

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE EN SANTIAGO

Elsa Durán, Universidad de Chile, elsa.adh@gmail.com
 Alejandro Tirachini, Universidad de Chile, alejandro.tirachini@ing.uchile.cl

RESUMEN

El objetivo de este artículo es caracterizar la variabilidad del tiempo de viaje (VTV) en automóvil y transporte público en la ciudad de Santiago. Se cuenta con observaciones repetidas de viajes puerta a puerta, incluyendo tiempos de acceso, espera y en vehículo (bus y metro), por lo que cada etapa puede ser analizada por separado y en conjunto. En cuanto a tiempos en vehículo, el análisis muestra que el bus en tráfico mixto tiene una mayor variabilidad en su tiempo de viaje que el automóvil, mientras que metro posee la menor variabilidad. Al analizar viajes puerta a puerta en transporte público, se encuentra que el tiempo en vehículo y de espera en bus son significativos para explicar la VTV total y se encuentra que la prioridad vial para buses puede reducir tanto el tiempo de viaje promedio como su variabilidad. Se discute implicancias para la formulación de políticas de transporte.

Palabras claves: *variabilidad de tiempo de viaje, confiabilidad, bus, metro, auto, espera, caminata*

ABSTRACT

The aim of this article is characterising travel time variability (TTV) in car and public transport trips in the city of Santiago. We count with repeated travel time observations of door-to-door trips, including access, waiting, in-vehicle (bus and metro), which allows analysing each stage separately and together. Regarding in-vehicle travel time, it was found that bus in mixed traffic has the greatest TTV and metro has the smallest TTV. When analyzing door-to-door trips, we found that in-vehicle and waiting time in bus are statistically significant in explaining total TTV, and that a bus lane may reduce both mean travel time and TTV. Implications for policy making are discussed.

Keywords: *travel time variability, reliability, bus, metro, car, waiting time, walking time*

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad del tiempo de viaje (VTV) corresponde a la variación en los tiempos de viaje que se produce en un viaje que se hace repetidamente entre un origen y un destino en una misma ruta, en un mismo modo y en la misma hora del día, en distintos días comparables (por ejemplo, días laborales). Para los usuarios constituye un atributo importante que influye en sus decisiones de modo, de ruta y de hora de salida del origen, entre otras. Por ejemplo, un viaje con menor variabilidad (o más confiable) permite planificar de manera más efectiva el horario de salida para llegar a la hora deseada a destino, reduciendo de esta manera el costo generalizado del viaje. Esto se traduce en que los usuarios no sólo están dispuestos a pagar por reducir sus tiempos de viaje en promedio, sino que también, por tener un viaje más confiable y predecible (Bates et al., 2001, Noland y Small, 1995, entre muchos otros)

Para obtener una estimación de la valoración que los usuarios tienen de la VTV, y del impacto que ésta genera en sus decisiones, en la literatura se han utilizado dos modelos de manera más recurrente: el modelo de *scheduling* y el modelo de media-varianza. En el modelo de media-varianza se considera que los usuarios ven la VTV como una fuente directa de desutilidad, es decir, ésta representa un costo por sí misma (Carrion y Levinson, 2012). Este enfoque utiliza a menudo una variable que representa la VTV como la desviación estándar. En el modelo de *scheduling* en cambio, se asume que llegar más temprano o más tarde que una hora deseada a destino es una fuente extra de desutilidad para los usuarios, por lo tanto, el costo total de la VTV se puede capturar indirectamente modelando las consideraciones que tienen los usuarios al decidir la hora de salida y el costo de llegar antes o después (Tu, 2008).

Asensio y Matas (2008) llegaron a la conclusión de que los usuarios están dispuestos a pagar incluso más por reducir la variabilidad del tiempo (medida como la desviación estándar del tiempo de viaje) que el tiempo promedio de viaje, valorando en promedio 2,4 veces más la VTV que los ahorros en tiempo de viaje. La razón entre el valor de reducir la desviación estándar del tiempo de viaje y el valor de reducir el tiempo promedio se denomina razón de confiabilidad (RC) en la literatura. Según lo expuesto por Li et al. (2010), RC varía de un estudio a otro. Por ejemplo, Batley y Ibáñez (2009) encontraron un valor de 2,1; Hollander (2006), de 0,1; De Jong et al. (2009) de 0,8 para autos y de 1,4 para transporte público, y Bates et al. (2001), de 1,3 para autos y de no más de 2 para transporte público. Se desprende que, cualquiera sea el valor de RC, éste existe y por lo tanto, es importante identificar y analizar las variables que impactan en la VTV tanto para viajes realizados en transporte público como para vehículos privados.

En la literatura se han planteado varias construcciones para analizar el grado de variabilidad en distintos modos y condiciones de viaje, comparando distintas medidas de confiabilidad de la red (Cambridge Systematics et al., 2013, Lomax et al., 2003, van Lint et al., 2008).

Las medidas de VTV propuestas en el análisis se pueden clasificar en dos grupos (Pu, 2011): (i) medidas de confiabilidad de desempeño del sistema de transporte, y (ii) medidas que se utilizan para estimar la respuesta de los usuarios ante la confiabilidad, como la desviación estándar de los tiempos de viaje o la probabilidad de llegar temprano o tarde al destino, para ser introducidas en los modelos de media varianza y de *scheduling*, respectivamente.

