros de Jorquera (2002) y  $\delta$  es una variable muda que toma el valor 1 si el paradero es de tres sitios e informal.

Las intersecciones (subíndice  $I$ ) son modeladas con funciones tradicionales de demora uniforme y excedente, a través de la siguiente relación.

$$d_{ik} = (\delta_{ik} + l_{ik})h_{ik} \quad (1)$$

Donde  $d_{ik}$  es la demora total de buses en intersección  $k$  [s];  $\delta_{ik}$  es la demora por vehículo detenido en la intersección  $k$ ;  $l_{ik}$  es el tiempo medio perdido por aceleración y frenado en la intersección  $k$ ; y  $h_{ik}$  es el número medio de detenciones por vehículo en la intersección  $k$ . Las demoras producidas por vehículo detenido en intersecciones ( $\delta_{ik}$ ) se producen principalmente por la programación de semáforos que puede explicarse mediante la teoría de tráfico tradicional (para detalles, ver Akçelik, 1993)

El comportamiento en los arcos se define mediante relaciones de cinemática considerando velocidad y tasas de aceleración y frenado constantes de los vehículos que se describe a través del tiempo en movimiento en el arco  $k$  ( $t_{Mk}$ ) considerando el largo del tramo ( $L_k$ ) del corredor y una velocidad  $V_r$  en movimiento en los tramos, asumida no afectada por intersecciones o paraderos y constante en todo el corredor. Luego:

$$t_{Mk} = \frac{L_k}{V_r} \quad (2)$$

En general, la ubicación de paraderos, ya sea mediante modelos o criterios del área de estudio, presentan ventajas y desventajas para la operación del sistema de TPS. La ubicación de paraderos próximos unos de otros tiene ventajas como mayor confort para los pasajeros al presentar un mayor número de opciones de puntos de subida y bajada, una menor concentración de pasajeros en cada paradero y, por ende, un menor tiempo de parada para la operación de transferencia de pasajeros. Las desventajas corresponden a un mayor número de detenciones, por lo tanto un aumento del tiempo de viaje, un mayor consumo de combustible y un descontento en las personas que utilizan el transporte público por las frecuentes detenciones. Por otro lado, un mayor distanciamiento entre paraderos presenta un menor tiempo de viaje y menores consumos de combustible, pero tiene una mayor concentración de pasajeros en cada punto y por lo tanto un tiempo de parada más extenso.

Un modelo desarrollado en Chile por CADE-IDEPE (1988) se introdujo en CORBUS para determinar el espaciamiento óptimo entre paraderos. El modelo utiliza el costo social total de la detención de un bus ( $CT$ ), considerando los costos de usuarios y operadores como el tiempo de acceso (caminata) a los paraderos ( $C_a$ ), el costo de las demoras en paradero a los pasajeros que permanecen en el bus ( $C_p$ ) y costo de operación por detención del bus ( $C_o$ ). El costo de operación de los vehículos en caso urbano se asume como el doble del costo de consumo de combustible, según recomendaciones de SECTU (1988). Luego,  $CT = C_a + C_p + C_o$ . Las componentes de los costos se resumen a continuación.

$$C_a = \left( \frac{L_T P_d \alpha VT}{v_p} \right) \frac{d}{m} \quad (3)$$

$$C_o = 2 \left( \frac{1000 L_T}{d} \right) \lambda q_b P_c (C_d + C_r d_T) \quad (4)$$

$$C_p = \left( \frac{1000 L_T}{d} \right) \lambda q_b TO_b VT d_T \quad (5)$$

donde:

$L_T$  : longitud del tramo en estudio (km)

$P_d$  : densidad de demanda de pasajeros en el tramo (pax/h-km)

$\alpha$  : ponderador del tiempo de acceso (v.g., 2 a 3 veces el tiempo de viaje)

$VT$  : valor social del tiempo (\$/s-pax)

$v_p$  : velocidad de caminata de los pasajeros (m/s)

$d$  : distancia entre paraderos (m)

$m$  : parámetro de la distancia media caminata al paradero (v.g.,  $m = 4$  implica una distribución uniforme de los pasajeros en el tramo)

$\lambda$  : proporción de buses que se detienen en paraderos

$q_b$  : flujo de buses que pasa por el paradero (bus/h)

$P_c$  : precio social del combustible diesel (\$/L)

$C_d$  : consumo de combustible por detención del bus (L/det)

$C_r$  : consumo de combustible al relanti (L/s)

$d_T$  : demora media total en paraderos (s)

$TO_b$  : tasa de ocupación de los buses en el tramo y período (pax/bus)

Notar que el tiempo de espera de los pasajeros una vez que éstos llegan al paradero es irrelevante para determinar el espaciamiento. Si es importante separar entre el valor del tiempo de los pasajeros que esperan al interior del vehículo del valor del tiempo de quienes caminan al paradero. Para esto se usa el parámetro  $\alpha$ .

