

Análisis de la capacidad de corredores de transporte público mediante microsimulación

Ernesto Castillo¹, Cristián E. Cortés^{*1}, Roberto Fuentes², Carlos Moya², and Víctor Rocco¹

¹*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.*

Blanco Encalada 2002, 5^{to} piso, Santiago, Chile.

ernesto.cast.nav@gmail.com; ccortes@ing.uchile.cl; victor.rocco.c@gmail.com

²*Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA), MTT, Gobierno de Chile*

Teatinos 950, Piso 16, Santiago, Chile.

rfuentes@sectra.cl; cmoya@sectra.cl

Artículo sometido al XV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte - Junio 2011

Resumen

La planificación de sistemas de transporte público urbano contempla niveles de decisión estratégico, táctico y operacional. Los últimos dos niveles quedan determinados por la interacción entre la infraestructura, los vehículos y los pasajeros, durante la operación del sistema. Esta interacción se produce físicamente en las zonas de parada, y diversos estudios a través del tiempo han demostrado que la forma específica de operar en estos lugares decide en gran parte la capacidad de los dispositivos viales. En el último tiempo en Santiago se pueden destacar innumerables esfuerzos para proveer infraestructura especializada para buses. Los especialistas han entendido que un buen diseño depende fuertemente de la configuración y disposición vial, de la distribución de los pasajeros, de su comportamiento y de la intensidad de oferta y demanda en cada caso particular. La elaboración de modelos matemáticos de optimización en casos complejos de interacción es difícil y en ciertos casos prácticamente imposible; sin embargo, la simulación es una herramienta de gran utilidad para poder determinar capacidades y eficiencia de dispositivos y de formas de operación en general. En este artículo se sintetiza una metodología de análisis de la operación de corredores exclusivos de buses, considerando capacidades asociadas a distintas alternativas de diseño. En particular, se estudia vía simulación el rendimiento de corredores con una pista por sentido sin adelantamiento, una pista por sentido con adelantamiento en torno a las zonas de parada y dos pistas continuas. Cada caso particular tiene sus características propias; sin embargo, es posible entregar recomendaciones genéricas de diseño para futuras inversiones considerando los rendimientos de estos posibles diseños en base a la velocidad comercial, cubriendo una gama importante de opciones posibles las que deben ser estudiadas para diferentes perfiles de demanda, intensidad de llegadas de buses, estructura de líneas competitivas, entre otros elementos importantes. En el artículo se presenta la herramienta de simulación, se resume el diseño de experimentos y se discuten resultados obtenidos comparando los distintos perfiles, agregando algunas sensibilidades que también son de interés para efectos de propuestas de diseño.

Palabras clave: corredores exclusivos para buses, simulación, capacidad, velocidad comercial.

^{*}Autor correspondiente

1. Introducción

La planificación de sistemas de transporte público urbano contempla tres niveles de decisión: un nivel estratégico, que involucra los modos utilizados (bus, metro, tranvía, otros), la provisión de infraestructura, el diseño de las rutas; un nivel táctico, donde se deciden frecuencias y tamaños de flota; y un nivel operacional donde lo relevante radica en la operación del día a día. Se observa además una fuerte relación entre las decisiones estratégicas de provisión de infraestructura y la forma de operación de los servicios de transporte público, considerando los niveles táctico y operacional.

En el caso de sistemas de buses, existe una diferencia importante en la forma de proveer infraestructura, y tanto el diseño así como la forma de operación pueden resultar claves en la optimización de la operación y por ende, en las de las capacidades y velocidades comerciales que se puedan obtener. Un factor determinante es la interacción entre la infraestructura, los vehículos y los pasajeros, durante la operación del sistema. Esta interacción se produce físicamente en las zonas de parada, ya sea paraderos simples, complejos, estaciones, terminales, zonas pagas, etc., y diversos estudios a través del tiempo han demostrado que la forma específica de operar en estos lugares decide en gran parte la capacidad de los dispositivos viales (Fernández, 2010).

Con la implementación del Plan de Transporte para la ciudad de Santiago (Transantiago) y los innumerables esfuerzos para proveer infraestructura especializada para buses, los especialistas han entendido que el diseño depende fuertemente de la configuración y disposición vial, de cómo se distribuyen los pasajeros, de su comportamiento y de la intensidad de oferta y demanda en cada caso particular (medidas ya sea en vehículos o pasajeros por unidad de tiempo). La elaboración de modelos matemáticos de optimización en casos complejos de interacción es difícil y en ciertos casos prácticamente imposible; sin embargo, existe una herramienta de gran utilidad para poder determinar capacidades y eficiencia de dispositivos y de formas de operación en general, cual es la simulación.

Los modelos microscópicos de simulación de tránsito – o microsimuladores de tráfico – constituyen en la actualidad la herramienta más avanzada de representación de la circulación vehicular en una red de transporte. En el caso de transporte público sin embargo, no existen herramientas sofisticadas de modelación y que sean usadas para tomar decisiones de diseño importantes. Respecto de los distintos microsimuladores de tráfico comerciales existentes, ellos cuentan actualmente con formas de modelación por defecto de sistemas de transporte público, de limitada flexibilidad cuando se intenta modelar operaciones complejas en paraderos y terminales, transferencia de pasajeros, etc. Entre los paquetes comerciales que otorgan algún tipo de sofisticación a la modelación del transporte público, podemos mencionar AIMSUM/2 (TSS, 2004), CORSIM (FHWA, 1996), DRACULA (Liu, 2003), VISSIM (PTV, 2003) y PARAMICS (Quadstone, 2004). Todos estos simuladores definen líneas de transporte público de ruta fija con vehículos y características especiales, frecuencias pre-establecidas, operaciones en paraderos con tiempos de detención basados en distribuciones para la llegada de pasajeros, etc.

En la literatura se encuentran algunas técnicas de modelación sofisticadas para representar detalles de operación de transporte público no incluidas en las opciones por defecto, pero siempre basándose en adaptaciones de los paquetes comerciales (Venglar et al., 1995; Inga, 2001; Abdulhai et al., 2002; Lindau, 1983; Chien et al., 2000). Se observan también algunas experiencias utilizando funciones externas a los simuladores a través de APIs (Application Programming Interface), con lo cual es posible modelar con mucho detalle y con gran flexibilidad cualquier tipo de operación que el modelador desee, dependiendo de la flexibilidad de la interacción entre el software y las componentes externas conectadas vía API. En esta línea, algunos estudios empíricos usan microsimulación para

modelar esquemas que dan prioridad a sistemas de transporte público vía semáforos (Li et al., 2005; Lee et al., 2005), ambos usando PARAMICS vía API; Kim and Rilett (2005) desarrolla una aplicación similar usando VISSIM a través de un programa externo para controlar semáforos actuados.

A pesar de contar con estas funcionalidades, todos estos paquetes fueron diseñados pensando en la simulación de vehículos de transporte privado, y por lo tanto las entidades pasajeros (y en general usuarios) de sistemas de transporte público no juegan ningún rol. Así, se observa que el mayor problema al evaluar operaciones complejas de sistemas de transporte público proviene de la pobre representación de dichos sistemas dentro de los microsimuladores de tráfico de uso comercial. Además, es un hecho que los vehículos de transporte público se comportan distinto al resto del tráfico, pero no son modelados con suficiente detalle como para reflejar estas diferencias. Fernández et al. (2010a); Cortés et al. (2010) utilizan un enfoque de simulación híbrido, incorporando en detalle las operaciones de transporte público y su interacción con el resto del sistema. Esta plataforma utiliza un software comercial como plataforma base, e incorpora a los usuarios en la modelación microscópica de los sistemas de transporte, lo cual permite incluir efectos más realistas en la modelación y evaluación de mejoras operacionales del transporte público que sólo pueden ser estudiadas a nivel microscópico (control en tiempo real, diseño de terminales, implementación de sistemas ITS, etc.), y ésta es la plataforma base sobre la cual se desarrollaron las potencialidades que se desarrollan en este artículo.

En este artículo se sintetiza una metodología de análisis de la operación de corredores exclusivos de buses, considerando capacidades asociadas a distintas alternativas de diseño. En particular, se estudia el rendimiento de corredores con una pista por sentido sin adelantamiento, una pista por sentido con adelantamiento en torno a las zonas de parada y dos pistas continuas. Cada caso particular tiene sus características propias; no obstante, es posible entregar recomendaciones más genéricas de diseño para futuras inversiones en base a los rendimientos de estos posibles diseños – usando como referencia principalmente la velocidad comercial que es posible alcanzar con los diseños estudiados –, los que cubren una gama importante de opciones posibles las que deben ser estudiadas para diferentes perfiles de demanda, intensidad de llegadas de buses, estructura de líneas competitivas, entre otros elementos importantes. Las alternativas de operación serán evaluadas usando simulación microscópica de tráfico, enfocándose en las operaciones de transporte público, que son modeladas externamente vía API (Application Programming Interface), la cual fue construida a partir de los desarrollos iniciales de Fernández et al. (2010a); Cortés et al. (2010).

La metodología detrás de este trabajo comprende varias etapas. En primer término, se recopilan datos de terreno para codificar y calibrar las redes de microsimulación. En una segunda etapa se adapta la herramienta de simulación y se valida su funcionamiento a partir de la información recopilada en terreno en conjunto con otros antecedentes. En una tercera etapa se calibra los modelos de comportamiento utilizados para describir el funcionamiento del sistema de transporte público, para en la última etapa realizar las simulaciones con varios niveles de demanda y de flujo de buses, con lo cual se construyen curvas y se estiman rangos de capacidad para valores umbrales de velocidad asociados con cada diseño. Es importante considerar el alcance de la herramienta de simulación, que permite tener más elementos para tomar buenas decisiones de inversión en infraestructura especializada para transporte público en el futuro próximo. La estructura del artículo es la siguiente. En la sección 2 se describe el software de simulación utilizado, con sus ventajas, desventajas y potencialidades de uso. Luego, en la sección 3 se explica brevemente los temas de calibración, para en la sección 4 presentar el diseño de los experimentos, y luego en sección 5 los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones finales se reportan en la sección 6.