Dada la gran influencia que la VTV tiene en la utilidad de los usuarios, es imprescindible encontrar una manera de medirla y de relacionarla con el tiempo promedio del viaje, ya que este último es usualmente estimado tanto con métodos empíricos, como analíticos y de simulación. En la literatura no existe un acuerdo sobre la mejor manera de medir o representar la VTV. Se han propuesto varias medidas, dentro de las cuales las más utilizadas son las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1: Medidas para caracterizar la variabilidad del tiempo de viaje

Medida	Descripción	Referencia
Desviación estándar (SD) del tiempo de viaje	$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TV_i - \bar{TV})^2}{N}}$	Lomax et al. (2003), Mahmassani et al. (2012), Pu (2011), Tirachini et al. (2014)
El coeficiente de variación de los tiempos de viaje	$CV = \frac{SD}{\bar{TV}}$	Kieu et al. (2014), Pu (2011)
El índice de misería	$\frac{\text{Promedio del 20\% de los mayores TV} - \bar{TV}}{\bar{TV}}$	Cambridge Systematics et al. (2013), Kim et al. (2013), Lomax et al. (2003)
Inclinación del tiempo de viaje (o sesgo estadístico): indica la inclinación de la distribución de tiempo de viaje.	$\lambda_{skew} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 50 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}}$	Aron et al. (2014), Cambridge Systematics et al. (2013), Pu (2011), Susilawati et al. (2013), Taylor y Susilawati (2012), Tu (2008)
Ancho del tiempo de viaje: entrega el ancho relativo de la distribución de TV con respecto a la mediana en un cierto período.	$\lambda_{var} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV}}$	Aron et al. (2014), Susilawati et al. (2013), Taylor y Susilawati (2012), Tu (2008)

Muchos autores han estimado funciones que relacionan el tiempo promedio de viaje con la VTV, representada por la desviación estándar, tanto para viajes realizados en automóvil (Cambridge Systematics et al., 2013, Mahmassani et al., 2012, Tirachini et al., 2014), como en buses (Mazloumi et al., 2009, Moghaddam et al., 2011). Sin embargo, van Lint et al. (2008) entrega argumentos para preferir medidas que incorporen la inclinación de la distribución del tiempo de viaje.

En este artículo, primero, se utilizará la desviación estándar como medida de variabilidad, ya que a pesar de ser una medida simétrica que oculta las características de inclinación y ancho de la distribución de los tiempos de viaje, los que constituyen aspectos relevantes de la falta de confiabilidad, es una de las medidas más utilizadas en la literatura pues se puede incluir de manera directa en el modelo de utilidad media-varianza para la modelación de demanda de transporte, y además es simple y fácil de calcular. Luego de analizar la desviación estándar se mostrará la relación entre el coeficiente de variación y el tiempo medio de viaje.

Al analizar la VTV en transporte público hay que considerar al menos tres factores extra que no en general no están presentes al estudiar la variabilidad de los viajes en automóvil (Tirachini et al. (2014)):

- Los vehículos se deben detener para transferir pasajeros. Además, el tiempo que permanecen detenidos es variable, y depende del número de pasajeros subiendo y bajando, de la modalidad de pago, del intervalo programado, etc.
- La VTV no sólo impacta el tiempo que los usuarios están en el vehículo, sino que además, sus tiempos de espera en paraderos y estaciones.

- La VTV representa un costo adicional para los operadores de transporte, quienes deben ajustar la programación de sus servicios, agregando tiempos extra de recuperación en el caso de tiempos de viaje poco confiables.

En este artículo se caracterizará la variabilidad del tiempo de viaje en Santiago, realizando un análisis de la relación que existe entre el tiempo de viaje promedio (TVP) y la variabilidad del tiempo de viaje (VTV) para un conjunto de viajes realizados en esta ciudad, en automóvil y en transporte público, en una red multimodal que incluye bus y metro. Se utilizará información de dos bases de datos que contienen observaciones repetidas de viajes realizados entre pares origen destino en toda la ciudad, una para transporte público y otra para automóviles.

La contribución de este artículo a la literatura de VTV es variada. Primero, se caracteriza por primera vez la variabilidad del tiempo de viaje en todas las etapas de un viaje en transporte público por separado: acceso, espera, en vehículo-bus, en vehículo-metro y trasbordo. Para el caso de tiempo en vehículo se comparará la VTV de tres modos, utilizando el tiempo de viaje normalizado por la distancia (min/km), de manera de tener una medida que permita comparar los resultados obtenidos para bus, metro y automóvil. En segundo lugar, la riqueza de la base de datos de transporte público permite caracterizar la variabilidad del viaje puerta a puerta, como función del tiempo promedio de viaje en cada una de las etapas (acceso, espera, tiempo en bus, tiempo en metro y trasbordo). Se estima el efecto que tiene cada una de estas etapas en la variabilidad del tiempo total de viaje puerta a puerta, de manera de determinar qué etapas son estadísticamente significativas en explicar la variabilidad de los tiempos de viaje. En tercer lugar, se analiza el impacto en la VTV de medidas de prioridad vial para reducir los tiempos de viaje en bus, como las pistas sólo bus, para lo que se utilizó una base de datos que posee tiempos de viaje medidos con GPS de la totalidad de viajes registrados en el sistema por medio de transacciones BIP! en una semana de mayo del año 2014, en toda la ciudad.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se hace una descripción de los datos utilizados en el análisis y se estudian las distribuciones de probabilidad que ajustan a los tiempos de viaje en auto, bus y metro. En la Sección 3 se analiza la VTV, representada por la desviación estándar de los tiempos de viaje, por modo y por etapa de viaje por separado (en el caso del transporte público). En la Sección 4 se estudia la VTV de los viajes puerta a puerta en transporte público, y finalmente en la Sección 5 se presentan las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DE DATOS

Para el análisis de la caracterización de la VTV en Santiago se utilizan tres bases de datos. Para los viajes en automóvil se analiza la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo a partir de información de tiempo de viaje proporcionada por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT), obtenida mediante el método del vehículo flotante, que la UOCT utiliza periódicamente en rutas seleccionadas para monitorear la evolución de los tiempos de viaje. Esta información contiene 2.616 mediciones en 25 tramos de avenidas y calles de Santiago, diferenciados por período y por sentido, entre los años 2010 y 2014. Los viajes se registran en punta mañana, con viajes repetidos entre 3 y 6 veces entre las 8:00 y las 9:00, y en punta tarde, con viajes repetidos entre 6 y 10 veces entre las 18:00 y las 20:00, en un día laboral normal cada tres meses.

