

INFRAESTRUCTURA DEDICADA PARA BUSES Y CALIDAD DEL SERVICIO: EL CASO DE SANTIAGO, CHILE

Vicente Valdivieso

School of Industrial Engineering, Diego Portales University, Santiago de Chile.
FONO: (56-9) 8233 9483; e-mail: vicente.valdivieso@mail.udp.cl

Felipe González

School of Industrial Engineering, Diego Portales University, Santiago de Chile.
FONO: (56-2) 2213 0468; e-mail: felipe.gonzalezr@udp.cl

Louis de Grange

School of Industrial Engineering, Diego Portales University, Santiago de Chile.
FONO: (56-2) 2213 0469; e-mail: louis.degrange@udp.cl

Rodrigo Troncoso

Facultad de Gobierno, Universidad del Desarrollo, Santiago de Chile
FONO: (56-2) 2327 9859; e-mail: rtroncoso@udd.cl

RESUMEN

En este trabajo realizamos un análisis empírico para cuantificar el impacto de diferentes variables de diseño sobre la calidad de servicio del sistema de transporte público de superficie en Santiago de Chile, en particular sobre tres indicadores: la velocidad promedio durante el recorrido, el coeficiente de variación del tiempo de viaje de los servicios, y el coeficiente de variación de los tiempos entre buses. Para ello usamos datos de operación para los todos los recorridos de los distintos operadores del sistema de buses denominado Transantiago, y estimamos diferentes modelos de regresión lineal múltiple definiendo como variable explicada cada uno de los tres indicadores de nivel de servicio definidos. Como variables explicativas usamos distintas variables de diseño y operación del sistema; incluimos también variables de control asociadas al número de paraderos, subidas de pasajeros y al nivel de congestión de distintos tramos a lo largo del recorrido. Encontramos que la utilización de infraestructura dedicada para buses impacta de forma positiva en cada uno de los tres indicadores de calidad de servicio. De la misma forma, la utilización de autopistas urbanas por parte de servicios expresos de buses incrementa significativamente la velocidad promedio de tales servicios. Obtenemos también que la variabilidad de los tiempos entre buses a la salida de los terminales, que depende de la gestión de los operadores, corresponde a la principal variable explicativa de la variabilidad de los tiempos entre buses al final del recorrido.

Keywords: sistema de buses, calidad de servicio, velocidad, variabilidad, frecuencia, infraestructura, Transantiago, regresión lineal múltiple.

1 INTRODUCCIÓN

Existen diversos factores que determinan el nivel y calidad de servicio de un sistema de transporte público de buses, como por ejemplo el tiempo de viaje de un recorrido o servicio, la frecuencia y la regularidad, el confort, nivel de hacinamiento, etc. Algunos de estos factores están relacionados con el diseño de la red y la infraestructura que la soporta, aunque también existen otros asociados a la demanda y la congestión en la red de transporte (Abkowitz and Engelstein, 1983; Basso et al., 2011; dell'Olio et al., 2011; Gibson et al., 2016; Strathman and Hopper, 1993; Tirachini, 2011; Tirachini et al., 2013; Zheng et al., 2012).

En este trabajo presentamos un análisis empírico para cuantificar el impacto de algunas de las principales variables de diseño de un sistema de buses, sobre tres indicadores de calidad de servicio: velocidad promedio durante el recorrido, coeficiente de variación del tiempo de recorrido, y coeficiente de variación de los tiempos entre buses de un mismo servicio. Los datos usados corresponden al sistema de buses de la ciudad de Santiago de Chile, denominado Transantiago.

El sistema de transporte público de Santiago de Chile (Transantiago) es operado por siete empresas de buses concesionarias, además del Metro, los que están integrados tanto física como tarifariamente. El sistema de buses de Transantiago cubre alrededor de 5 millones de usuarios distribuidos en los cerca de 680 km² de áreas urbanas de la ciudad. Durante un día laboral típico se realizan más de tres millones de viajes en el sistema. A julio de 2016, el sistema de buses se compone de aproximadamente 6,500 buses que realizan cerca de 800 servicios o rutas diferentes, los cuales circulan por la red vial y algunos de ellos usan infraestructura exclusiva para buses o tramos de las autopistas concesionadas de alta velocidad existentes en la ciudad.

El sistema cuanta con aproximadamente 11.000 paraderos convencionales y 100 paraderos del tipo “zona-paga”. Estos últimos operan en periodos punta en lugares de alta demanda, y el pasajero debe pagar su pasaje al momento de ingresar a la zona del paradero, a diferencia de los paraderos normales en los cuales el pasajero paga arriba del bus. Adicionalmente, el sistema Transantiago dispone de infraestructura pública dedicada para los buses durante parte de los trayectos de algunos servicios. Hay tres tipos de infraestructura dedicada: i) pistas solo bus, ii) corredores segregados de buses y iii) vías exclusivas. Las pistas solo bus se ubican al lado derecho de la vía y son reservadas, en todo momento, para buses de transporte público, aunque permiten también la circulación de taxis que lleven pasajeros. Los corredores segregados de buses están físicamente segregados del resto de la calzada, y solo permiten la circulación de buses de transporte público. Finalmente, las vías exclusivas son calles que, en determinados horarios, permiten el tránsito únicamente de buses de transporte público y taxis, lleven o no pasajeros. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo de pista solo bus. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo de corredor de buses.