2. Descripción del Simulador de Transporte Público (STP)

El Módulo de Simulación de Transporte Público (STP) se basa en un programa de Microsimulación de Transporte genérico que provee las funcionalidades de:

- Definir una red vial con todos los detalles que esta requiere.
- Un motor de microsimulación que provee entre otros modelos de: ruteo (elección de ruta y asignación), seguimiento vehicular y cambio de pista.
- Un API en C++ para poder interactuar con el motor de simulación y poder adicionar módulos o plugin a la medida.

El desarrollo del programa se llevó a cabo bajo el paradigma de programación orientada a objetos en el lenguaje C++ en el cual está escrito el API del programa base, utilizando el ambiente de desarrollo Microsoft Visual Studio, en el Sistema Operativo Windows. Adicionalmente se utilizó el Sistema Administrador de Base de Datos PostgreSQL para almacenar toda la información de entrada y de salida de las microsimulaciones, que por su volumen y carácter distribuido de su procesamiento hacían inviable su manejo a través de archivos planos.

El módulo puede explicarse en términos del modelo de los objetos relacionados y de los controladores asociados al proceso completo de simulación.

- **Descripción general del modelo** Cada corredor tiene asociado un conjunto de Arcos en la red en el cual se define, en los cuales se encuentran ubicados un conjunto de Paraderos. A su vez posee un conjunto de Líneas compuesta cada una por una flota de Buses de distintos tipos que sirven a un subconjunto de Paraderos definido. A cada Paradero llegan Pasajeros a un tiempo determinado con un Paradero de destino específico. Una vez que un Bus se detiene en un Paradero este realiza la transferencia de Pasajeros y sigue su recorrido.

La manera como ingresan los Buses a la simulación está controlada por un Proceso Estocástico asociado a cada Línea, de forma análoga los Pasajeros llegan a los Paraderos controlados también por un Proceso Estocástico asociado al Paradero de origen.

Por otra parte el tiempo en que demoran los Pasajeros en transferir entre un Bus y un Paradero está determinado por distintos modelos de tiempo de servicio (TSP) por transferencia de pasajeros, calibrado a partir de operaciones reales medidas en terreno de la operación de corredores de distinto perfil.

- **Descripción general del proceso y controladores asociados**

- **Inicialización de Datos**

- Generación Matriz OD: dado los Pasajeros medidos en los Paraderos orígenes y destinos se aplica el Método Biproporcional para generar la matriz OD.
- Generación de Buses: dada una Línea, se recupera el Proceso Estocástico asociado para generar los Buses proporcionalmente al Tipo de Bus según la Flota y se calcula el tiempo de entrada de cada uno al Corredor.
- Generación de Pasajeros : de manera análoga, dado un Paradero, se recupera el Proceso Estocástico asociado y se generan todos los pasajeros que ingresaran a la red, calculándoles el tiempo de llegada al Paradero.

- **Simulación**

- **Detención de Buses en Paradero:** se encarga de controlar los modelos de Seguimiento Vehicular y Cambio de Pista una vez que los Buses se aproximan a uno de los Paraderos en los que le corresponde realizar una transferencia.
- **Transferencia de Pasajeros:** se realiza la transferencia entre el Bus y el Paradero tomando en consideración el Modelo TSP del Paradero y las características del Tipo de Bus.
- **Recolección de Estadísticas:** se encarga de guardar las estadísticas en cuanto a Velocidad Comercial de los Buses, Demora de Buses en Paradero, Tiempos de Subida y Bajada de Pasajeros a los Buses.

- **Fin Simulación**

- **Guardar Resultados:** una vez que la simulación ha finalizado toda la información relevante para el análisis posterior es almacenada en la Base de Datos.

En la figura siguiente se pueden observar los controladores del modelo STP implementado.

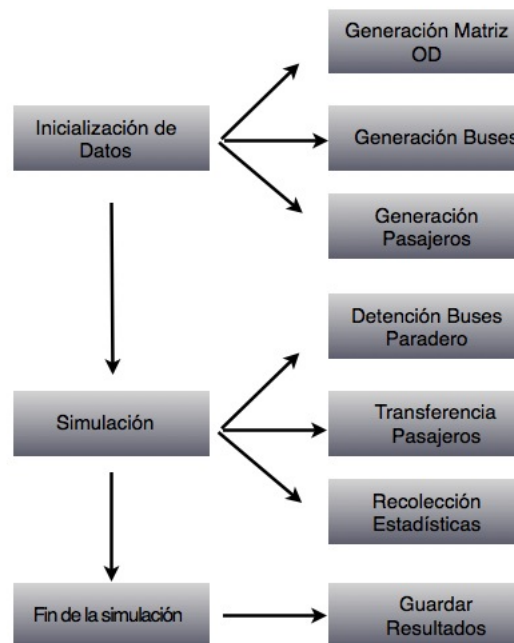


Figura 1: Controladores del Modelo STP Implementado

3. Calibración de Modelos

Recordando que el objetivo de este trabajo es comparar distintas opciones de diseño de corredores, sobre una base de tramos de corredores reales operando en Santiago. Los diseños considerados en este sentido son: una pista por sentido sin adelantamiento (en adelante T_1), una pista por sentido con adelantamiento en torno a las zonas de parada (T_2) y dos pistas continuas (T_3). Se escoge el corredor Suiza Las Rejas (entre Río Quetro y Las Violetas) para perfil T_1 , un corredor que se ha denominado Santa Rosa diseño alternativo para perfil T_2 (entre Varas Mena y Ureta Cox), y finalmente se escoge Pajaritos (entre Jorge Délano y El Descanso) con dos pistas continuas (T_3). El corredor que se ha denominado Santa Rosa alternativo corresponde a un diseño distinto al construido, que contempla una pista continua con adelantamiento en zonas de parada, similar al diseño actual del eje Av. Grecia. Se modeló un corredor con características parecidas en términos de localización, disposición de sitios en paraderos y demanda, al diseño actual de Santa Rosa con dos pistas continuas.

Primero, se procedió a codificar los corredores respectivos empleando imágenes satelitales y esquemas en planos Autocad. Para realizar la calibración de los modelos, se utilizó información de terreno (mediciones en los tramos de corredores codificados), mientras que otros parámetros más genéricos relacionados con la operación de los buses y el comportamiento de los choferes en Santiago de Chile, fueron obtenidos de un estudio previo (Didier et al., 2011). A partir de datos en terreno, se pudo por ejemplo calibrar los parámetros y formas funcionales de nuevos modelos de transferencia de pasajeros, y considerar comportamiento en los paraderos (mediciones de la posición en el andén donde se detienen los buses en los sitios de parada). Se recopiló también información de composiciones de buses observadas y distribución de la demanda a lo largo de los corredores (cargas de buses) así como en la estimación de movimientos de pasajeros de cada paradero y corredor, para los dos períodos de mayor exigencia del sistema. Además, en cada red se codificó los paraderos en las ubicaciones correspondientes a los lugares de medición, con las líneas correspondientes a los tramos de corredor, y la asignación de paraderos correspondiente en cada caso. Las programaciones de los semáforos corresponden a los programas vigentes en las fechas de las mediciones y fueron obtenidas de la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT).

La calibración se realizó con las mediciones reales antes descritas, de forma tal que el simulador fuese capaz de reproducir razonablemente las condiciones de operación actual de cada tramo de corredor. Este proceso de comparación se hizo utilizando como medida la velocidad comercial para cada tramo de corredor, obtenida de los datos de posiciones GPS de los buses de Transantiago en base a una metodología propuesta recientemente por Cortés et al. (2011), con lo cual se pudo validar el funcionamiento del simulador calibrado para todos los tramos de corredor seleccionados. En la sección 4 se explica como a partir de estos modelos calibrados, se diseña una metodología más genérica para comparar el rendimiento (principalmente en términos de velocidad comercial) de cada diseño de corredor estudiado.

Se consideró además algunos supuestos físicos, como por ejemplo:

- Tasa de aceleración y frenado para buses
 - Taxibus (9 m) 1.3 mpss
 - Bus Transantiago tipo B2 (no-articulado 12 m) 0.8 mpss
 - Bus Transantiago tipo C2 (articulado 18 m) 0.5 mpss
- Velocidad Máxima de los buses 60 km/h

A continuación se presenta las descripciones de los principales modelos involucrados en este proceso de calibración.

- **Ajuste de Llegadas de Buses a los Tramos de Corredores**

Para efectos de la simulación, dentro de la plataforma STP deberá definirse la manera (en términos probabilísticos) en que se realiza la entrada de los buses a la red. Para todos los tramos de corredores modelados se decidió emplear un proceso de Poisson de entrada, es decir, se consideran los intervalos entre eventos siguiendo una distribución exponencial negativa, cuyo parámetro de ajuste corresponde al inverso del flujo que circula por cada corredor segregado. Se debe notar que cuando la intensidad de buses empieza a subir notablemente, la tasa de entrada se ajusta a una entrada uniforme y casi entrando en cola.

Con el objeto de no tener bloqueos innecesarios en los lugares de entrada de buses a los corredores, se dejó al microsimulador estimar directamente la tasa de llegada de los buses de manera de tener, para cada nivel de flujo simulado, un parámetro Poisson consistente que permita el ingreso correcto de la cantidad de buses deseada.