Para estudiar la VTV en cada una de sus etapas por separado, y en el viaje completo de puerta a puerta en transporte público (bus y metro), se utiliza información de mediciones de tiempo de viaje recogidas en Santiago en el contexto del estudio “Elaboración de Indicadores de Desempeño del Sistema de Transporte Público de Santiago, Chile”, del Directorio de Transporte Público Metropolitano, más conocido como “El Termómetro”. En este contexto se solicitó a un grupo de medidores registrar el tiempo total y de cada una de las etapas de un viaje puerta a puerta por separado: caminata de acceso, tiempo de espera, tiempo en vehículo, tiempos de trasbordo y tiempos de egreso. Los viajes se repitieron en los mismos períodos entre los mismos pares origen destino, en distintos días a lo largo de 6 años. Se posee un total de 35.340 mediciones de tiempos de viajes realizados entre los años 2007 y 2012 entre 66 pares origen destino de la ciudad. La riqueza de esta base de datos permite estudiar el impacto que tiene cada etapa de un viaje en la VTV de un viaje puerta a puerta, algo nunca antes hecho en la literatura.

Para la información contenida en ambas bases de datos se estimaron las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan a los tiempos de viaje en vehículo obtenidos para cada uno de los distintos tramos en los que existen mediciones: 25 tramos de viajes en auto, 209 en bus y 51 en metro. La existencia poco frecuente de tiempos de viaje muy largos, debido a incidentes, hace que la distribución de tiempos de viaje en muchos casos presente una inclinación (van Lint et al., 2008). En general, saber si alguna distribución paramétrica es lo suficientemente precisa para modelar observaciones de tiempo de viaje en alguna ruta en particular, es una herramienta útil para hacer comparaciones analíticas entre distintas medidas de confiabilidad, como lo hecho por Pu (2011) suponiendo una distribución lognormal.

Para el análisis se utilizaron los tests de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov y el software estadístico Statgraphics. Los resultados indican que en la mayoría de los casos (84% en auto, 66% en bus y 54% en metro), distribuciones asimétricas como Lognormal, Loglogistic y Triangular son las que mejor ajustan la distribución observada de tiempos de viaje, mientras en el resto, ajustan mejor las simétricas como Normal, Logistic y Laplace. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de distribución de tiempo de viaje en automóvil en la Avenida Eliodoro Yáñez, ajustada con una distribución Lognormal:

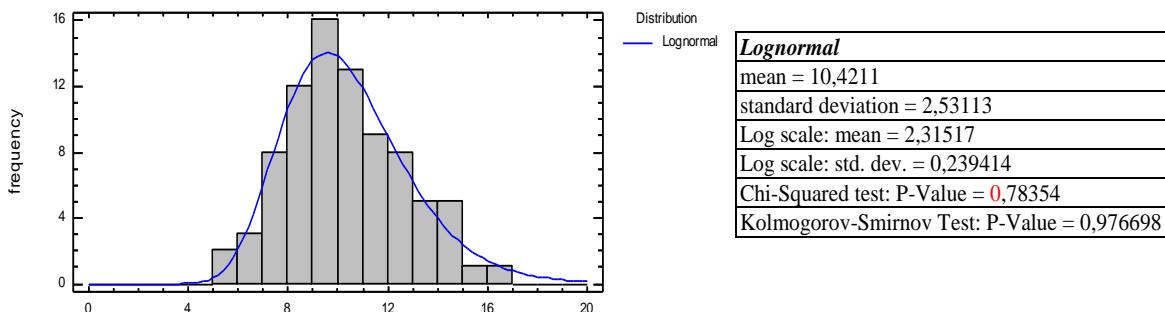


Figura 1: Histograma y distribución lognormal para tiempo de viaje en Av. Eliodoro Yáñez entre Américo Vespucio y Los Leones

Para analizar la influencia de la infraestructura exclusiva para buses en la VTV se utilizará una base de datos que contiene tiempos de viajes del sistema Transantiago, tanto para bus como para metro. Los datos corresponden a tiempos de viaje para cada viaje registrado en el sistema a partir

de las validaciones BIP! entre el 25 y el 31 de mayo del 2015, completando un total aproximado de 23,6 millones de datos. La riqueza de esta base de datos nos ha permitido comparar la variabilidad de viajes realizados en pistas sólo bus y en tráfico mixto.

3. VARIABILIDAD DE TIEMPO DE VIAJE: DIFERENCIAS MODALES

3.1 Identificación de incidentes

Para estudiar la VTV de manera correcta es importante conocer las variables que inciden en ella. Una de las fuentes de variabilidad más comunes es la congestión, pero es importante distinguir entre la congestión recurrente en ciertos períodos, la que es resultado de una capacidad vial insuficiente para los niveles de demanda en estos períodos, y la congestión no recurrente, causada por eventos temporales transitorios, como accidentes, clima, trabajos en la vía, etc. (Tu, 2008). Estos eventos son considerados como incidentes, pues son factores que el usuario no puede anticipar ni controlar, y hacen aumentar el tiempo de viaje en ciertos instantes.