Figura 1: Pista solo bus de Av. Vespucio.
Fuente: Google Street View.



Figura 2: Corredor de buses de Av. Grecia
Fuente: Google Street View.

Usando datos proporcionados por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) disponibles en su página web¹, construimos diferentes modelos de regresión lineal múltiple para cada uno de los tres indicadores de calidad de servicio definidos, con el objetivo de cuantificar el impacto que cada una de las variables o atributos del recorrido genera sobre el respectivo indicador de calidad de servicio. Encontramos que la utilización de infraestructura dedicada impacta de forma positiva en cada uno de los tres indicadores de calidad de servicio. Por otro lado, la utilización de autopistas incrementa la velocidad promedio de recorrido, pero aumenta la variabilidad del tiempo de recorrido y de los tiempos entre buses. Encontramos también que gran parte de la irregularidad del servicio está condicionada por la variabilidad de los tiempos entre buses a la salida de sus terminales (al inicio del recorrido).

El resto de este artículo se divide en cinco Secciones. En la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** realizamos una revisión bibliográfica de estudios previos sobre indicadores de calidad de servicio y los principales factores que explican dichos indicadores, proporcionándonos un conjunto de datos de referencia para comparar y contrastar con nuestros resultados. En la sección 3 describimos los datos usados y las variables incluidas en nuestros modelos, así como su proceso de generación y sus principales estadígrafos. En la sección 4 presentamos los resultados de los modelos estimados para cada uno de los tres niveles de servicio considerados. Finalmente, en la sección 5 presentamos las principales conclusiones obtenidas a partir de este trabajo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El alcance de esta investigación está estrechamente relacionado con 2 líneas de investigación, que son: el estudio de la calidad de servicio de un sistema de buses y sus métricas, y el estudio de los factores que inciden en los indicadores de calidad servicio (por ejemplo tiempo de viaje y su variabilidad).

¹ <http://www.dtpm.cl>

La calidad de servicio se puede definir como un conjunto de atributos que permiten medir la eficiencia y efectividad de un servicio de buses y su operación (Botzow, 1974; Hensher et al., 2003; Paulley et al., 2006; Liou et al., 2014). Dichos atributos abarcan distintos aspectos siendo los más comunes el tiempo de viaje de un recorrido y su variabilidad (service reliability), la tarifa, la comodidad (confort) y la seguridad al interior y exterior del vehículo. Muchos de estos atributos pueden ser influenciados por los operadores y/o por las autoridades, y la mejora de la calidad de servicio puede tener un efecto positivo importante en la disposición de los usuarios al momento de escoger el transporte público por sobre el transporte privado (Paulley et al., 2006; Litman, 2008; dell'Olio et al., 2010; Lin and Yang, 2011; Winters et al., 2011; Redman et al., 2013; Durán-Hormazábal and Tirachini, 2016).

Por esta razón, muchas agencias de transporte público han desarrollado diversos indicadores para medir la calidad y consistencia del servicio ofrecido a los usuarios, incluyendo on-time performance, headway adherence, and running time adherence (Becker and Albers, 2016; Lin et al., 2008; Nakanishi, 1997).

En Hensher et al. (2003) se investigan formas de cuantificar la calidad de servicio de sistemas de buses, identificando la importancia relativa de diversas variables en la calidad de servicio percibida por los usuarios. De sus resultados se desprende que los atributos usualmente considerados por los usuarios que tienen un mayor peso relativo son el estar sentado durante todo el trayecto, la frecuencia de los buses, el tiempo recorrido y la tarifa. En dell'Olio et al. (2011) se identifican las variables más importantes para los usuarios al momento de evaluar los niveles de servicio de un sistema público de buses. Usando información proveniente de usuarios del transporte público en la ciudad de Santander, España, concluyen que las variables regularidad y tiempo de espera alcanzan un peso combinado del 51% en la evaluación global del servicio; además destacan que otras variables relevantes consideradas por los usuarios son: tiempo de viaje, la limpieza y la comodidad del bus.

En relación al service reliability, diversos estudios consideran que la variabilidad del tiempo de viaje y del tiempo de espera (headway) son factores considerados por los usuarios al momento de decidir en qué modo de transporte viajar, y por lo tanto han hecho intentos por cuantificarlo (Bates et al., 2001; Li et al., 2010; Kouwenhoven et al., 2014; Ramos et al., 2014). De acuerdo a Tirachini et al. (2014) la regularidad en el transporte público es aún más importante que en el caso del automóvil, debido principalmente a tres razones: primero, hay interacción entre vehículos y pasajeros en los paraderos; segundo, la variabilidad en los tiempos de viajes también afecta al tiempo de espera de los usuarios; y tercero, la incertidumbre en los tiempos de viaje también representan un costo adicional a los operadores del servicio. Para medir dicha variabilidad, en Pu (2011) concluyen que usar el coeficiente de variación, en lugar de la desviación estándar, es un buen proxy para varias medidas de regularidad propuestas en la literatura (FHA, 2010; Lomax et al., 2003; Lyman and Bertini, 2008).