- **Matriz de viajes de Pasajeros**

Debido a que se cuenta con la información de las subidas y bajadas de los pasajeros por cada parada en el tramo de corredor a simular, se originó una matriz de viajes para cada corredor empleando el método biproporcional con semillas nulas en los viajes no factibles. Esta operación es realizada automáticamente por el STP.

- **Modelos de Tiempo de Servicios de Pasajeros (TSP) y sus Sensibilidades**

Después de analizar y probar la eficacia de los modelos TSP existentes en la literatura (por ejemplo en Fernández et al. (2010b)), se determinó que ninguno reproducía en los rangos necesarios los datos tomados en terreno en los tramos de corredor escogidos para ser estudiados en este trabajo. Por lo tanto, se decidió reformular y recalibrar modelos independientes, propios de la realidad actual y que pudieron ser validados a partir de las observaciones medidas en terreno directamente. Los modelos más representativos son los que no consideran zonas pagas, ya que en todos los corredores codificados la operación no contemplaba zonas pagas al momento de las mediciones (período del segundo semestre del año 2008). Para hacer el análisis del potencial rendimiento de operación en zonas pagas para futuras evaluaciones (ver Resultados) se considera sensibilidad respecto de los parámetros de los modelos (tasa marginal de subida en particular) para emular el ingreso más fluido a los buses producto de este tipo de implementaciones.

En este artículo, los modelos empleados son de la siguiente forma:

$$TSP = \beta_0 + \max(\beta_1 P_{\max a}; \beta_2 P_{\max b}) \quad (1)$$

$$TSP = \beta_0 + \max(\beta_1 P_{\max a} + \beta_2 P_{\max a}^2; \beta_3 P_{\max b}) \quad (2)$$

En donde $P_{\max a}$ y $P_{\max b}$ corresponden al número de pasajeros que descienden y suben al bus respectivamente por la puerta más cargada.

- **Posiciones Relativas de Detención dentro del Andén**

Una de las características adicionales del STP comparado con paquetes de simulación comerciales, es la capacidad de distribuir los lugares de detención de manera aleatoria. Para

ello, se secciona el andén en distintas zonas y se entregan las probabilidades de que el bus realice la detención en cada una de ellas, utilizando las mediciones de ubicación de paradas de buses tal como se mencionó anteriormente. Comenzando con la zona 1, la más cercana al final del paradero y terminando en la zona 4 (arbitrariamente se divide el sitio del andén en cuatro secciones para considerar este efecto). Luego las paradas son distribuidas de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme con intervalos dados por la probabilidad, es decir, respetando las proporciones observadas.

■ Composición de las Flotas

El software STP permite además, como extensión del modelo original del simulador, incorporar las distintas proporciones de tipos de buses observadas, de manera de tener, por ejemplo, líneas sólo con buses articulados (tipo 1) o solamente con Taxibuses (tipo 4) en algunas sensibilidades.

Finalmente se chequeó que las velocidades comerciales obtenidas bajo la simulación de la situación actual correspondieran a valores medidos con anterioridad tal como se indicó en un comienzo.

4. Diseño de Experimentos

El objetivo de estos experimentos es calcular los rangos de operación en condiciones favorables de tres diseños para un corredor exclusivo. Se dispone de tramos de corredores codificados y calibrados para tres configuraciones: una pista sin adelantamiento T_1 , una pista con adelantamiento T_2 y dos pistas continuas T_3 . En las figuras 2, 3 y 4 se muestra un esquema de los tres tipos de corredor mencionados.



Figura 2: Diseño Tipo 1 (T_1), Una Pista sin Adelantamiento

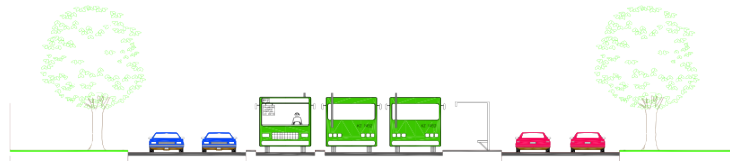


Figura 3: Diseño Tipo 2 (T_2), Una Pista con Adelantamiento



Figura 4: Diseño Tipo 3 (T_3), Dos Pistas Continuas

La metodología se basa en exigir los diseños, tanto por medio de aumentos en el flujo de buses (oferta), como a través de la expansión de las tasas de llegada de pasajeros a los distintos paraderos (demanda). El objetivo final será estimar la capacidad de los distintos diseños de corredor con la herramienta de simulación, y comparar el rendimiento de los tres tipos de corredores ante diferentes escenarios de oferta-demanda. Con esta metodología de expansión será posible encontrar instancias para cada combinación demanda-flujo de buses de la manera que se explica a continuación. Cada instancia permite el cálculo de la velocidad comercial a lo largo de todos los tramos simulados.

Tal como se anticipó, se elige un corredor representativo de cada diseño. La elección de los tramos de corredor para efectos de comparación de capacidades se basa en la calidad de las redes codificadas, en la estabilidad que presentan los resultados en cada caso (que se controla por número de repeticiones de cada escenario), y en base a cuan restrictiva sea la operación producto del resto de los dispositivos que se modelan en cada corredor específico (diseños de zonas de parada, presencia de semáforos, etc.). Después de considerar todos estos factores, se decide para el experimento de expansión oferta-demanda, el tramo codificado de Suiza Las Rejas (una pista sin adelantamiento), el corredor Santa Rosa en una codificación alternativa (proyecto hipotético de una pista con adelantamiento), y el corredor Pajaritos (dos pistas continuas).

Para computar la velocidad comercial, se utiliza conceptualmente la definición de velocidad media espacial, donde se computa la distancia total recorrida por los buses sobre el tiempo total que le toma a todos los vehículos considerados en la muestra, dependiendo del tramos que se quiera seleccionar y del período de modelación. En síntesis, considere la figura 5 donde el tramo de medición tiene una distancia total ΔX , en un período de medición T .

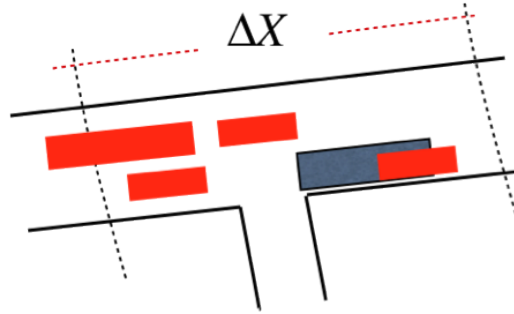


Figura 5: Ilustración del cálculo de velocidad comercial

Dado que la distancia de medición es una constante, la velocidad comercial representativa del tramo durante el período T se puede calcular como:

$$v_c = \frac{N \cdot \Delta X}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (3)$$

La expresión anterior refleja que durante el período T , N buses representativos cruzan el tramo de medición. Los buses se ponderan todos por igual en el cálculo anterior ya que la medida de velocidad (al ser un proxy de la velocidad media espacial) pondera por si misma con mayor peso a los buses más lentos, dado que se demoran más en recorrer el mismo tramo y por ende permanecen por más tiempo en el sistema.

La metodología para diseñar el experimento se sintetiza a continuación:

- Se escogen corredores representativos de cada perfil estudiado. Los perfiles que se evalúan son aquellos implementados recientemente en Santiago, T_1 , T_2 y T_3 , tal como se ha discutido anteriormente.
- Para el corredor Suiza Las Rejas (T_1), se analiza la circulación en el sentido Sur-Norte (S-N) en el segmento estudiado (sentido de mayor circulación en Punta Mañana), con tres zonas de parada específicas. Respecto de Santa Rosa alternativa (T_2), se modela el sentido S-N en el tramo considerado, considerando solamente 3 zonas de parada, lo que corresponde a una agregación de 8 paraderos en el diseño original y actualmente funcionando. En el caso de Pajaritos (T_3), en la punta mañana (PM) se modela el avance hacia el Centro, es decir, el sentido de avance es hacia el Nororiente, con tres zonas de parada en el tramo modelado. En las Figuras 6, 7 y 8 se muestra la codificación de los tres corredores a modelar en este experimento.