Es importante entonces detectar la presencia de incidentes en los tramos estudiados, para lo cual se intenta identificar valores extremos de tiempo de viaje. La influencia de incidentes se puede apreciar en nuestros datos. La Figura 2 muestra las observaciones de tiempo de viaje de tres rutas realizadas en automóvil. La Figura 2.a representa el tiempo de viaje en la ruta 10 para 113 observaciones en punta mañana (8:00-9: 00), donde los conjuntos de barras (ya sea verdes o azules) representan observaciones de un mismo día. En la Figura 2.a, no hay incidentes claros y toda la variación parece deberse a la congestión recurrente. Por otra parte, en la Figura 2.b se muestra las observaciones de tiempo de viaje de la ruta 9 en punta mañana; cuatro observaciones (barras rojas) se destacan muy por encima de los demás. Probablemente estos son viajes realizados durante un incidente que hizo aumentar el tiempo de viaje de una manera difícil de explicar por congestión recurrente. Dos incidentes parecen haber ocurrido.

Por último, la Figura 2.c muestra otro caso interesante, en el que dos observaciones son identificadas como valores atípicos (barras rojas), sin embargo, el tiempo de los dos viajes que siguen (barras naranjas) es también más grande de lo normal debido al incidente que ocurrió antes (barras rojas). Entonces, a pesar de que las barras de color naranja podrían no ser valores atípicos estadísticos, pueden ser considerados como viajes afectados por incidentes también. En definitiva, de un total de 2.616 observaciones en tiempo de viaje en 25 rutas en automóvil, sólo 13 viajes fueron detectados estadísticamente como valores atípicos, y otros 4 fueron identificados como incidentes, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 2.c. Entonces, el número total de viajes afectados por incidentes, detectado con este procedimiento, es 17, es decir 0,6% del total. En la siguiente sección se analiza el efecto de la inclusión o eliminación de los incidentes en la caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje.