Respecto a los factores que explican la variabilidad en los servicios, varias investigaciones identifican que el largo de la ruta es uno de los factores más importantes, seguido por la frecuencia del servicio y la existencia de infraestructura dedicada (Abkowitz and Engelstein, 1983; Strathman et al., 1999; El-Geneidy et al., 2006; Chen et al., 2009).

En particular, Abkowitz and Engelstein (1983) encuentran que el tiempo medio de viaje está fuertemente influenciado, además de la distancia de viaje, por las intersecciones señalizadas y la gente que sube y baja del vehículo. Además muestran que la desviación del tiempo de viaje en los puntos iniciales de la ruta se propaga a medida que el vehículo avanza en su ruta.

Strathman and Hopper (1993) realizan un análisis empírico de los factores que afectan el desempeño del sistema de buses de Portland, USA, en términos de regularidad. Estiman un modelo logit multinomial y muestran que la probabilidad de un menor desempeño en términos de regularidad aumenta en periodos punta con mayores niveles de demanda. Strathman et al. (1999), considerando el mismo sistema de buses anterior, se focalizan en el estudio de la regularidad del servicio de transporte público de Portland, considerando entre otros aspectos la regularidad del tiempo de viaje y la frecuencia. Los autores concluyen que los servicios que operan en hora punta presentan una demora sistemática de alrededor de 2 minutos adicionales en comparación con el resto de viajes; el número de paradas también afecta la regularidad, incrementándose la demora de los recorridos entre 5 a 10 segundos por cada parada adicional. Además concluyen que rutas más largas experimentan más demoras, cada milla adicional añade aproximadamente un 1 minuto de demora. Ninguno de los modelos estimados reflejó que el número de pasajeros que suben al bus o el número de intersecciones semaforizadas afecta a la regularidad.

En la misma línea, Chen et al. (2009) presentan un análisis de la regularidad del servicio basado en las características operativas del sistema de buses de Beijing. Definen tres índices para medir la regularidad de los servicios basados principalmente en el cumplimiento de los horarios programados y la frecuencia observada en los paraderos. Encuentran que existe una alta correlación entre la regularidad del servicio y el largo de la ruta (rutas mayores a 30 km. presentan menores índices de regularidad), distancia entre el terminal de origen y los paraderos (mientras mayor es la distancia al terminal de origen se obtienen peores son los índices de regularidad), y la disponibilidad de carriles exclusivos (la existencia de carriles exclusivos incrementa los indicadores de regularidad entre un 10 a un 30%).

Mazloumi et al. (2010) investigan la variabilidad día a día del tiempo de viaje en los sistemas públicos de buses, utilizando información agregada obtenida mediante GPS de una ruta de bus en Melbourne, Australia. Se aplica un modelo de mínimos cuadrados ordinarios, identificando que las principales variables que contribuyen a la variabilidad del tiempo de viaje son el uso del suelo, el largo de la ruta, el número de señales de tráfico, el número de paradas y el atraso en la partida del recorrido respecto su planificación.

Finalmente Surprenant-Legault and El-Geneidy (2011), utilizando información proveniente de sistemas de rastreo vehicular automático (AVL, por sus siglas en inglés) del sistema de buses de Montreal, en Canadá, evalúan el impacto de las pistas reservadas solo para buses en los tiempos de viaje y sus desempeños on-time (a tiempo). Concluyen que, producto de la utilización de las pistas de buses, se generan ahorros de entre 1,3% y 2,2% en el tiempo de viaje. Por otro lado, la probabilidad de llegar a tiempo aumenta en un 65%.

3 DATOS

La información utilizada para estimar los modelos propuestos en este trabajo los obtuvimos a partir de los indicadores de operación calculados por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DPTM). Esta información consiste en horarios de inicio y término de recorrido, distancia del recorrido, paraderos en los cuales se detienen los servicios, y tiempo entre buses al inicio y al final del trayecto para cada uno de los recorridos de los distintos servicios realizados por buses de Transantiago durante julio de 2016.

Definimos la unidad de análisis (o unidad experimental del modelo) a partir del conjunto de datos para cada servicio, durante los periodos punta del día (6:30 a 9:30, y de 17:30 a 20:30 hrs), durante los días laborales de la semana.

A partir de la información disponible, como indicadores de calidad de servicio definimos:

- **Velocidad de Buses:** es la velocidad promedio del recorrido. Se asocia al tiempo promedio de viaje del recorrido, normalizado por su distancia. Trabajando con velocidades, en vez de tiempos de recorrido, es posible comparar el desempeño de recorridos o servicios de distinta longitud.
- **CV Tiempos de Viaje:** es el coeficiente de variación del tiempo del recorrido. Captura la variabilidad del tiempo de recorrido, normalizado por el valor esperado del mismo.
- **CV Tiempos entre Buses (final):** es el coeficiente de variación del tiempo entre buses (intervalo) al final del recorrido. Captura la variabilidad del tiempo entre buses de un mismo servicio, normalizado por el valor esperado del mismo. Resulta un buen proxy de la variabilidad del tiempo de espera en paradero que experimentan los pasajeros del sistema de buses.