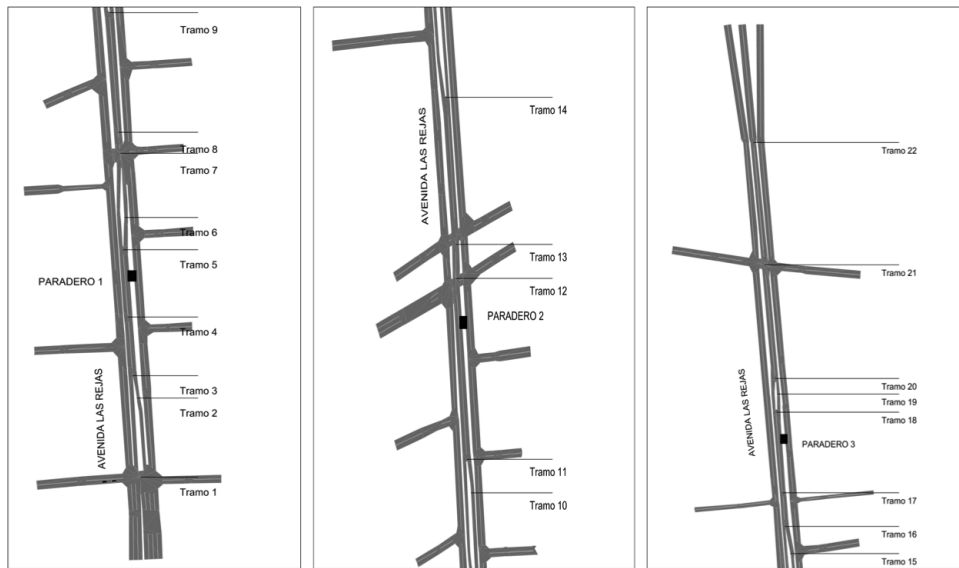


Figura 6: Codificación corredor Suiza Las Rejas entre Río Quetro y Las Violetas

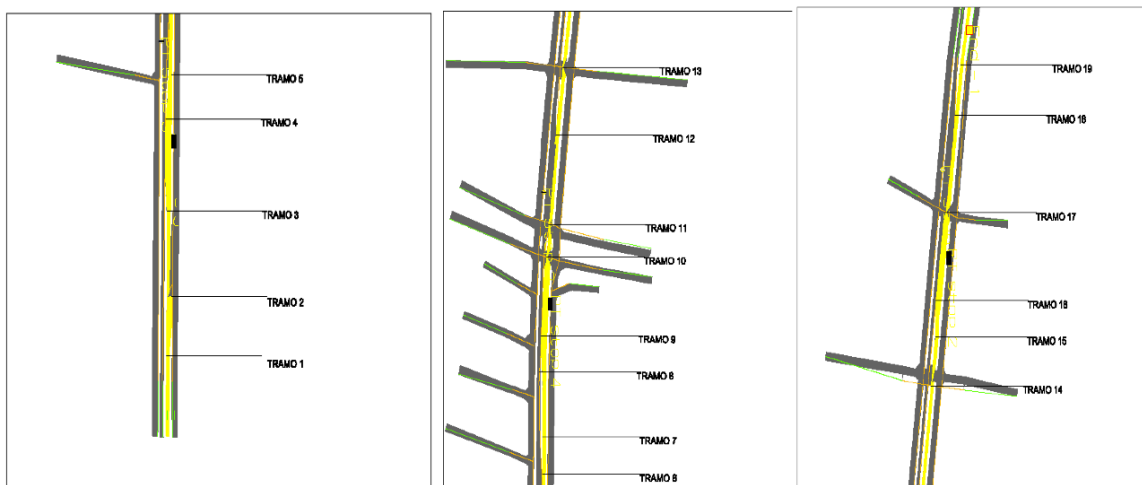


Figura 7: Codificación corredor Santa Rosa alternativo entre Varas Mena y Ureta Cox

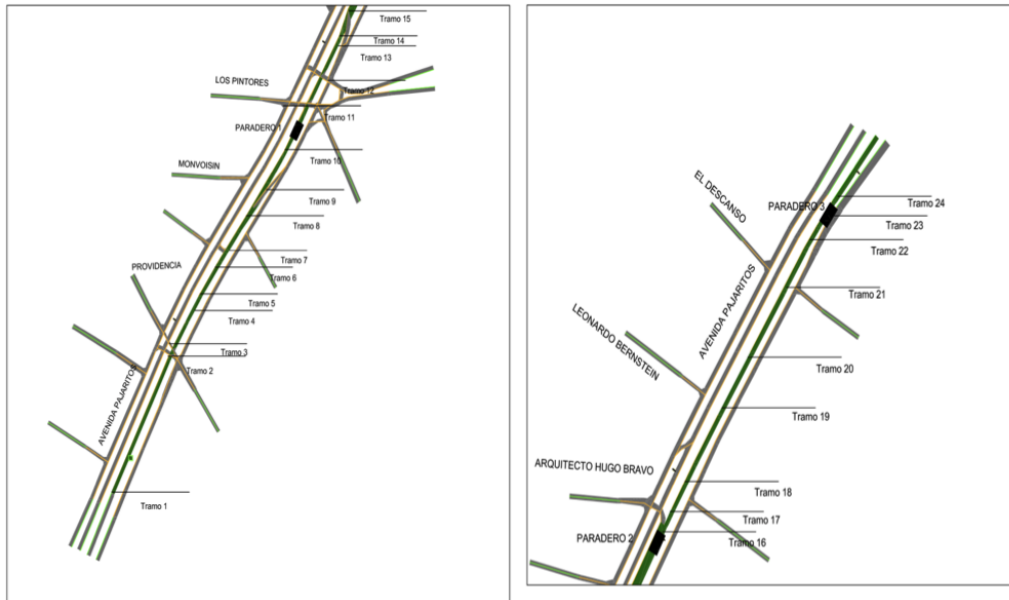


Figura 8: Codificación corredor Pajaritos entre Jorge Délano y El Descanso

- La composición de los buses es homogénea, es decir con probabilidad 0.25 de que el bus que ingrese sea de cualquier tipo (considerando los 4 tipos de buses: Taxibus, bus Transantiago tipo B2 de dos puertas, bus Transantiago tipo B2 de tres puertas, bus Transantiago tipo C2 o articulado). Los buses entran al corredor con una tasa de ocupación del 50 %, la cual se va modificando de acuerdo con el modelo de distribución de demanda descrito en la sección de (calibración).
- Respecto de la forma de representar la tasa de llegada de buses, ésta se agrega para los distintos tipos de vehículos, dejando como referencia los buses articulados (tipo 1). Así, los factores de equivalencia que se utilizan para la representación de los flujos de buses son 0.55 para el bus más pequeño, 0.66 para el bus mediano y 1 para el bus articulado, el cual se denota como beq (bus equivalente).
- La comparación de los tres corredores se hace respecto de condiciones homogéneas tanto de oferta como de demanda. Para poder calcular capacidades (en base a estos diseños con características específicas), se incrementa paulatinamente tanto el flujo de entrada de buses (en beq/h, ver párrafo anterior) como también la demanda en paraderos. Se modela el sentido con mayor actividad en la punta mañana para cada caso, considerando demanda (en pax/h) que se aumenta proporcionalmente en forma homogénea en las tres paradas localizadas a lo largo del tramo de corredor estudiado.
- Respecto del número y distribución de las simulaciones para estudiar cada perfil, se hizo variar la demanda entre 20 pax/h hasta 1200 pax/h por paradero, considerando el sentido de mayor intensidad de demanda en punta mañana dependiendo del corredor. Con respecto al flujo de buses, se varía a partir de 20 buses/h hasta lo que resista la red codificada en el microsimulador en cada caso (correspondiente a 200 buses/h en el caso de Suiza Las Rejas y Santa Rosa alternativa, y 250 buses/h en el caso del corredor Pajaritos). De esta forma, se obtienen los pares (flujo-demanda) donde se realizarán las simulaciones. En este experimento, se realizó veinte repeticiones por cada par flujo-demanda.

- Se supone que la probabilidad de que cualquier bus le sirva a un pasajero esperando en una parada específica es de $1/3$, este valor fue escogido considerando arbitrariamente y sobre el mismo se realizaron sensibilidades, que como resultado solo variaron el tiempo de espera en los paraderos. Este supuesto permite sensibilizar respecto a diseños que aumenten o disminuyan las líneas comunes a las que se ven enfrentados los usuarios.

En la siguiente sección se reportan los principales resultados de estas simulaciones en términos de indicadores de rendimiento relacionados con la velocidad comercial.

5. Resultados

5.1. Resultados Generales

Se intenta clasificar los resultados por tipo de diseño, considerando las diferencias en operación que se pueden deducir de cada tipología específica. Tal como se menciona antes, a partir de un escenario base, el objetivo será exigir los diseños, tanto por medio de aumentos en el flujo de buses (oferta), como a través de la expansión de las tasas de llegada de pasajeros a los distintos paraderos (demanda). El objetivo final es estimar la capacidad de los distintos diseños de corredor por medio de simulación, y comparar el rendimiento de los tres tipos de corredores ante diferentes escenarios de oferta-demanda. En las figuras 9, 10 y 11 se observa el nivel de servicio que pueden ofrecer los distintos corredores T_1 , T_2 y T_3 , a partir de un análisis de su velocidad comercial, representada por la gama de colores que se muestra, considerando demanda (homogénea en todas las paradas) versus el flujo de buses en beq/h.