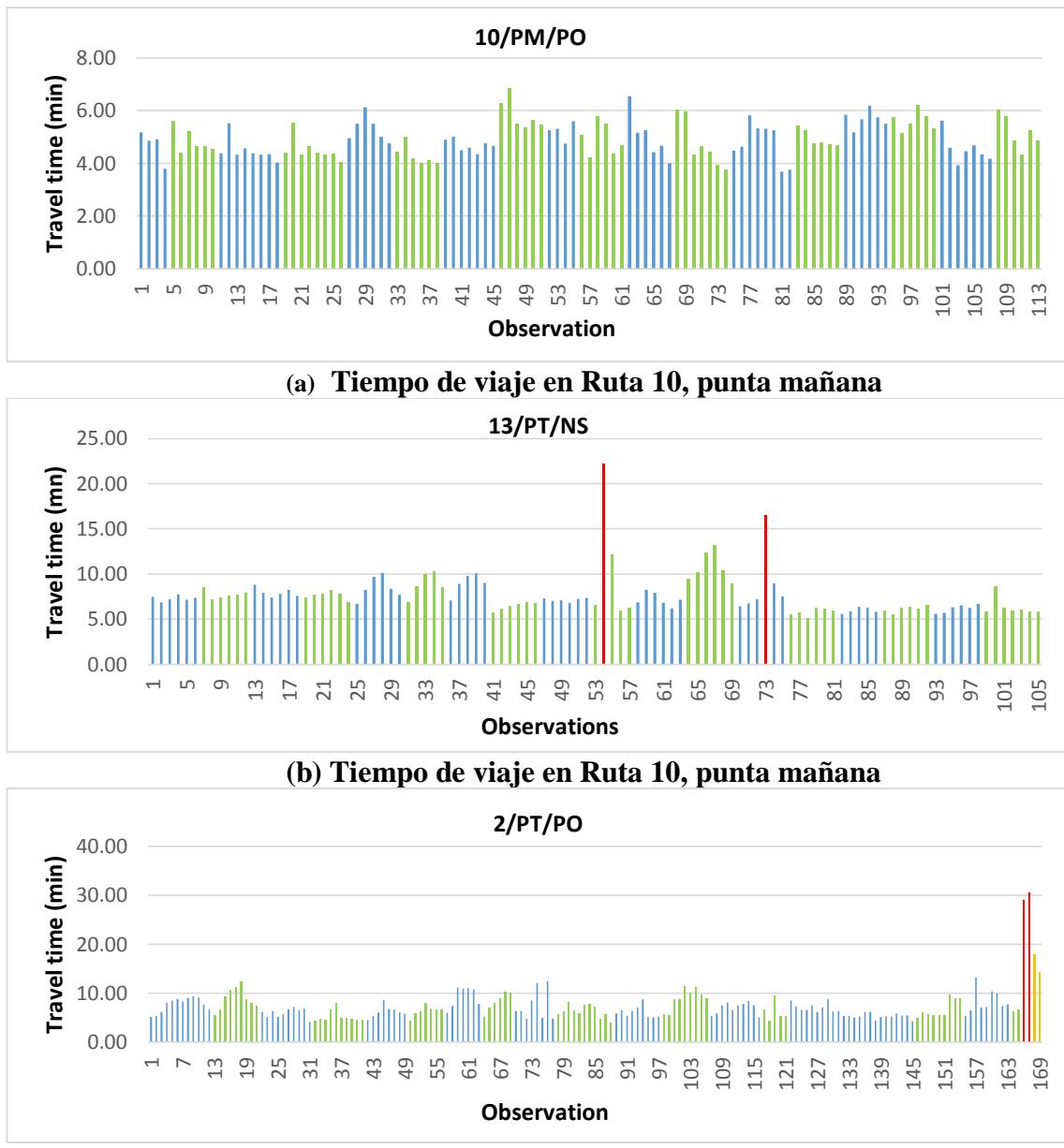


Figura 2: Variabilidad en tiempos de viaje, casos con y sin incidentes

3.2 VTV: diferencias por modo y por etapa en transporte público

3.2.1 Tiempo de viaje en automóvil

En primer lugar, analizamos los viajes en automóvil. En la Figura 3 se muestra la relación entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de viaje en minutos por kilómetro. Al comparar ambos gráficos se puede ver el efecto de los incidentes. En la Figura 3.a se ve que los incidentes aumentan la variabilidad de algunas observaciones y en la Figura 3.b se muestra la relación al eliminar los incidentes (el 0,6% de las observaciones). Ambos diagramas de dispersión pueden ser ajustados con relaciones lineales. Esperablemente, la eliminación de incidentes tiene un

impacto en la bondad del ajuste de las regresiones, pero el efecto sobre la pendiente de la relación lineal es de sólo un 10%, reduciendo su valor desde 0,32 (todas las observaciones), a 0,29 (sólo datos con congestión recurrente). Por lo tanto, nuestros datos sugieren que un aumento de 1 minuto por kilómetro en el tiempo promedio de viaje, está asociado con un aumento promedio de la desviación estándar del tiempo de viaje de entre 17 y 19 segundos, resultado similar al obtenido por Tirachini et al. (2014), quienes utilizaron datos de tiempo de viaje de 423 calles y carreteras en Sydney, Australia, para generar una regresión entre la media y la desviación estándar de los tiempos de viaje, obteniéndose una pendiente igual a 0.32.

Una relación lineal entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje es una manera muy simple de introducir una estimación de VTV en un modelo de media-varianza utilizando sólo estimaciones del tiempo medio de viaje, siempre que la razón de confiabilidad RC (relación entre el parámetro del promedio y el parámetro de la desviación estándar del tiempo de viaje) sea también conocido. La evidencia de Sydney y Santiago apunta a una pendiente de 0,3 para la relación desviación estándar-promedio cuando se utiliza como unidad el minuto por kilómetro; sin embargo se necesitan datos de tiempo de viaje de otras ciudades para poder generalizar este resultado. Mahmassani et al. (2012) utilizaron datos de tiempo de viaje obtenidos a partir de simulación para diferentes ciudades de los Estados Unidos y estimaron regresiones lineales con pendientes que se encuentran entre 0,25 y 0,53, coincidiendo con nuestros resultados.

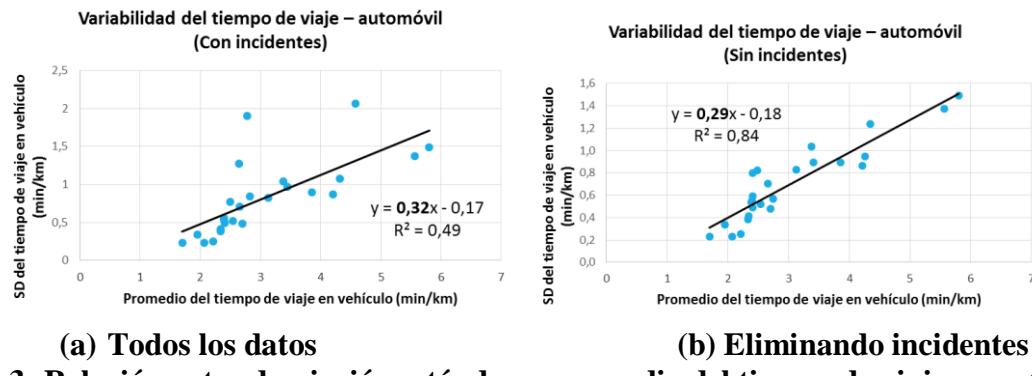


Figura 3: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de viaje en automóvil

3.2.2 Tiempo de caminata (acceso y trasbordo)

La caracterización de la variabilidad del tiempo de caminata es un elemento que no se ha estudiado anteriormente en la literatura sobre confiabilidad del transporte público, a pesar de que la caminata es la principal manera de acceder a las paradas de buses y estaciones de tren en las ciudades, y de trasbordar en viajes con más de una etapa motorizada. Para obtener la información contenida en nuestra base de datos, los medidores tuvieron que caminar desde una esquina dada a una parada de bus o estación de metro específica, y registrar el tiempo de caminata durante varios días. La relación entre la media y la variabilidad del tiempo de caminata de acceso se representa en la Figura 4.a, donde se distingue una relación positiva que expone evidencia de que para caminar, en promedio, la variabilidad del tiempo de viaje parece aumentar con la distancia recorrida. La tendencia es menos clara cuando se analiza la variabilidad de la caminata en trasbordo, ya que hay puntos altos de variabilidad para tanto para promedio de tiempos altos y bajos (Figura 4.b).

El análisis de variables del sistema que influyen en la variabilidad del tiempo de caminata además del tiempo promedio (por ejemplo, el número de intersecciones semaforizadas y de prioridad), es donde se pueden enfocar futuras investigaciones. Además, los datos utilizados tienen la limitante de que el mismo viaje puede haber sido hecho por distintas personas en distintos días, lo que probablemente está aumentando la varianza estimada, para un tiempo promedio de caminata dado.