Estas tres variables fueron consideradas como variables explicadas en nuestros modelos. Como variables explicativas para los modelos, consideramos de dos tipos: variables de control y variables de diseño que nos interesa evaluar:

- **Distancia:** es la longitud del recorrido, expresada en kilómetros (variable de control).
- **Velocidad de Autos:** es la velocidad promedio de los autos en hora punta en los distintos distritos de la ciudad que atraviesa el recorrido, obtenida de la georreferenciación de rutas y de velocidades comunales promedio de los autos durante las horas punta (variable de control).
- **Nº de Paraderos:** es la cantidad de paraderos a lo largo de cada recorrido (variable de control). En estos paraderos, los pasajeros pagan al subir al bus.
- **Nº de Zonas Pagas:** es la cantidad de paraderos tipo zona-paga a lo largo de cada recorrido (variable de control). En estos paraderos, los pasajeros pagan al ingresar a la zona paga, antes de subir al bus.

- **Subidas:** es la cantidad promedio de pasajeros que suben en cada paradero (variable de control).
- **CV Tiempos entre Buses (inicio):** es el coeficiente de variación de los tiempos entre buses al comienzo del recorrido (variable de control).
- **Km de Autopistas Urbanas:** es la distancia recorrida por cada servicio de buses dentro de las autopistas urbanas de la ciudad, expresada en kilómetros (variable de diseño).
- **Km de Corredores Segregados:** es la distancia recorrida por cada servicio de buses dentro de corredores segregados dentro la ciudad, expresada en kilómetros (variable de diseño).
- **Km de Vías Exclusivas:** es la distancia recorrida por cada servicio de buses dentro de las calles definidas como vías exclusivas dentro la ciudad, expresada en kilómetros (variable de diseño).
- **Km de Pistas Sólo Buses:** es la distancia recorrida por cada servicio de buses dentro de las calles definidas como pistas sólo bus dentro la ciudad, expresada en kilómetros (variable de diseño).
- **Variables dummies:** variables dummies temporales, tanto para los distintos días de la semana, como para los distintos periodos horarios (variables de control).

Tanto la distancia recorrida dentro de autopistas, como la extensión de infraestructura dedicada para cada recorrido (corredores segregados, vías exclusivas y pistas sólo bus), fueron obtenidas a partir de información georreferenciada. El número de subidas lo consideramos como variable de control para capturar efectos de la demanda por el servicio, mientras que la velocidad de los autos en hora punta sirve de control para capturar los efectos de la congestión existente en diferentes tramos de la ruta de un recorrido de buses. El coeficiente de variación de los tiempos entre buses al comienzo del recorrido, en tanto, captura la responsabilidad de los operadores en el indicador de nivel de desempeño.

En la Tabla 1 presentamos un resumen de los principales estadísticos de las variables utilizadas. En la Figura 1 muestra la superposición de las capas de información correspondientes a: recorridos de buses del sistema analizado (Transantiago), las vías exclusivas, corredores de buses, pistas solo bus y autopistas urbanas.

Variable	Media	Desv. Estándar	Min	Max
Velocidad de Buses	12.9086	1.4486	8.3817	16.268
CV Tiempos de Viaje	0.8398	0.3871	0.0756	3.918
CV Tiempos entre Buses (final)	0.7294	0.2274	0	2.535
Distancia	17.3724	8.6951	3.7300	57.340
Velocidad de Autos	21.4513	4.7230	8.2345	52.443
N° de Paraderos	47.4165	24.3444	2	126
N° de Zonas Pagas	0.4561	0.8493	0	8
Subidas	672.8605	754.6183	2.5907	5,950.654
CV Tiempos entre Buses (inicio)	0.4953	0.1956	0	1.530
Km de Autopistas Urbanas	0.7537	2.6907	0	22.306
Km de Corredor Segregado	1.3089	2.7296	0	15.944
Km de Vías Exclusivas	0.5728	1.5705	0	11.191
Km de Pistas Solo Bus	2.8312	4.4040	0	32.494

Tabla 1: Resumen estadísticos variables (N = 13,017).