Luego, el costo social total de una detención de un bus está dado por:

$$CT = \frac{d L_T P_d \alpha VT}{m v_p} + \frac{1000 L_T}{d} \lambda q_b [2 P_c C_d + d_T (2 P_c C_r + TO_b VT)] \quad (6)$$

Derivando la expresión anterior respecto a la variable  $d$  e igualando a cero, el espaciamiento óptimo ( $d^*$ ) queda dado por:

$$d^* = \sqrt{\frac{1000 \lambda q_b v_p m}{P_d \alpha VT} [2 P_c (C_d + d_p C_r) + d_T TO_b VT]} \quad (7)$$

Para este estudio se asumió que  $\alpha = 2,5$ ,  $m = 4$  y  $v_p = 1,2$  m/s. Este último valor corresponde a la velocidad de caminata de una persona promedio en terreno plano. Las tasas de consumo de combustible por detención y al ralenti fueron tomados de SECTU (1988):  $C_d = 0,023$  L/det,  $C_r = 0,0006$  L/s (no se han reportado nuevos valores para el país). El precio social del combustible y el valor del tiempo utilizados son los recomendados por MIDEPLAN (2005):  $VT = 0,215$  \$/s-pax,  $P_c = 302,6$  \$/L. En consecuencia, reemplazando en la ecuación anterior los parámetros mencionados, el espaciamiento óptimo resulta:

$$d^* = 43,8 \sqrt{\frac{\lambda q_b (149 + TO_b d_T)}{P_d}} \quad (8)$$

Luego, el espaciamiento óptimo entre paraderos depende del flujo de buses que se detiene en paraderos  $\lambda q_b$ , la demora promedio en paraderos  $d_T$ , la tasa de ocupación de vehículos  $TO_b$  y la densidad de demanda de pasajeros en un tramo  $P_d$ .

El modelo requiere que la demanda tenga un comportamiento homogéneo en el corredor o en tramos de éste.

En este trabajo se estudia una forma de definir el distanciamiento entre paraderos cuando la demanda es baja en algunos tramos de un corredor de transporte público, más allá de la aplicación irrestricta de la Ecuación (8).

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

El análisis de sensibilidad del espaciamiento de paraderos bajo distintas demandas de pasajeros, flujo de buses y tasas de ocupación de estos, se realizó considerando como referencia datos tomados durante abril de 2008 en el periodo punta mañana en un corredor segregado de buses en Santiago de Chile. Estas características se describen en la Tabla 1 y se asumen constantes para todos los experimentos de simulación realizados.

Al ser éste un modelo macroscópico se consideró un flujo total de buses que circula en el corredor cuyo porcentaje de detenciones en paraderos e intersecciones fue determinado en estudios anteriores (Valencia y Fernández, 2008), donde se midieron estos porcentajes durante distintos periodos del día.

Se encontró que cuando un paradero está a mitad de cuadra, el porcentaje de buses que se detiene en paraderos en el periodo punta mañana es de un 84%; en el periodo punta tarde resultó de un 86% y en el periodo fuera punta un 77%. En general, estos valores muestran que en vías cuyo espaciamiento promedio de paraderos es aproximadamente 400 metros se produce una mayor tasa de detenciones en los periodos punta mañana y tarde (85% en promedio).

Para determinar la proporción de buses que se detienen en intersecciones se observó la interacción paradero-semáforo. Se escogió paraderos ubicados a menos de 15 metros de la línea de detención, ya que, según Gibson y Fernández (1996), a mayor distancia desaparece la influencia del semáforo sobre el paradero. Se efectuaron mediciones en el periodo punta mañana y tarde. Los datos arrojaron que la proporción de buses que se detienen conjuntamente en paraderos e intersecciones es del 50%. En tanto, la proporción de buses que se detienen sólo en intersecciones es un 20%.

Con los datos anteriores, considerados como constantes para todos los experimentos de simulación, como se explica más arriba, se estudiaron las siguientes combinaciones de flujos de buses, demanda de pasajeros y tasas de ocupación de buses:

- Flujos de buses: 30, 60 y 90 bus/h.
- Demanda de pasajeros: 300, 750, 500, 1000, 1500 y 2000 pax/h-km.
- Tasas de ocupación de buses: 50, 100 y 150 pax/bus.