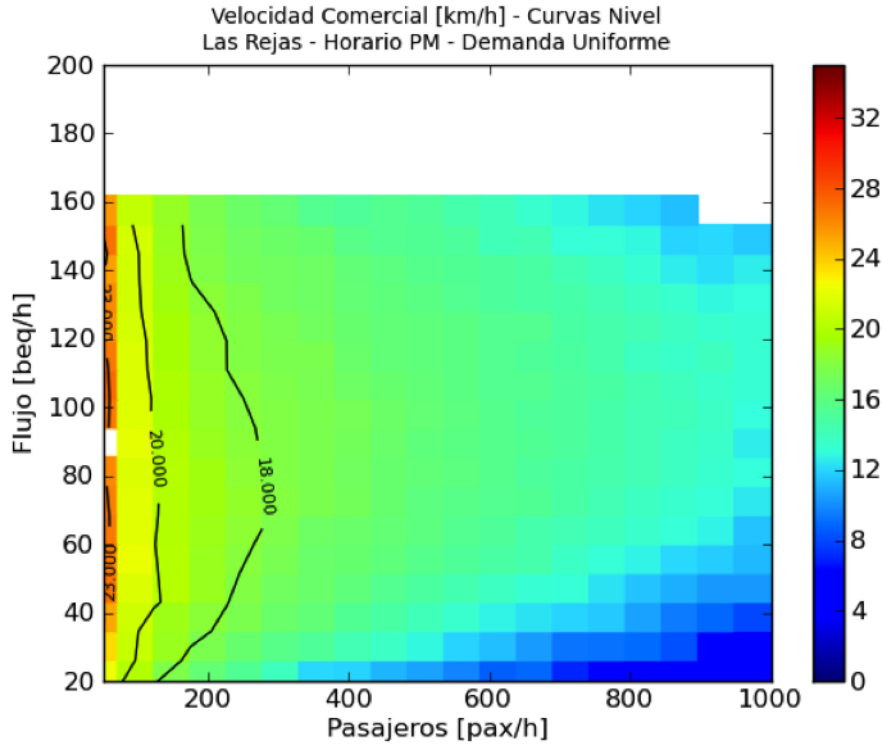


Figura 9: Curvas de Nivel para Diseño T_1

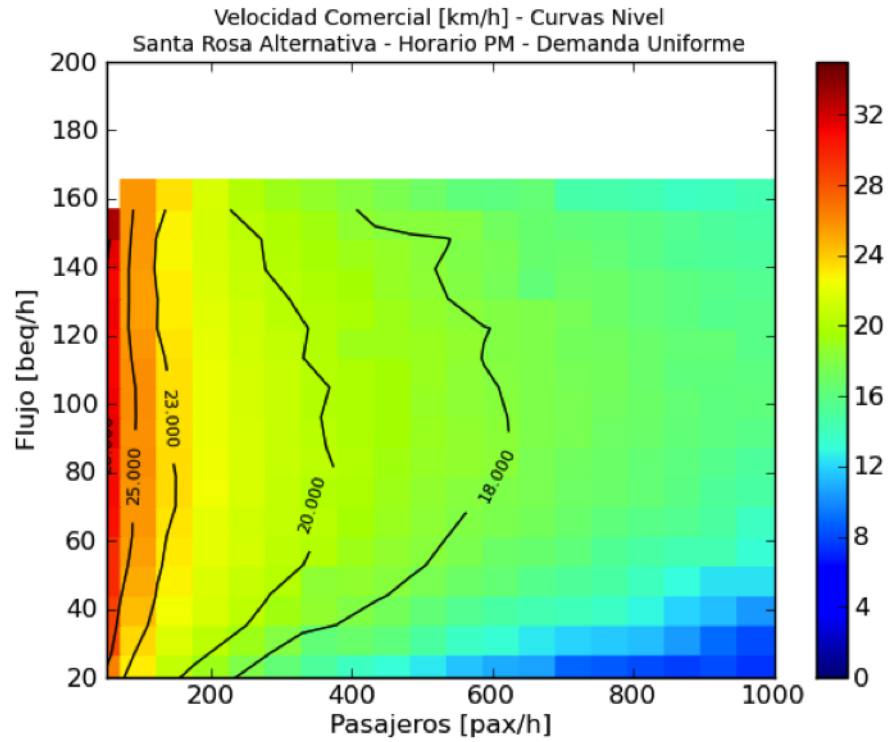


Figura 10: Curvas de Nivel para Diseño T_2

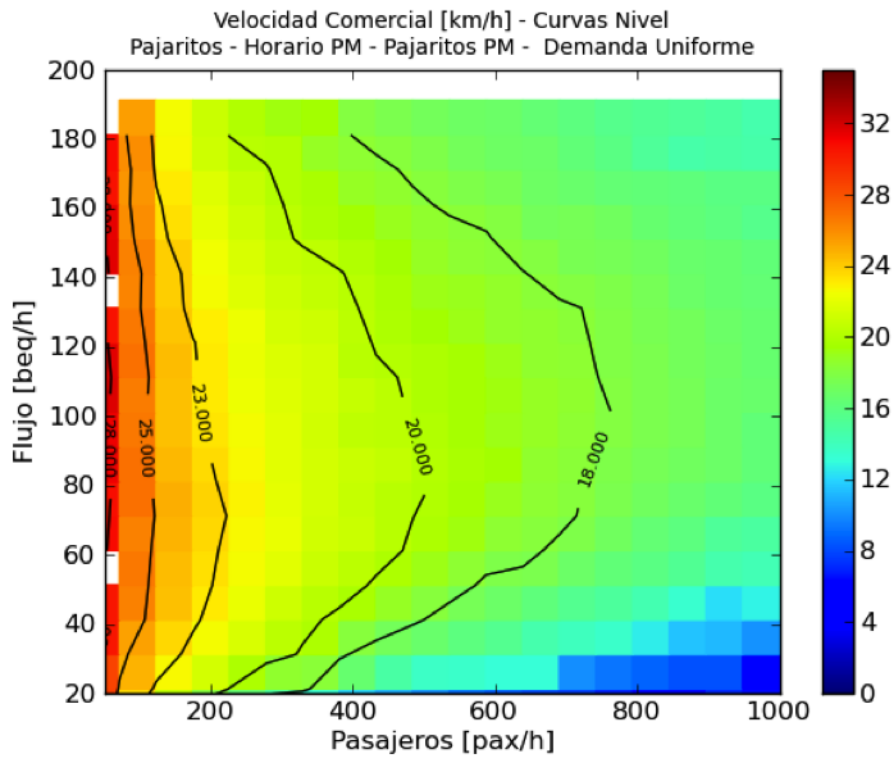


Figura 11: Curvas de Nivel para Diseño T_3

En esta figuras, se observa un comportamiento intuitivamente lógico, observando que el nivel de servicio y capacidades del corredor mejoran a medida que se aumenta la capacidad vial del corredor (desde T_1 a T_3). Las curvas de nivel de velocidades comerciales que se grafican muestran este fenómeno, no sólo en su forma sino que también en amplitud. No obstante lo anterior, se aprecia que el salto que se produce al pasar de T_1 a T_2 pareciera ser más significativo en términos de uso eficiente de los recursos, que el paso que se observa de T_2 a T_3 .

En el caso del diseño T_1 las velocidades que se observan son bastante limitadas, permitiendo transportar hasta alrededor de 300 pax/h en condiciones de velocidad en torno a 18 km/h con flujos cercanos a 70-80 beq/h. Notar que en estas condiciones, el aumento de flujo de buses empeora las condiciones de operación del corredor, desde un nivel en el cual los buses empiezan a estorbarse.

El caso T_2 logra niveles de servicio bastante superiores al caso anterior, pudiendo transportar para una misma velocidad de 18 km/h, alrededor de 600 pax/h con flujos de 80-100 beq/h. Nuevamente, flujos sobre 120 beq/h comienzan a producir disminución en la velocidad comercial para niveles de demanda sobre 200 pax/h; para rangos de demanda muy bajos, el nivel de servicio se mantiene más o menos estable independiente del flujo de buses que se considere (dentro de rangos razonables), lo cual muestra lo relevante que son los niveles de demanda y su distribución en el diseño de los corredores, principalmente debido a la variación en los tiempos de subida y bajada de pasajeros en las zonas de parada.

El perfil T_3 mejora aún más las condiciones de operación, alcanzando niveles de demanda de casi 800 pax/h por paradero para condiciones de operación de 18 km/h (flujos de 100 beq/h aproximadamente). En este perfil se observan condiciones de operación (demanda muy baja) en las cuales se pueden alcanzar velocidades comerciales altísimas (sobre 25 km/h). Se observa entonces, una mejora del nivel de servicio a medida que aumenta la capacidad vial asociada a los diseños, con un incremento aparentemente mayor de T_1 a T_2 que de T_2 a T_3 . Los niveles de demanda (considerando demanda homogénea distribuida a lo largo del corredor) que se pueden alcanzar se mueven entre 100 (en T_1) pax/h hasta 500 pax/h (en T_3), para alcanzar un nivel de servicio de 20 km/h de velocidad comercial en el tramo de corredor. Un primer resultado que se puede comenzar a vislumbrar es que los aumentos de capacidad en torno a las zonas de mayor congestión, en las cercanías de las zonas de parada producto de la transferencia de pasajeros (base conceptual del diseño T_2), es suficiente en una buena parte de los casos para absorber los incrementos de demanda en el corredor. Diseños T_3 son necesarios sólo en condiciones de muy alta demanda.

Respecto de la factibilidad y realismo de estas simulaciones, existen condiciones bajo las cuales los corredores son capaces de funcionar en el sentido de transportar un porcentaje alto de la demanda, a costa de ofrecer niveles de servicio pobres (velocidades comerciales del orden de 10 a 14 km/h). Lo anterior significa que los niveles de demanda mostrados en los gráficos de curvas de nivel son realistas considerando que la mayoría de los usuarios son capaces de transportarse durante el tiempo de simulación. En las figuras 12, 13 y 14 se aprecia los rangos de demanda servidos en cada combinación flujo (en beq/h) demanda (en pax/h) para cada diseño de corredor considerado.

Notar que en prácticamente todos los casos, la simulación es capaz de servir a más de un 80 % de la demanda, porcentaje que sube a más de 95 % para flujos de buses sobre 50 a 60 beq/h dependiendo del corredor.

Para efectos de comparación, los resultados anteriores se pueden fundir en las siguientes figuras, donde la idea es definir rangos de velocidad comercial de operación posibles con cada diseño según los resultados de las simulaciones.