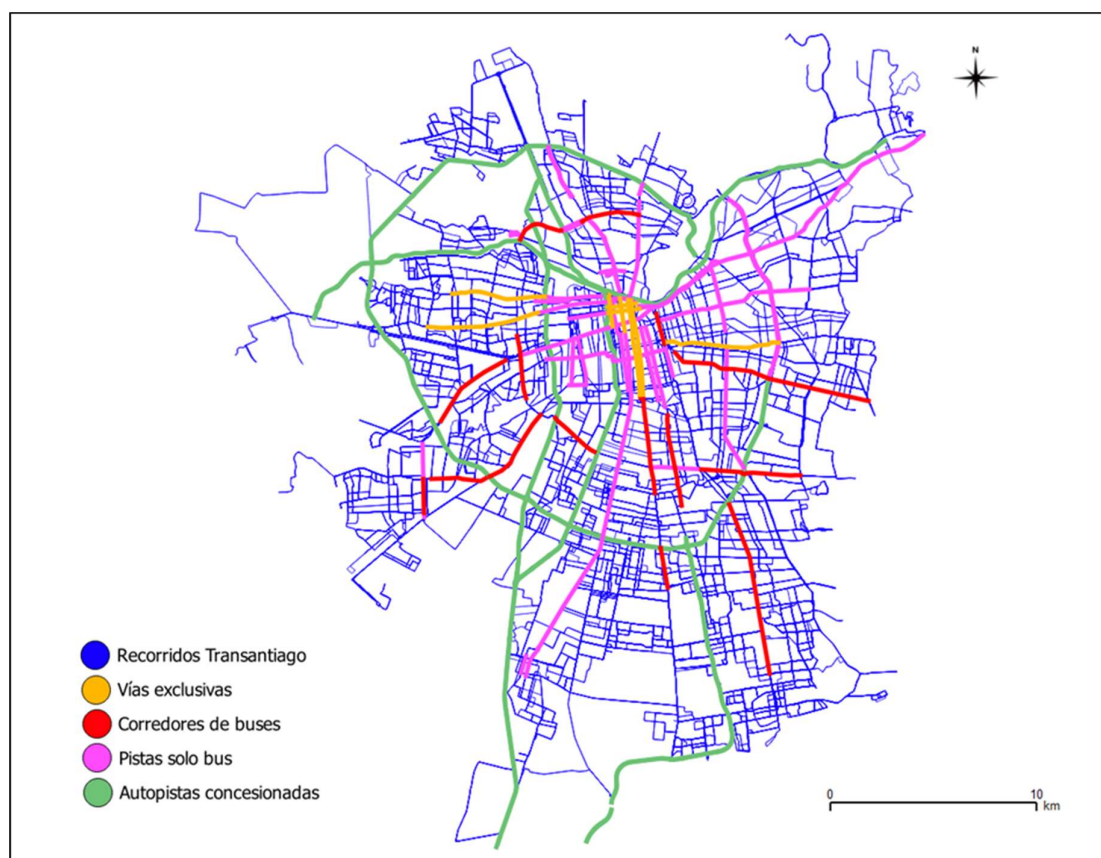


Figura 1: Recorridos Transantiago y vías especiales.

4 MODELOS Y RESULTADOS

Para estudiar el impacto de distintas variables de diseño y control del sistema de buses para cada nivel de servicio considerado (velocidad del recorrido, coeficiente de variación del tiempo de recorrido y coeficiente de variación del tiempo entre buses) formulamos distintas especificaciones de modelos de regresión lineal múltiple. La especificación general de los modelos es de la forma:

$$y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde y_i corresponde al valor de la variable dependiente para la unidad experimental i ; x_{ki} al valor de la variable explicativa k (expuestas en la Tabla 1) para la observación i ; β_0 y β_k corresponden a los parámetros del modelo. La estimación de los modelos la realizamos mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios, y los errores estándar los estimamos usando la matriz de varianzas y covarianzas robusta a la heteroscedasticidad, esperable por los distintos tamaños de los recorridos.

En las siguientes secciones presentamos las distintas especificaciones de los modelos estimados, omitiendo las variables dummies temporales para facilitar la lectura de las tablas.

4.1 Velocidad promedio de los buses en el recorrido

En la Tabla 2 presentamos los resultados del modelo de regresión lineal para explicar la velocidad promedio de los buses durante el recorrido.

Variable	Parámetro	Test-t
Km de Corredor Segregado	0.1336733	15.26
Km de Vías Exclusivas	0.006667	0.45
Km de Pistas Solo Bus	0.0529487	8.08
Km de Autopistas Urbanas	0.8517948	50.80
Velocidad Autos	0.4640152	22.04
Nº de Subidas	-0.0012069	-20.47
Nº de Paraderos	-0.0197235	-10.32
Nº de Zonas Pagas	-0.3400306	-8.70
Nº de Observaciones	13,017	
R2	0.4512	

Tabla 2: Modelos para velocidad promedio durante el recorrido.

Observamos que la existencia de corredores segregados aumentan significativamente la velocidad promedio de los buses; específicamente, si se aumentan 10 km de corredor segregado durante el trayecto realizado, la velocidad promedio de todo el recorrido aumentará en 1,33 km/h. Respecto a las pistas sólo Bus observamos un efecto similar, estadísticamente significativo, pero menor en magnitud. En el caso de las vías exclusivas, el signo estimado es también positivo, pero su significancia estadística es baja.

Por otra parte, las autopistas aumentan notoriamente la velocidad promedio de los buses; específicamente, si se aumentan 10 km de autopistas durante el trayecto realizado, la velocidad promedio de todo el recorrido aumentará en 8,51 km/h. Este mayor valor se debe a que las autopistas presentan muchos menos cruces e intersecciones que los corredores segregados de buses, vías exclusivas y pistas solo bus. En el caso de Santiago, algunos trayectos de autopistas urbanas son usados por servicios expresos de buses, que presentan un buen nivel de servicio.

Finalmente, se observan interesantes efectos de las variables de control. Primero, todas resultaron ser estadísticamente significativas. En el caso de la velocidad de los autos, el parámetro es positivo, lo que parece consistente: mientras mayor sea la velocidad de los autos en un sector, mayor será la velocidad de los buses en el mismo sector. El número de subidas es negativo, al igual que el número de paradas y de zonas pagas. Esto se debe a que a mayor demanda, mayor será el número de detenciones durante el trayecto, y mayor será el tiempo de detención, reduciendo con ello la velocidad promedio de los Buses durante el trayecto.