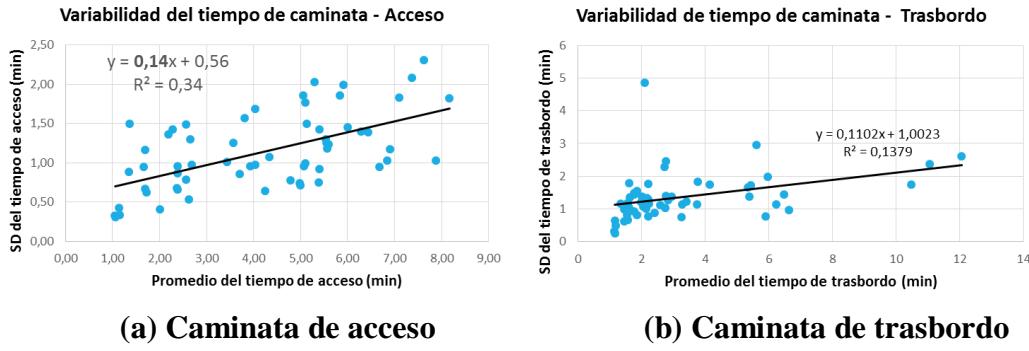
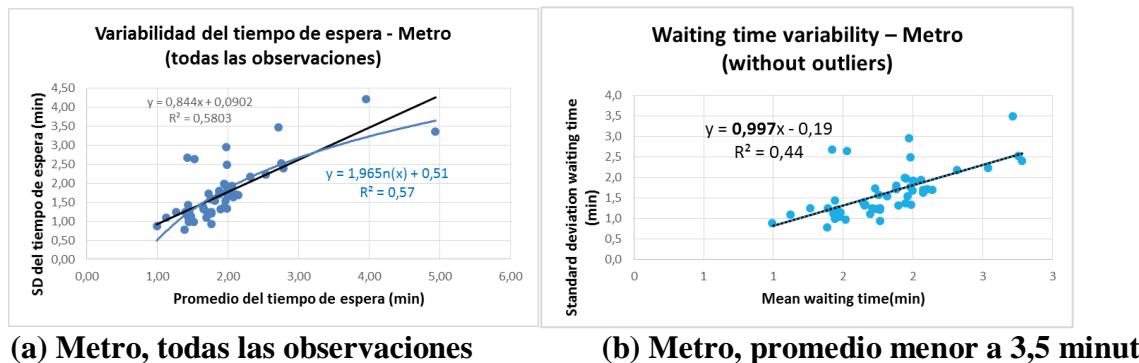


Figura 4: Relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de caminata

3.2.3 Tiempo de espera

En la literatura muchos autores han analizado la estabilidad de los intervalos entre buses (e.g., Byon et al., 2011, Chen et al., 2009, Strathman et al., 1999), ya que se ha demostrado que la variabilidad de los intervalos hace crecer los tiempos de viaje (Osuna y Newell, 1972), por lo tanto, se ha estudiado e implementado estrategias como la retención de buses para mantener intervalos regulares. A pesar de que ya se ha demostrado la existencia de una relación entre variabilidad de intervalos y tiempos de viaje promedio, no se ha analizado la variabilidad del tiempo de espera directamente, principalmente debido a que los intervalos entre buses son fáciles de registrar con tecnologías GPS, al contrario de lo que pasa con lo difícil y costoso que es obtener observaciones repetidas de tiempos de espera reales para varias rutas en varios días. Los resultados para la ciudad de Santiago se muestran en la Figura 5.



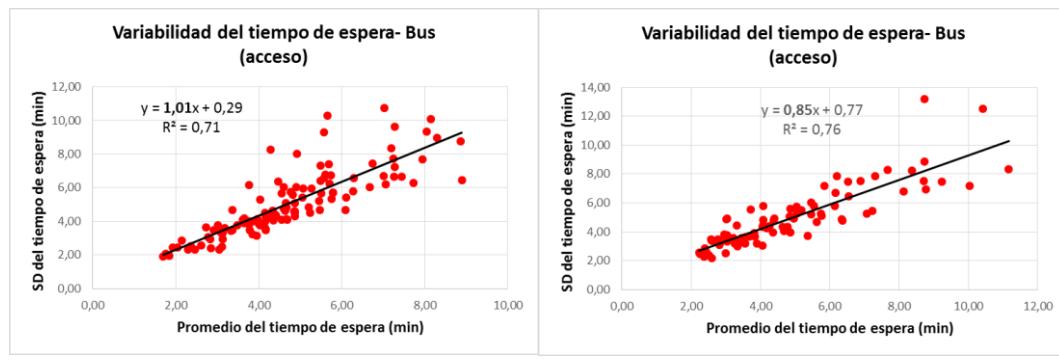


Figura 5: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de espera, bus y metro

Con respecto al tiempo de espera en metro, la mayor parte de los puntos que representan el tiempo de espera promedio están por debajo de 3,5 minutos (75 de 77 etapas de viaje en metro). En la Figura 5.a se muestran todas las observaciones, y se puede ver que la desviación estándar del tiempo de espera aumenta para los viajes cuyo tiempo de espera promedio es inferior a 3,5 minutos, mientras que para las dos observaciones de tiempo medio de espera de más de 3,5 minutos, la desviación estándar está entre 3,3 y 4,2 minutos. Esto puede indicar la existencia de una relación cóncava entre el promedio y la desviación estándar de los tiempos de espera (como la regresión logarítmica en la Figura 5.a), pero el hecho de que hay muy pocas observaciones con medios tiempos de espera de más de 3,5 minutos impide concluir tal resultado con certeza. Por otra parte, al centrarse en los 75 casos con tiempo promedio de espera menores a 3,5 minutos, se obtiene la Figura 5.b, donde se obtiene una pendiente de 0,997 para la relación lineal entre la media y la desviación estándar de los tiempos de espera, valor que es similar a la pendiente 1.01 obtenido para el tiempo de espera en bus (Figura 5.c). El hecho de que la pendiente es cercana a 1 en ambos casos, apunta a la posible existencia de una distribución exponencial en el tiempo entre llegadas entre vehículos y usuarios, característica de un proceso Poisson. Finalmente, la Figura 5.d presenta el análisis de la variabilidad del tiempo de espera cuando hay trasbordo entre buses, o entre bus y metro. Se obtiene una relación bastante lineal, con una pendiente ligeramente menor que el caso del tiempo de espera en el primer embarque (0,85 versus 1,01). Teniendo en cuenta que los trasbordos entre vehículos en Santiago no están coordinados, no se esperaba observar una diferencia significativa entre ambas regresiones (Figuras 5.c y 5.d).