Los valores anteriores generan un total de 54 escenarios. Dado que CORBUS es un modelo de simulación macroscópica, en que las variables toman valores determinísticos en cada ejecución, no es necesario hacer varias corridas de un mismo escenario, como tendría que ser en un microsimulador de tráfico. Por lo tanto, se realizaron 54 corridas del modelo. Los resultados de presentan en el capítulo siguiente.

#### 5. RESULTADOS

En Valencia (2008) se muestra mediante el uso de CORBUS que la incorporación del espaciamiento óptimo en corredores de buses con alta demanda de pasajeros, en conjunto con otras medidas de prioridad al transporte público, permite a los buses alcanzar velocidades comerciales superiores a 20 km/h.

Sin embargo, se detectó en otros experimentos que en lugares con menor densidad de demanda de pasajeros el modelo de espaciamiento propuesto en Gibson y Fernández (1995), e incorporado a CORBUS, entrega distancias poco razonables para los usuarios de un sistema de buses y más similares a la de un sistema de metro. Por ejemplo, espaciamientos mayores que un kilómetro. En contraste, en el Capítulo 2 algunos autores plantean que para áreas residenciales de baja densidad, el distanciamiento entre paraderos puede estar en un rango de 300 a 500 m (EBTU, 1982; CUTA, 1985; Pretty and Russell, 1988).

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados de simulación de los distintos escenarios descritos en el Capítulo 4. De los resultados se desprende que cuando el flujo de buses en un corredor es bajo y las demandas de pasajeros son menores a los 300 pax/h-km no es aconsejable aplicar el modelo de espaciamiento incorporado en CORBUS. En tales casos, y considerando que se trata de una vía con segregación del resto del tráfico, se recomienda aplicar un espaciamiento máximo de 700 m. Se escogió esta distancia porque es aproximadamente a la mitad del espaciamiento entre estaciones de metro.

Otros resultados presentados en la Tabla 2 se pueden clasificar de la siguiente manera. Para un mismo flujo buses, al aumentar la tasa de ocupación de estos, se puede usar el modelo de espaciamiento a medida que aumenta la demanda de pasajeros en ciertos rangos. Fuera de esos rangos, la recomendación es a utilizar el distanciamiento máximo de 700 m. Cabe notar que el objetivo de dichos rangos es mantener una velocidad comercial razonable, en torno a los 18 y 25 km/h.

Además, los casos de aplicación del modelo se reducen, a medida que aumenta el flujo de buses. Por ejemplo, para un flujo de 30 bus/h, hay siete combinaciones de variables en que es aplicable el modelo de espaciamiento. Las combinaciones se reducen a tres para un flujo de 90 bus/h.

Todo lo anterior se aprecia con mayor detalle en las Figuras 1 a 3. En las figuras se muestra en líneas gruesas el espaciamiento para las distintas tasas de ocupación de los buses y en líneas finas la velocidad comercial de éstos, en decenas de km/h (v.g., 200 significa 20 km/h). Por ejemplo, en la Figura 2, si se quiere tener una velocidad comercial de 20 km/h y se tiene una demanda de pasajeros de 1100 pax/h-km y buses con 50 pasajeros a bordo, el espaciamiento entre paraderos debiera ser de 500 m. En las mismas figuras, el rectángulo segmentado indica el espacio factible en que se puede aplicar el modelo de espaciamiento de CORBUS.

#### 6. COMENTARIOS

En este trabajo se ha mostrado una sensibilización de criterios ante escenarios de demanda de pasajeros baja (300 a 2000 pax/h-km) para la aplicación del modelo de espaciamiento óptimo incorporado en el modelo CORBUS (Valencia, 2008). Este ejercicio se realizó debido a que en aplicaciones de CORBUS se había observado que, bajo determinadas circunstancias, el modelo entregaba espaciamientos de paraderos excesivos para un sistema de buses.

La búsqueda del espaciamiento óptimo entre paraderos tiene como objetivo que el sistema de buses proporcione velocidades comerciales razonables (i.e., sobre los 20 km/h), manteniendo su mayor accesibilidad comparada con la de un sistema de metro. En este sentido, es tan poco eficiente para pasajeros y operadores que los paraderos en vías segregadas de buses estén distanciados 400 m, independiente de sus condiciones de operación, como que las estaciones de metro estén, en promedio, a un kilómetro una de otra.

En el caso del metro, aun cuando la demanda en ciertos tramos y períodos sea baja, los pasajeros toleran paradas cada kilómetro porque esto hace que su velocidad comercial sea alta (30 km/h) y, por ende, que el tiempo de viaje de los pasajeros sea reducido y confiable. El mismo objetivo se quiere lograr al establecer un espaciamiento óptimo entre paraderos.