Con estos esquemas que consideran traslape, se pueden obtener algunas conclusiones importantes:

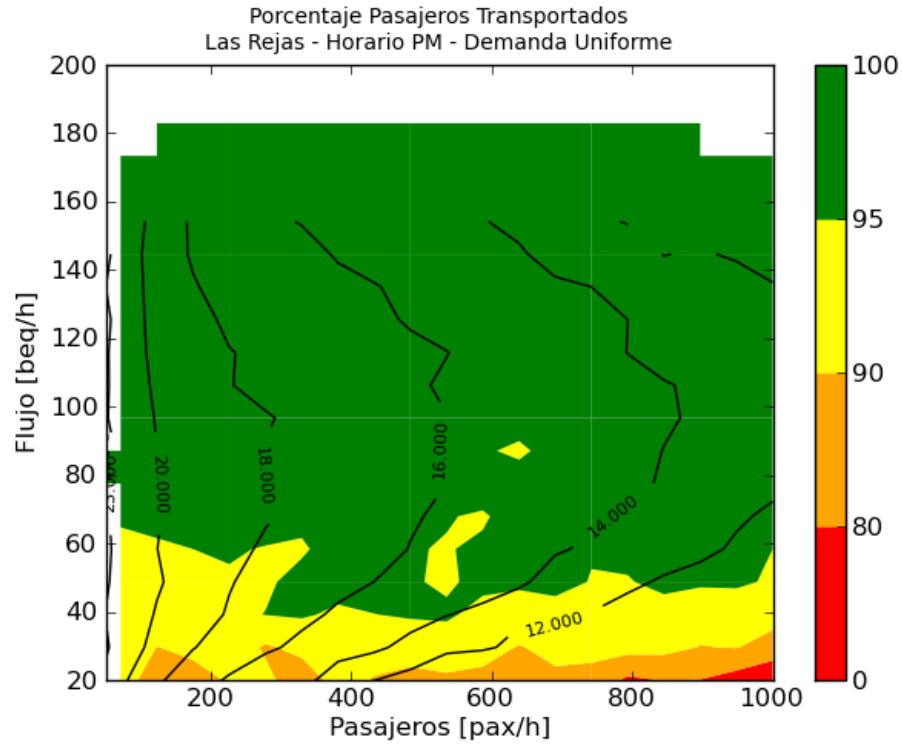


Figura 12: Porcentaje de pasajeros transportados, diseño T_1

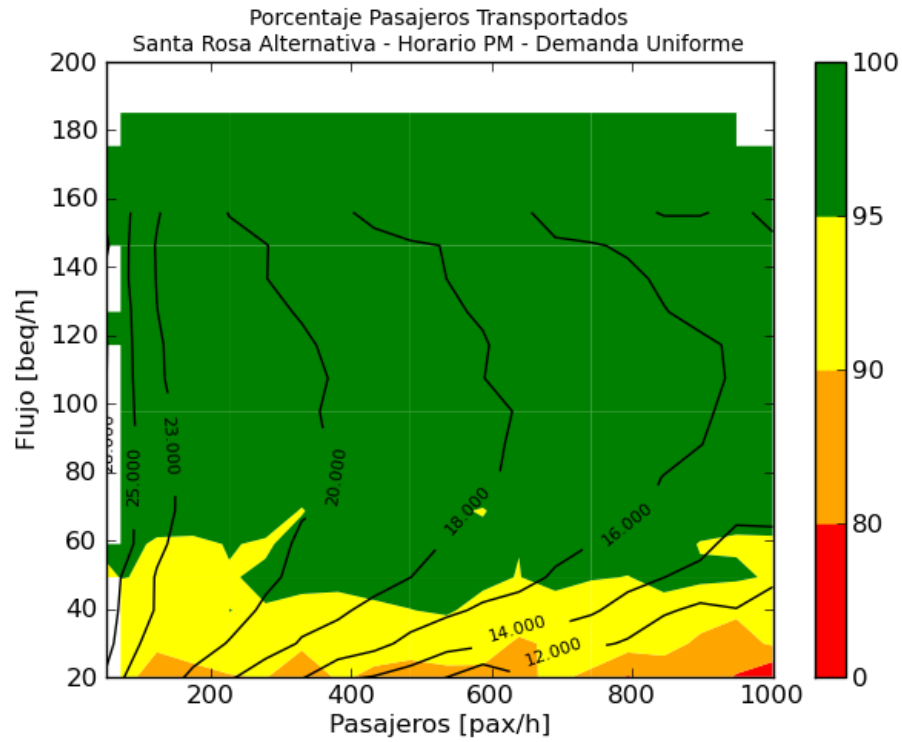


Figura 13: Porcentaje de pasajeros transportados, diseño T_2

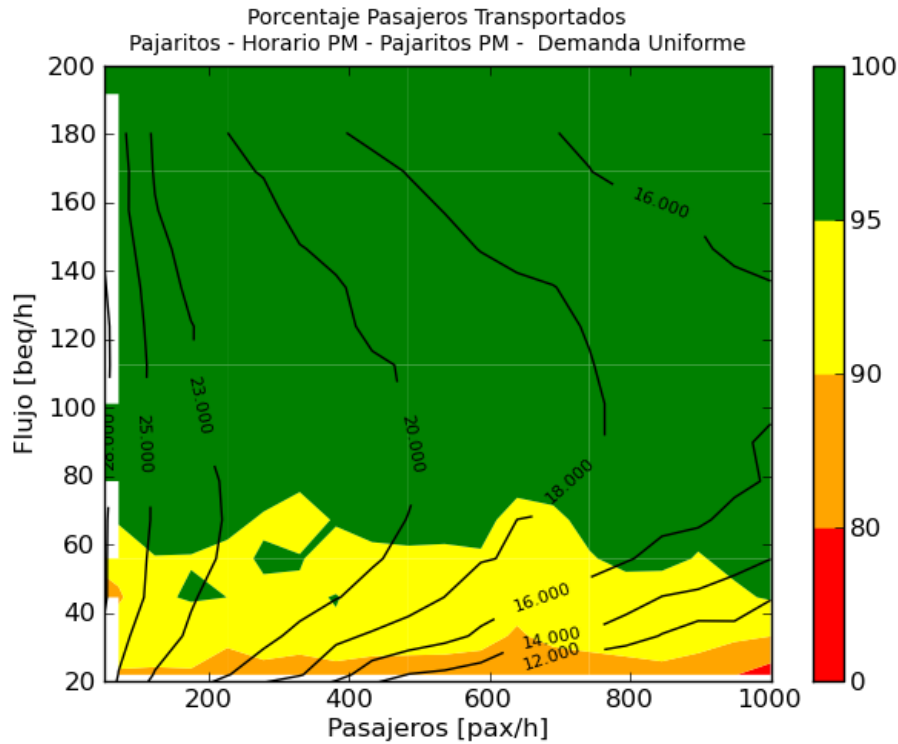


Figura 14: Porcentaje de pasajeros transportados, diseño T_3

- Se observa que las condiciones de operación muy buenas sólo son posibles de obtener a partir de los perfiles T_2 y T_3 . El perfil T_1 nunca alcanza estas condiciones de operación tan favorables.
- Existe un traslape importante en las condiciones de operación de los perfiles T_2 a T_3 . T_1 siempre queda fuera de rango. El traslape es importante, especialmente en el rango de velocidades 20-23 km/h.
- Los límites de las zonas de traslape (correspondientes a las curvas de nivel) son siempre curvas (sensibilidad oferta demanda), curvatura que se amplía enormemente en torno a valores altos de demanda (sobre 200 pax/h). Las demandas muy bajas muestran curvas de nivel bastante insensibles con respecto a los niveles de flujo inyectados. Las mayores curvaturas, y por ende mayores sensibilidades flujo-demanda se observan en rangos de velocidades 18-20 y 20-23 km/h, y en rangos de flujo entre 60 y 140 beq/h. La forma de las curvas muestra que flujos muy altos de buses en general empeoran las condiciones de operación, debido a que se comienzan a estorbar, mientras que valores muy pequeños de flujo tampoco son adecuados debido a que pueden servir sólo niveles muy bajos de demanda.
- Se puede pensar que niveles de demanda homogéneos de 300 a 400 pax/h por parada (lo cual es bastante alto considerando que este flujo es homogéneo en cada parada a lo largo de corredor) pueden ser servidos por corredores T_2 y T_3 , alcanzando niveles de servicio bueno de 20 a 23 km/h. Notar que el rendimiento de estos corredores está bastante restringido por los modelos de tiempo de transferencia de pasajeros TSP, que en todos los casos son operaciones tradicionales, y no consideran la implementación de zonas pagas.
- Es posible generar a partir de los resultados anteriores escenarios para los cuales se pueden