4.2 Coeficiente de variación del tiempo de viaje en el recorrido

Los resultados de los modelos de regresión lineal para explicar el coeficiente de variación del tiempo de recorrido se presentan en la Tabla 3.

Variable	Parámetro	Test-t
Km de Corredor Segregado	-0.0241053	-17.85
Km de Vías Exclusivas	-0.0117829	-6.08
Km de Pistas Solo Bus	-0.0055397	-6.54
Km de Autopistas Urbanas	0.0098538	4.76
Velocidad de Buses	-0.0329243	-36.16
Velocidad de Autos	-0.0186777	-10.94
Distancia	0.0349049	26.61
N° de Subidas	0.0000582	9.92
N° de Paraderos	-0.0080132	-21.77
N° de Zonas Pagas	-0.0365445	-11.82
N° de Observaciones	13,017	
R2	0.4699	

Tabla 3: Modelos para coeficiente de variación del tiempo de recorrido.

De la Tabla 3 es posible concluir que los tres tipos de infraestructura dedicada para los buses (corredores segregados, vías exclusivas y pistas sólo bus) reducen la variabilidad de los tiempos de viaje, en particular el corredor segregado. Por otra parte, se observa que las autopistas urbanas tienden a aumentar levemente (pero estadísticamente significativo) la variabilidad de los tiempos de viaje. Esto puede explicarse simplemente porque en las autopistas urbanas el paso de una situación sin congestión a una situación con alta congestión es más brusco y menos gradual que en la vialidad convencional.

También se confirma que los recorridos más largos tienden a tener mayor variabilidad en los tiempos de viaje. Lo mismo una mayor cantidad de pasajeros (subidas); esto último posiblemente porque se traspasa la variabilidad de la demanda a la operación, generando un efecto multiplicativo en las variabilidades.

Los paraderos reducirían la variabilidad de los tiempos de viaje, debido principalmente a que obligan a detenerse a los buses, evitando diferencias significativas de velocidad a lo largo del trayecto. Las zonas pagas también reducirían la variabilidad en el tiempo de viaje; en este caso, la razón sería que muchos de estos lugares son usados como puntos para regular las frecuencias de Buses.

Otras variables de control, como velocidad de autos y de buses, presentan signo negativo. Es decir, mientras mayor sea la velocidad promedio del sistema, menor será la variabilidad en los tiempos de viaje.

4.3 Coeficiente de variación del tiempo entre buses

En la Tabla 4 presentamos los resultados de los modelos de regresión lineal para explicar el coeficiente de variación de los tiempos entre buses al final del recorrido.

Variable	Parámetro	Test-t
Km de Corredor Segregado	-0.0009761	-1.78
Km de Vías Exclusivas	0.0004826	0.61
Km de Pistas Solo Bus	-0.0037739	-9.90
Km de Autopistas Urbanas	0.0045979	6.22
CV Tiempos entre Buses (inicio)	0.7557262	120.85
Velocidad de Buses	-0.0055775	-17.89
Velocidad de Autos	-0.0034281	-4.79
Distancia	0.0055127	11.85
Nº de Subidas	0.0000528	21.32
Nº de Paraderos	0.0015859	12.00
Nº de Zonas Pagas	-0.0079579	-5.42
Nº de Observaciones	13,017	
R2	0.7618	

Tabla 4: Modelos para coeficiente de variación de los tiempos entre buses al final del recorrido.

Nuevamente observamos que la infraestructura dedicada para los buses (corredores segregados y pistas sólo bus) reducirían la variabilidad, esta vez asociada a los tiempos entre buses (e.g. frecuencia o tiempos de espera en paraderos). Las vías exclusivas resultaron ser poco significativas.

Las autopistas urbanas, al igual que en el caso anterior de variación de tiempos de viaje, inducirían un aumento en las variaciones de tiempos entre buses. Las razones debieran ser similares: en las autopistas urbanas el paso de una situación sin congestión a una situación con alta congestión es más brusco y menos gradual que en la vialidad convencional, generando mayor varianza.

Otro resultado interesante que se observa en la Tabla 4 es el efecto que tiene la variación de los tiempos entre buses al inicio del recorrido. El parámetro estimado es de 0.7557; esto significaría que cerca del 75% de la variación de los tiempos entre buses al final del trayecto estaría explicada por la variación al inicio del trayecto. Es decir, la regularidad con que el operador despache sus buses desde el terminal determina la mayor parte de la variabilidad al final del trayecto.

También observamos que en los recorridos más largos (mayor distancia) se detectan mayores niveles de variabilidad.

Las variables de control de velocidad de auto y buses presentan un efecto negativo y significativo: a mayor velocidad promedio, menor variabilidad en los tiempos entre buses.