Los resultados de este estudio comprueban que se ha logrado su objetivo al entregar recomendaciones para el espaciamiento de paraderos bajo distintos niveles de demanda de pasajeros, flujos de buses y tasas de ocupación, sin llegar a deteriorar la velocidad comercial del transporte público.

Esperamos que las recomendaciones aquí presentadas sirvan para el diseño de corredores segregados de transporte público, tanto en Chile como en el resto de Latinoamérica.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por los proyectos DIR 037.352/2011 de la Dirección de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y FAI ICIV-003-09 de la Dirección de Investigación de la Universidad de los Andes.

## REFERENCIAS

- Akçelik, R. (1993) Traffic signals–capacity and timing analysis. Australian Road Research Board Ltd. Research Report 123, Fifth Reprint.
- Burgos, V., Fernández, R. y Cortés, C. (2005). Desarrollo de un simulador de operaciones de transporte público en un ambiente de microsimulación de tráfico. Actas del XII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Valparaíso, 245-258.
- CADE–IDEPE (1988). Investigación de análisis y seguimiento de transporte público. Informe final, Intendencia del a Región Metropolitana, Santiago.
- CUTA (1985). Bus stops and terminals. Canadian Transit Handbook, Chapter 11. Canadian Urban Transit Association, Toronto.
- EBTU (1982). Tratamiento preferencial ao transporte coletivo por ônibus. Empresa Brasileira dos Transportes Urbanos, Ministerio dos Transportes, Brasilia.
- Fernández, R. (2001) A new approach for modelling stop operations. Traffic Engineering and Control 42(7).
- Fernández, R., y Valenzuela, E. (2003). Modelos para estimar la velocidad comercial del transporte público en Santiago de Chile. Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 247-256, Santiago.
- Gálvez, T. (2000). Incorporación explícita de la modelación de paraderos de buses en programas de simulación de tráfico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile.
- Gibson, J. y Fernández, R. (1996). Efecto de una intersección semaforizada aguas abajo sobre la capacidad de un paradero de buses con sitios múltiples. Apuntes de Ingeniería 19(4), Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Gibson, J. y Fernández, R. (1995). Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. Apuntes de Ingeniería 18(1), Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Ghoneim, N. and Wirasinghe, S. (1987). Optimum zone configuration for planned urban commuter rail lines. Transportation Research 21, 106–114.
- Gibson, J., I. Baeza and L.G. Willumsen (1989) Bus stops, congestion and congested bus stops. Traffic Engineering and Control 30(6).
- Hauer, E. (1971). Fleet selection for public transportation routes. Transportation Science, 5(1), 1 - 22.
- Ibeas, A., L. dell’Olio, B. Alonso ang O. Sainz (2010) Optimizing bus stop spacing in urban areas. Transportation Research Part E 46, 446–458.
- Jorquera C. (2002) Funciones de demora en paraderos de buses. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Kikuchi, S. (1985). Relationship between the number of stops and headway for a fixed-route transit system. Transport Research A, 19A(1), 65-71.
- Lesley, L.J.S. (1976). Optimum bus-stop spacing. Traffic Engineering and Control, 17(10, 11), 399 -401, 472 – 475.
- MIDEPLAN (2005). Precios sociales para la evolución de proyectos. Ministerio de Planificación, Santiago.
- Pretty, R. L. and Russel, D. J. (1988). Bus boarding rates. Australian Road Research 18(3), 145 -152.
- Saka, A. ( 2001). Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas. Journal of Transportation Engineering 127 (3), 195–199.
- Valencia, A. (2008). Modelo para planificación, operación y diseño físico de corredores de transporte público de superficie. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte, Universidad de Chile.
- Valencia, A. y Fernández, R. (2007). Representación macroscópica de la incorporación segregada de transporte público. Revista Ingeniería de Transporte. 13(1), 18-24.
- Van Nes, R., and Bovy, P. (2000). Importance of objectives in urban transit network design. Transportation Research Record No. 1735, 25–34.
- Vuchic, V. (2005). Urban Transit: Operations, Planning and Economics. John Willey and Sons. New Jersey.
- Wirasinghe S. and Ghoneim, N. (1981). Spacing of bus stop for many to many travel demand. Transportation Science 15 (3), 210–221.