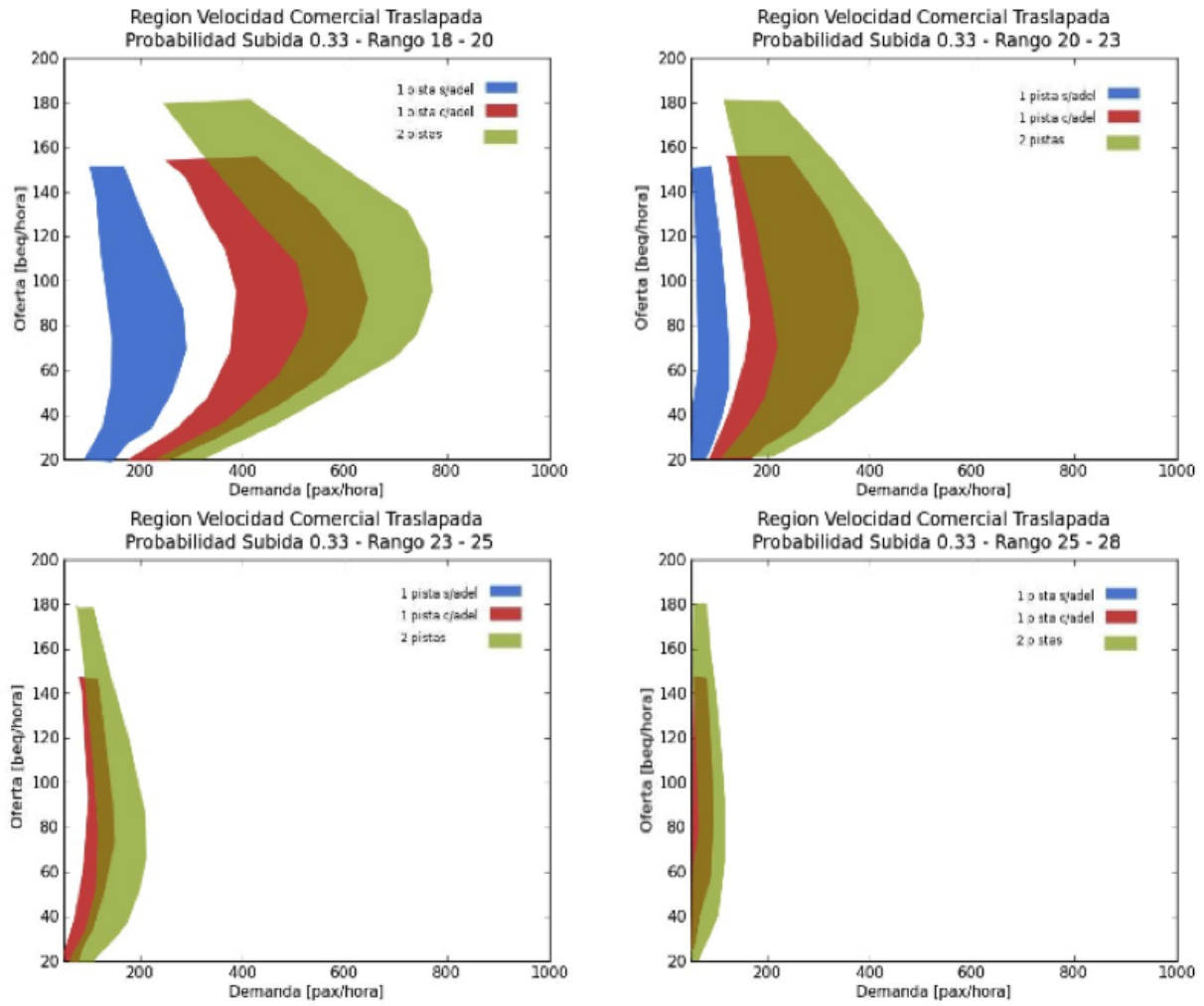


Figura 15: Resultados Agregados, Perfiles T_1 , T_2 y T_3

comparar directamente en los perfiles T_1 , T_2 y T_3 los rangos de demanda y flujos a distintos rangos de velocidades comerciales.

5.2. Sensibilidades de los Modelos

En esta sección se muestra parte de los análisis de sensibilidad que se llevaron a cabo con el modelo, concentrándose en la probabilidad de subida de los pasajeros (emulando la opción de tener líneas más exclusivas para hacer los recorridos versus muchas líneas que sirven para servir a todos los pasajeros esperando), así como en la composición de los buses.

Respecto a la Probabilidad de Subida de un Pasajero

Se realizaron simulaciones considerando que a un pasajero en el paradero le sirva un bus con una probabilidad de 0.33 (caso base), 0.50 y 1.00. En la Figura 16 se muestra los mantos de velocidades para el corredor T_1 (que es interesante por ser el más restringido) considerando los casos asociados a las tres probabilidades que se estudian, donde se grafica la trayectoria a lo largo de la curva de nivel para 18 km/h, y se computa adicionalmente los tiempos de espera promedio para cada configuración. Así, los gráficos que aparecen más a la derecha en la Figura 16 muestra el tiempo de espera promedio modelado (en segundos por pax) considerando las corridas que alcanzan las velocidades comerciales de 18 km/h. Los valores que aparecen en el eje de las abscisas de los gráficos de tiempos de espera, corresponden a la parametrización de la curva homogénea (0-1) comenzando en flujo de buses bajo el cual se incrementa hasta el máximo por tipo de corredor.

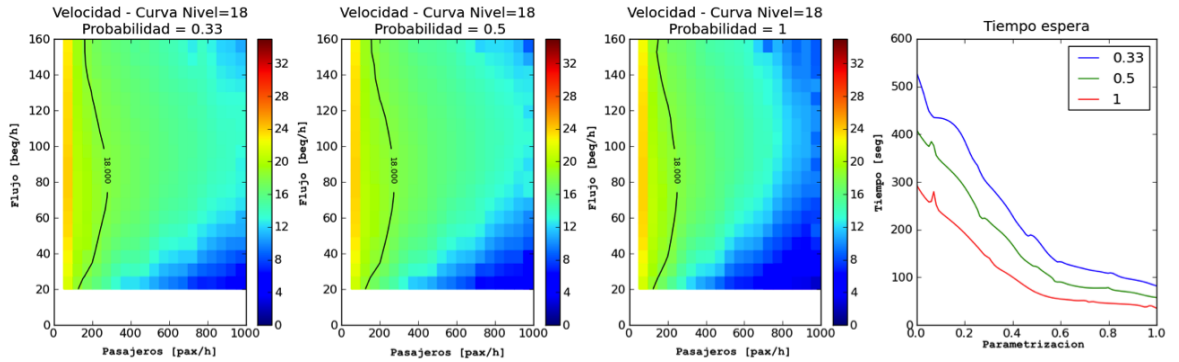


Figura 16: Sensibilidad Respecto a la Probabilidad de Subida

Se observa un comportamiento bastante esperable, pese a que las velocidades comerciales se mantienen más o menos constantes, a mayor probabilidad de subida (mas líneas sirven) los tiempos de espera se reducen. Por lo tanto, en todos los casos el efecto de generar recorridos más exclusivos (del estilo de los antiguos buses amarillos) es casi nulo en la velocidad comercial, pero es dramático en términos de tiempo de espera (que aumenta notablemente) en el caso de velocidad umbral de 18 km/h (comportamiento que se mantiene para umbrales mayores sobre 20 km/h). En el caso más favorable ($p = 1$), los tiempos de espera disminuyen a medida que los pasajeros pueden emplear más servicios.

Sensibilidad respecto a la composición de la flota

En esta sección se analiza un segundo análisis de sensibilidad que tiene relación con la distribución y composición de los buses, para lo cual nuevamente se escogió el corredor T_1 , debido a que los otros diseños no sufrían gran impacto producto de cambios radicales en composición de buses.

Adicionalmente, para poder entender mejor el efecto de la composición de flota en las demoras y rendimiento del sistema, se ha decidido probar con dos configuraciones extremas: sólo buses pequeños (Figura 17) operando, y sólo buses articulados en operación (Figura 18). Para que el ejercicio sea consistente, se comparan situaciones extremas de operación (demanda de 827 pax/h) y oferta similar (117 buses articulados versus 213 taxibuses, lo que prácticamente es equivalente términos de beq), ofreciendo niveles de servicio bastante bajos, pero siempre con porcentajes de traslado de pasajeros sobre un 95 % tal como se mencionó antes.

En este caso, se grafica la velocidad comercial pero considerando tramos muy pequeños de largo $\Delta X = 10$ metros, y computando la velocidad comercial a lo largo de cada eje. Ésta se grafica como función de la distancia desde el comienzo del corredor en el sentido de avance, y cada gráfico es paramétrico en flujo de buses y nivel de demanda. Se muestra la evolución de la velocidad comercial en su valor promedio, la desviación estándar, el valor máximo y el mínimo.

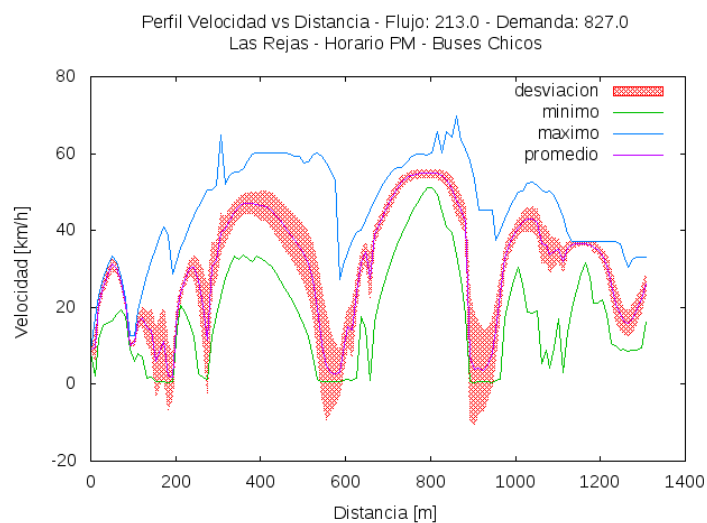


Figura 17: Perfil velocidad vs distancia: Taxibuses

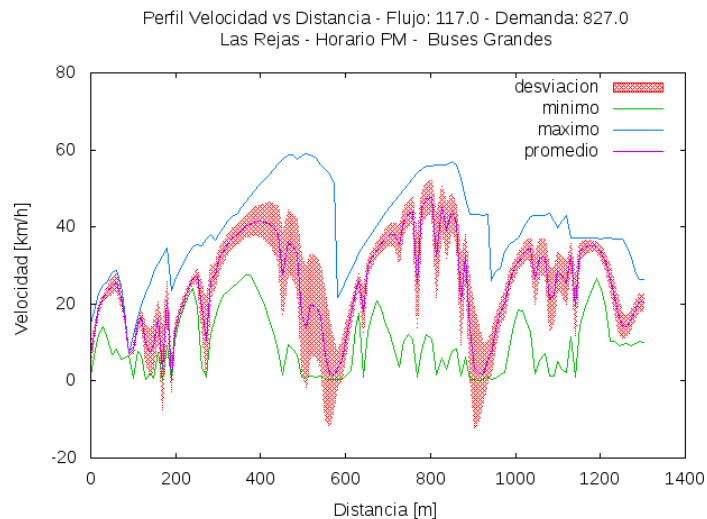


Figura 18: Perfil velocidad vs distancia: Buses Articulados

De estos perfiles de velocidad, se aprecia condiciones bastante más favorables para el caso de operar sólo con Taxibuses, en situaciones comparables. De hecho, la operación sólo con articulados genera congestión recurrente en muchos sectores a lo largo del corredor, producto de la poca flexibilidad y de las menores tasas de aceleración que alcanzan; este resultado reafirma el hecho de tener congestión por la operación producto solamente del tamaño de los buses, cosa que no ocurre en la operación con Taxibuses.