3.2.4 Tiempo en vehículo: bus y metro

Finalmente se ha analizado la VTV para tiempos en vehículo para bus y metro. Al igual que en el caso de los automóviles, el análisis se hizo normalizando el tiempo por la distancia, obteniendo una unidad (minutos por kilómetro) que permitirá entender la relación entre el tiempo promedio y la congestión.

En la Figura 6.a se encuentra la relación entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de viaje en metro. Los datos muestran la existencia de una relación positiva entre ambas variables con una alta dispersión, lo que implica una relación menos clara entre el tiempo de viaje promedio y su variabilidad. Sin embargo, en la Figura 6.a se puede notar que el tiempo en metro está entre 1,4 y 3,0 min/km, un rango mucho menor que el encontrado para automóviles (entre 1,6 y 6,0 min/km en la Figura 3) y para buses (entre 1,5 y 8,2 en la Figura 6.c). Por lo tanto, para

poder hacer una comparación adecuada, se debe igualar el rango de velocidades de los buses y automóviles a la que opera metro, que es más de 20 km/h (menos de 3 min/km en la Figura 6), como se muestra en la Figura 7.

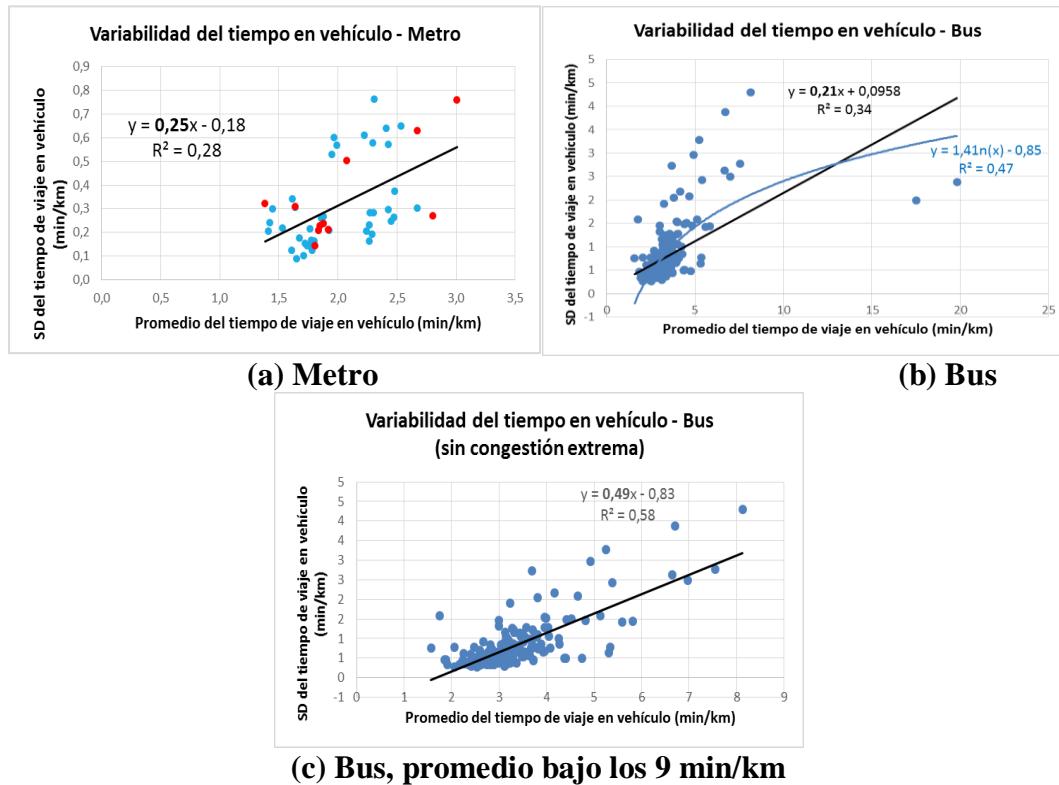


Figura 6: Relación entre SD y promedio del tiempo en vehículo: bus y metro

En la Figura 6.b se presenta el tiempo de viaje en bus. En primer lugar, es importante notar que 207 de 209 pares origen destino tienen un tiempo de viaje promedio inferior a 8,2 min/km (velocidad comercial mayor a 7,4 km/h), y sólo 28 etapas de viaje (un 13%) tienen un tiempo medio de viaje mayor a 4 min/km (velocidad inferior a 15 km/h). Existe una relación positiva que se puede ver en la Figura 6.b entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje. Al sacar los dos casos de congestión extrema se obtiene la Figura 6.c, donde se puede ver que existe una relación lineal.