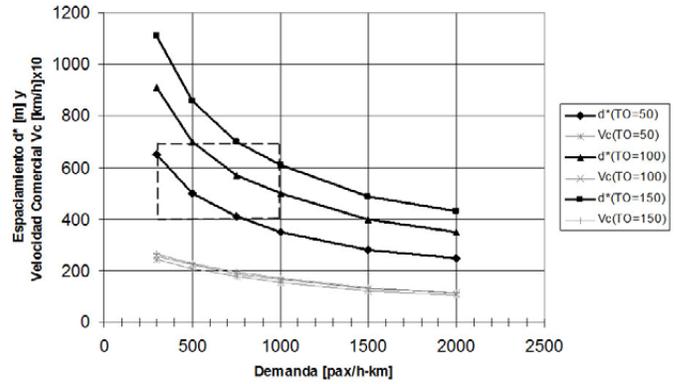
**TABLA 1: Características Genéricas del Corredor de Buses para Experimentos de Simulación**

Variable	Valor
Largo corredor (L)	4815 m
Velocidad en movimiento de buses ( $V_c$ )	40 km/h
Número de intersecciones semaforizadas (NI)	14
Número de paraderos divididos (NP)	12
Número de sitios de paraderos	3
Tasa de aceleración de buses (a)	1,2 m/s <sup>2</sup>
Tasa de frenado de buses (f)	1,3 m/s <sup>2</sup>
Flujo de saturación (S)	1000 bus/h-pista
Proporción de buses que para en paraderos ( $p_p$ )	0,85
Proporción de buses que para en intersecciones ( $p_i$ )	0,20

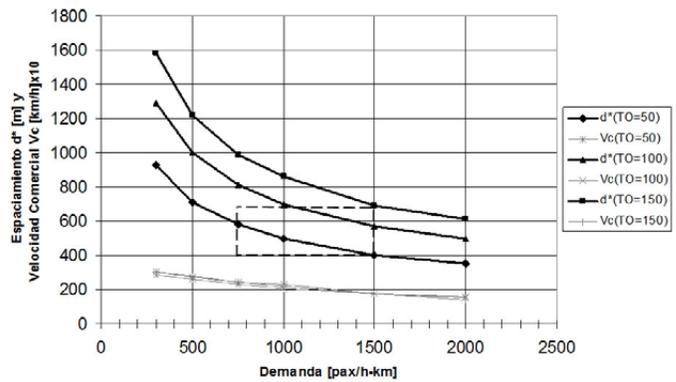
**TABLA 2: Espaciamento de Paraderos según Variables de Operación**

Demanda pasajeros (pax/h-km)	Tasa de ocupación de los buses (pax/bus)		
	50	100	150
<b>Flujo 30 bus/h</b>			
300	Usar modelo	700	700
500	Usar modelo	Usar modelo	700
750	Usar modelo*	Usar modelo*	Usar modelo
1000	700	700	Usar modelo*
1500	700	700	700
2000	700	700	700
<b>Flujo 60 bus/h</b>			
300	700	700	700
500	700	700	700
750	Usar modelo	700	700
1000	Usar modelo	Usar modelo	700
1500	Usar modelo*	Usar modelo*	Usar modelo*
2000	700	700	700
<b>Flujo 90 bus/h</b>			
300	700	700	700
500	700	700	700
750	700	700	700
1000	Usar modelo	700	700
1500	Usar modelo	Usar modelo*	700
2000	700	700	700

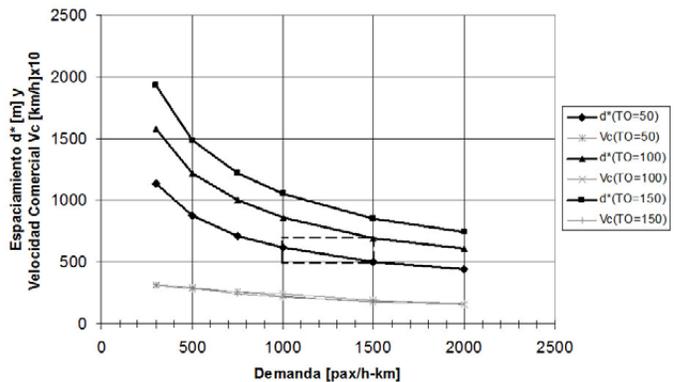
\*: En estos casos los buses tendrán una velocidad comercial entre 18 y 20 km/h, por lo que se recomiendan medidas de prioridad adicionales a la segregación; por ejemplo, semáforos actuados por buses y/o paraderos divididos.



**FIGURA 1: Espaciamento de Paraderos y Velocidad Comercial para Flujo de 30 bus/h**



**FIGURA 2: Espaciamento de Paraderos y Velocidad Comercial para Flujo de 60 bus/h**



**FIGURA 3: Espaciamento de Paraderos y Velocidad Comercial para Flujo de 90 bus/h**