6. Conclusiones

Este artículo resume un trabajo de microsimulación de la operación de corredores exclusivos de buses, cuyo objetivo es tener una primera visión de los beneficios de distintos tipos de corredor para distintas condiciones de operación oferta-demanda. La motivación original fué la discusión que se ha generado en relación con algunos diseños implementados que parecen estar sobredimensionados al observar su operación actual. Dado que no es posible pronunciarse claramente acerca de diseños óptimos de corredores exclusivos por medio de metodologías tradicionales, es necesario recurrir a herramientas que entreguen una visión más detallada de las operaciones de aquellos dispositivos que impactan de manera relevante sobre la eficiencia en la operación. Este punto se hace importante considerando también las restricciones de fajas disponibles para implementar los corredores que se necesitan en el marco del Plan TranSantiago.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue utilizar y calibrar apropiadamente una herramienta de microsimulación construida ad-hoc, capaz de incorporar varios de los elementos que eventualmente podrían definir la oferta vial (en términos de capacidad de transporte) asociada a diferentes diseños de corredores segregados para transporte público de superficie, así como modalidades de operación en torno a las zonas de parada. La metodología final de esta etapa contempló seleccionar tramos de corredores que representan de la mejor forma posible corredores tipo, en particular T_1 (1 pista sin adelantamiento), T_2 (una pista con adelantamiento) y T_3 (dos pistas continuas), y se exigen en términos de oferta de buses y demanda de pasajeros, la cual se expande equiproporcionalmente en todos los paraderos del corredor. Además, se utilizó distribución de buses homogénea entre tipos. Los resultados obtenidos entregan un muy buen marco de análisis para tomar decisiones respecto de la factibilidad y eficiencia de proyectos de corredores exclusivos de transporte público, su diseño, configuración y características específicas propias de cada caso particular.

Independiente de las características propias de cada diseño particular, un primer resultado muy significativo es que los diseños de corredores que se componen de una pista por sentido sin adelantamiento son insuficientes y colapsan rápidamente ante aumentos tanto en el flujo de buses como en la intensidad de la demanda, reflejada por la llegada de pasajeros a los paraderos. La transición desde una pista sin adelantamiento (T_1) al caso de una pista con adelantamiento (T_2) genera muchos beneficios en términos de aumento de capacidad y mejoras en condiciones de operación (traslapes en Figura 15), entendida ésta como la posibilidad de alcanzar velocidades comerciales razonables, ofreciendo por lo tanto un buen nivel de servicio a los usuarios del sistema. Tal como es conocido en los estudios previos de operaciones de transporte público, la mayor parte de las demoras se produce en torno a las zonas de parada, donde se produce la transferencia de pasajeros. Agregar la opción de adelantamiento en los diseños de vías exclusivas agiliza la operación en torno a las zonas de parada y aumenta considerablemente la capacidad total del corredor, básicamente agregando capacidad en torno de aquellas áreas donde se producen los verdaderos cuellos de botella en la operación de estos sistemas. En el resto del corredor, debido a que la vía exclusiva evita la interacción de buses con el resto de los vehículos, la congestión producto del tráfico es prácticamente nula y una pista

continúa en los tramos entre paradas produce un movimiento fluido de los buses, incluso en casos donde los flujos de buses se incrementan considerablemente.

En parte debido a varias de las razones que se mencionan en el punto anterior, los beneficios adicionales que se obtienen al pasar de una pista con adelantamiento (T_2) a dos pistas continuas (T_3) no son muy significativos. De hecho, existen zonas importantes (especialmente para niveles de servicio en rangos 18-20 km/h y 20-23 km/h) donde el nivel de servicio para ambos tipos de perfiles es similar; en otras palabras, en general, un diseño bien pensado de corredor exclusivo para buses con una pista y adelantamiento es suficiente para soportar aumentos considerables tanto en flujo de buses como en la demanda de pasajeros (dentro de rangos razonables). Esto no invalida el buen funcionamiento de los perfiles de dos pistas por sentido, es sólo que a la luz de los experimentos realizados en este estudio, pareciera que tales diseños quedan sobredimensionados en la mayor parte de sus trayectos.

De las formas de las curvas, un elemento clave que se debe reconocer es que la restricción de capacidad se activa primero por los incrementos de demanda, y de manera mucho menos relevante producto de los aumentos en oferta. Este factor motiva a estudiar dispositivos que puedan hacer más fluida la operación de subida y bajada en paraderos, como son por ejemplo las zonas pagas. Una sensibilidad en la que se está avanzando actualmente es la modelación de zonas pagas; de resultados de simulación preliminares, se tiene una primera idea de las potenciales mejoras en las condiciones de operación de los corredores, las que parecen ser importantes. Un estudio más fino requiere hacer mediciones en terreno comparables de tasas de subida y bajada en zonas pagas e incorporarlas adecuadamente al simulador.

Se debe tener especial cuidado respecto de algunos factores que pueden distorsionar notoriamente los resultados de la modelación. En particular, la ubicación y programación de dispositivos de señalización y semáforos, ya sean para relacionarse con el tráfico normal o bien de prioridad para transporte público con programaciones especiales. Otros factores importantes que afectan también la operación del sistema fueron descubiertos mediante sensibilidades de estas simulaciones.

Pareciera razonable pensar que la microsimulación es una buena opción como herramienta de modelación para poder visualizar efectos del diseño en las condiciones de operación de corredores exclusivos, considerando la operación entre trayectos, y con especial énfasis en torno y dentro de las zonas de parada. En el futuro, a partir de herramientas de este tipo, es posible incorporar en el análisis de capacidad el uso de estrategias de control y de planificación para transporte público, tales como retención de vehículos, salto de estaciones, variación en velocidad, adelantamiento, etc. Todas estas extensiones pueden ser agregadas con motores de optimización conectados vía API.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el estudio SECTRA-Universidad de Chile “Análisis y validación de criterios de diseño en áreas de paraderos de Transporte Público mediante Microsimulación”. Además, se agradece los aportes adicionales de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ICM P-05-004-F, CONICYT FBO16), del Programa Bicentenario de Ciencia y Tecnología (PBCT) y de Fondecyt (proyecto 1100239).

Referencias

- B. Abdulhai, A.S. Shalaby, and A. Georgi. Microsimulation modelling and impact assessment of streetcar transit priority options: The toronto experience. *Proceedings of the 81st TRB Annual Meeting. Transportation Research Board. Washington D. C.*, 2002.
- S. Chien, S. Chowdhury, K. Mouskos, and Y. Ding. Enhancements of corsim model in simulating operations. *Journal of Transportation Engineering*, 126(5):396–404, 2000.
- CE. Cortés, V. Burgos, and R. Fernández. Modelling passengers, buses and stops in traffic microsimulation: Review and extensions. *Journal of Advanced Transportation*, 44:1–17, 2010.
- CE. Cortés, J. Gibson, A. Gschwender, M. Munizaga, and M. Zúñiga. Commercial bus speed diagnosis based on gps-monitored data. *Transportation Research C*, 19(4):695–707, 2011.
- A. Didier, JC. Muñoz, R. Giesen, and CE. Cortés. Calibración y simulación de un corredor de transporte público en microsimulador de tráfico para santiago. *Aceptado en Ingeniería de Transporte*, 2011.
- R. Fernández. Modelling public transport stops by microscopic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(6):856–868, 2010.
- R. Fernández, CE. Cortés, and V. Burgos. Microscopic simulation of transit operations. the mis-transit application programming interface (api). *Transportation Planning and Technology* 33(2), 157-176, 2010a.
- R. Fernández, P. Zegers, G. Weber, and N. Tyler. Influence of platform height, door width and fare collection on bus dwell time. laboratory evidence for santiago de chile. *Proceedings of the 89th TRB Annual Meeting, CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.*, 2010b.
- FHWA. Corsim user manual. *Version 1.01. Federal Highway Administration, Washington D.C.*, 1996.
- N. Inga. Integration of a center-running guided busway into an arterial street. *VISSIM User Group Meeting. Seattle*, 2001.
- W. Kim and L.R. Rilett. An improved transit signal priority system for networks with nearside bus stops. *Proceedings of the 84th TRB Annual Meeting, CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.*, 2005.
- J. Lee, A. Shalaby, J. Greenough, M. Bowie, and S. Hung. Advanced transit signal priority control using on-line microsimulation-based transit prediction model. *Proceedings of the 84th TRB Annual Meeting, CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.*, 2005.
- MY. Li, Y. Yin, K. Zhou, W. Zhang, H. Liu, and C. Tan. Adaptive transit signal priority on actuated signalized corridors. *Proceedings of the 84th TRB Annual Meeting, CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.*, 2005.
- L.A Lindau. High-flow bus operation on urban arterial roads. *PhD Thesis, University of Southampton*, 1983.

- R. Liu. Dracula traffic model user manual, version 2.0. *Institute for Transport Studies, University of Leeds*, 2003.
- PTV. Vissim user manual, version 3.7. *Planung Transport Verkehr*, 2003.
- Quadstone. Quadstone paramics v5.0. modeller user guide. *Quadstone Ltd.*, 2004.
- TSS. Getram/aimsun user manual, version 4.2. *Transport Simulation Systems*, 2004.
- Venglar, Fambro, and Bauer. Validation of simulation software for modeling light rail transit. *Transportation Research Record*, 1494:161–166, 1995.