Las subidas y los paraderos tenderían a aumentar la variabilidad de los intervalos entre buses, debido posiblemente a que se traspasa la aleatoriedad de la demanda a la regularidad de los intervalos. Las zonas pagas, sin embargo, reducen la variabilidad; esto se explicaría porque estos lugares son utilizados como puntos de regulación de frecuencias por los operadores de buses.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos algunos análisis econométricos para estimar el impacto que diferentes características físicas y operativas pueden tener sobre variables que reflejan calidad de servicio de buses en Santiago. Las variables asociadas a la calidad de servicio que consideramos fueron tres: velocidad promedio de los buses, variación de los tiempos de viaje, y variación de los tiempos de llegada entre buses (intervalo). Como variables físicas y operativas que inciden en la calidad de servicio de los buses consideramos: la longitud del recorrido, la velocidad promedio de los autos en hora punta en los distintos distritos de la ciudad que atraviesa el recorrido, la cantidad de paraderos normales y zona-paga, el número de pasajeros que suben en cada paradero, la distancia recorrida por cada servicio de buses dentro de las autopistas urbanas de la ciudad, dentro de corredores segregados, dentro de las calles definidas como vías exclusivas, y dentro de las calles definidas como pistas sólo bus. También consideramos variables dicotómicas de control por cada día hábil de la semana y por período del día.

La principal conclusión que obtenemos es que la infraestructura vial permite mejorar significativamente la velocidad promedio de los buses. Específicamente, estimamos que si se aumentan 10 km de corredor segregado durante el trayecto realizado, la velocidad promedio de los buses aumenta en 1,33 km/h. Un efecto en la misma dirección, pero menor en magnitud, tendrían a las pistas sólo Bus y las vías exclusivas, aunque en este último caso el aumento no sería estadísticamente significativo. En esta misma línea, estimamos que las autopistas aumentan notoriamente la velocidad promedio de los buses; cada 10 km de autopistas usadas por los buses en su recorrido, la velocidad promedio en 8,51 km/h.

Una segunda conclusión es que tanto los corredores segregados de buses, como las vías exclusivas y las pistas sólo bus, reducen la variabilidad de los tiempos de viaje de los buses, y además reducen la variabilidad de los tiempos entre buses (intervalos). Esto se traduce en una mejor calidad de servicio para los usuarios, ya que reduce la incertidumbre y los tiempos de espera y de viaje promedios al llegar a su destino.

Una tercera conclusión es el impacto que genera la regularidad de las frecuencias al inicio de los recorridos de buses, la que depende de la gestión de los operadores. Estimamos que cerca del 75% de la variación de los tiempos entre buses al final del trayecto estaría explicada por la variación al inicio del trayecto. Es decir, la regularidad con que el operador despache sus buses desde el terminal determina la mayor parte de la variabilidad al final del trayecto.

Otras conclusiones se obtienen de analizar algunas de las variables de control utilizadas. Los recorridos más largos tienden a tener mayor variabilidad en los tiempos de viaje. De la misma forma, una mayor cantidad de pasajeros aumenta los tiempos de viaje y su variabilidad. Las zonas pagas reducen la variabilidad tanto de los tiempos de viaje como de los intervalos entre buses, debido a que son usadas como puntos de regulación por parte de los operadores.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo sirven como antecedentes empíricos a considerar por quienes diseñan y regulan sistemas de buses urbanos, con el objetivo de implementar políticas tendientes a mejorar la calidad de los servicios ofrecidos.

6 REFERENCIAS

- Abkowitz, M.D., Engelstein, I., 1983. Factors affecting running time on transit routes. *Transp. Res. Part A Gen.* 17, 107–113. doi:10.1016/0191-2607(83)90064-X
- Basso, L.J., Guevara, C.A., Gschwender, A., Fuster, M., 2011. Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: Efficient and practical solutions to congestion. *Transp. Policy* 18, 676–684. doi:10.1016/j.tranpol.2011.01.002
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., Cook, A., 2001. The valuation of reliability for personal travel. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 37, 191–229. doi:10.1016/S1366-5545(00)00011-9
- Becker, J.U., Albers, S., 2016. The limits of analyzing service quality data in public transport. *Transportation (Amst)*. 43, 823–842. doi:10.1007/s11116-015-9621-2
- Botzow, H., 1974. Level-of-service concept for evaluating public transport. *Transp. Res. Rec.* 519, 73–84.
- Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., Guo, J., 2009. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 43, 722–734. doi:10.1016/j.tra.2009.07.006
- Davidson, R., MacKinnon, J.G., 2004. *Econometric theory and methods*. Oxford University Press New York.
- dell’Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P., 2011. The quality of service desired by public transport users. *Transp. Policy* 18, 217–227. doi:10.1016/j.tranpol.2010.08.005
- dell’Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P., 2010. Modelling user perception of bus transit quality. *Transp. Policy* 17, 388–397. doi:10.1016/j.tranpol.2010.04.006
- Dorbritz, R., Lüthi, M., Weidmann, U., Nash, A., 2009. Effects of Onboard Ticket Sales on Public Transport Reliability. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2110, 112–119. doi:10.3141/2110-14
- Durán-Hormazábal, E., Tirachini, A., 2016. Estimation of travel time variability for cars, buses, metro and door-to-door public transport trips in Santiago, Chile. *Res. Transp. Econ.* 59, 26–39. doi:10.1016/j.retrec.2016.06.002
- EI-Geneidy, A., Strathman, J., Kimpel, T., Crout, D., 2006. Effects of Bus Stop Consolidation on Passenger Activity and Transit Operations. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1971, 32–41. doi:10.3141/1971-06

- El-Geneidy, A.M., Horning, J., Krizek, K.J., 2011. Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicular locator systems. *J. Adv. Transp.* 45, 66–79. doi:10.1002/atr.134
- FHA, D., 2010. Travel time reliability: Making it there on time, all the time. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Gibson, J., Munizaga, M.A., Schneider, C., Tirachini, A., 2016. Estimating the bus user time benefits of implementing a median busway: Methodology and case study. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 84, 72–82. doi:10.1016/j.tra.2015.07.011
- Hensher, D.A., Stopher, P., Bullock, P., 2003. Service quality—developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 37, 499–517. doi:10.1016/S0965-8564(02)00075-7
- Kouwenhoven, M., de Jong, G.C., Koster, P., van den Berg, V.A.C., Verhoef, E.T., Bates, J., Warffemius, P.M.J., 2014. New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands. *Res. Transp. Econ.* 47, 37–49. doi:10.1016/j.retrec.2014.09.017
- Li, Z., Hensher, D.A., Rose, J.M., 2010. Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 46, 384–403. doi:10.1016/j.tre.2009.12.005
- Lin, J., Wang, P., Barnum, D.T., 2008. A quality control framework for bus schedule reliability. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 44, 1086–1098. doi:10.1016/j.tre.2007.10.002
- Lin, J., Yang, T., 2011. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 47, 284–294. doi:10.1016/j.tre.2010.09.004
- Liou, J.J.H., Hsu, C.-C., Chen, Y.-S., 2014. Improving transportation service quality based on information fusion. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 67, 225–239. doi:10.1016/j.tra.2014.07.007
- Litman, T., 2008. Valuing Transit Service Quality Improvements. *J. Public Transp.* 11. doi:http://dx.doi.org/10.5038/2375-0901.11.2.3
- Lomax, T., Schrank, D., Turner, S., Margiotta, R., 2003. SELECTING TRAVEL RELIABILITY MEASURES.
- Lyman, K., Bertini, R., 2008. Using Travel Time Reliability Measures to Improve Regional Transportation Planning and Operations. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2046, 1–10. doi:10.3141/2046-01
- Mazloumi, E., Currie, G., Rose, G., 2010. Using GPS Data to Gain Insight into Public Transport Travel Time Variability. *J. Transp. Eng.* 136, 623–631. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000126
- Mukherjee, C., White, H., Wuyts, M., 2013. Econometrics and data analysis for developing countries. Routledge.
- Nakanishi, Y., 1997. Bus Performance Indicators: On-Time Performance and Service Regularity. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1571, 1–13. doi:10.3141/1571-01
- Paulley, N., Balcombe, R., Mackett, R., Titheridge, H., Preston, J., Wardman, M., Shires, J., White, P., 2006. The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transp. Policy* 13, 295–306. doi:10.1016/j.tranpol.2005.12.004
- Pu, W., 2011. Analytic Relationships Between Travel Time Reliability Measures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2254, 122–130. doi:10.3141/2254-13
- Ramos, G.M., Daamen, W., Hoogendoorn, S., 2014. A State-of-the-Art Review: Developments in Utility Theory, Prospect Theory and Regret Theory to Investigate Travellers' Behaviour in Situations Involving Travel Time Uncertainty. *Transp. Rev.*

- 34, 46–67. doi:10.1080/01441647.2013.856356
- Redman, L., Friman, M., Gärling, T., Hartig, T., 2013. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transp. Policy* 25, 119–127. doi:10.1016/j.tranpol.2012.11.005
- Sterman, B.P., Schofer, J.L., 1976. Journal of transportation engineering, Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers.
- Strathman, J., Dueker, K., Kimpel, T., Gerhart, R., Turner, K., Taylor, P., Callas, S., Griffin, D., Hopper, J., 1999. Automated Bus Dispatching, Operations Control, and Service Reliability: Baseline Analysis. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1666, 28–36. doi:10.3141/1666-04
- Strathman, J.G., Hopper, J.R., 1993. Empirical analysis of bus transit on-time performance. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 27, 93–100. doi:10.1016/0965-8564(93)90065-S
- Surprenant-Legault, J., El-Geneidy, A., 2011. Introduction of Reserved Bus Lane. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2218, 10–18. doi:10.3141/2218-02
- Tirachini, A., 2011. Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica* 1–22. doi:10.1080/18128602.2010.520277
- Tirachini, A., Hensher, D.A., Bliemer, M.C.J., 2014. Accounting for travel time variability in the optimal pricing of cars and buses. *Transportation (Amst)*. 41, 947–971. doi:10.1007/s11116-014-9515-8
- Tirachini, A., Hensher, D.A., Rose, J.M., 2013. Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 53, 36–52. doi:10.1016/j.tra.2013.06.005
- Winters, M., Davidson, G., Kao, D., Teschke, K., 2011. Motivators and deterrents of bicycling: Comparing influences on decisions to ride. *Transportation (Amst)*. 38, 153–168. doi:10.1007/s11116-010-9284-y
- Zheng, C.-J., Zhang, Y.-H., Feng, X.-J., 2012. Improved iterative prediction for multiple stop arrival time using a support vector machine. *Transport* 27, 158–164. doi:10.3846/16484142.2012.692710