Finalmente se analizó el efecto que tienen las pistas sólo bus y el tráfico mixto sobre la VTV. Para esto se utilizó una base de datos que contiene más de 23 millones de registros de viajes en transporte público en la ciudad de Santiago, de una semana de mayo del año 2014. Se seleccionaron 42 pares origen destino de viajes de día laboral realizados en bus en tráfico mixto y 22 en el eje Alameda-Providencia-Apoquindo, que corresponde a pista sólo bus. Cada par origen destino a su vez se desagregó por período. En la Figura 7 se puede ver la relación entre el promedio y la desviación estándar de los tiempos de viaje en minutos por kilómetro. La Figura 7.a muestra todas las observaciones de tráfico mixto. Al comparar esta relación con la presentada en la Figura 6.b, para viajes que se producen en extrema congestión, es decir, que poseen una velocidad menor a los 7,5 kilómetros por hora, la relación se mantiene creciente, a diferencia de lo que pasaba al analizar los datos de la encuesta *Termómetro*, en los que existían dos puntos con

congestión extrema de alto tiempo de viaje promedio, pero relativamente baja desviación estándar.

Por otro lado, para comparar lo que ocurre con la VTV en tráfico mixto y pista sólo bus se seleccionaron sólo aquellos pares origen destino con tiempo de viaje menor a los 6 minutos por kilómetro en tráfico mixto. Se puede observar que la regresión en pista sólo bus posee una pendiente menor a la de los datos de tráfico mixto, además para un rango similar de tiempo promedio (min/km) se obtiene un rango menor de la desviación estándar en las observaciones con pista solo bus. El cálculo del coeficiente de correlación en la Figura 8 confirma la mayor variabilidad en los viajes en tráfico mixto, con respecto a los viajes en pista solo bus. Un análisis más extensivo de estos datos incorporando otras vías en la ciudad, dará luces sobre la generalidad de este resultado.

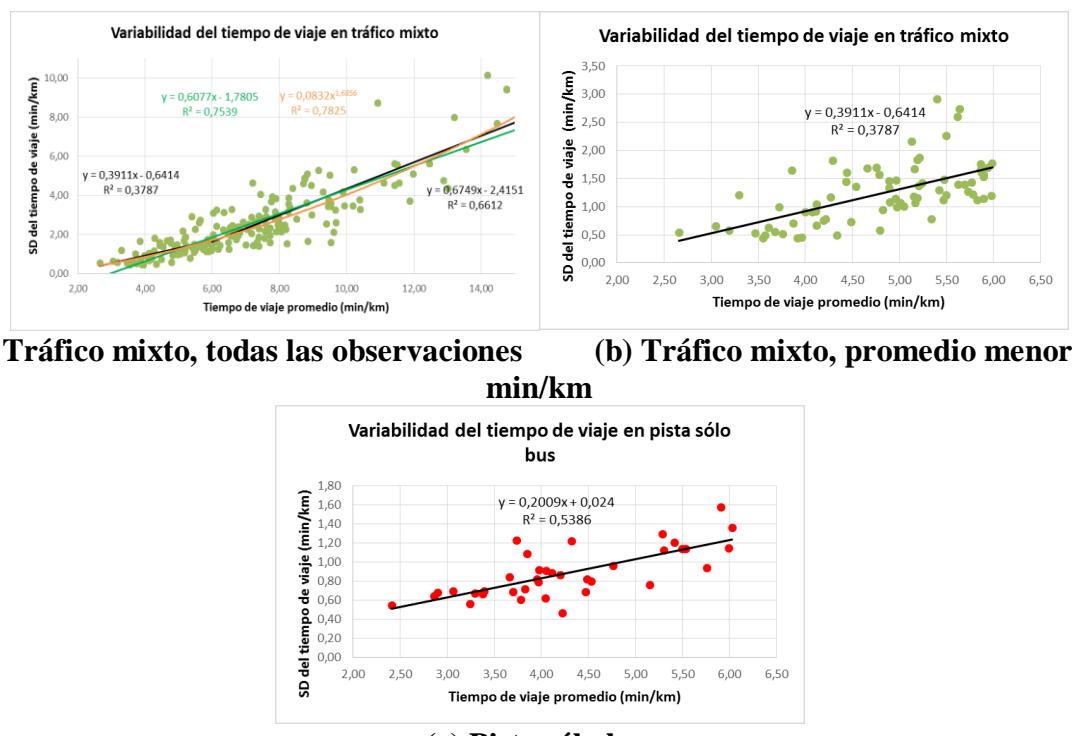


Figura 7: VTV en corredor, pista sólo bus y tráfico mixto

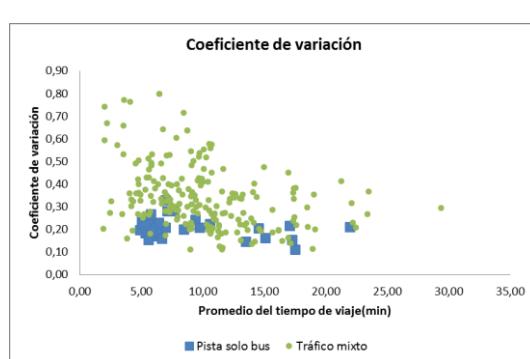


Figura 8: Coeficiente de variación en corredor, pista sólo bus y tráfico mixto

4. VARIABILIDAD DE TIEMPOS DE VIAJE EN VIAJES PUERTA A PUERTA

En las secciones anteriores se ha presentado el análisis de la VTV para cada etapa de viaje en transporte público de forma separada, con el objetivo de estudiar las diferencias en la VTV en caminata, espera, y abordo de bus o metro. Como se cuenta con una base de datos que posee observaciones repetidas de viajes puerta a puerta, podemos ahondar en el análisis, identificando las etapas de viaje que son estadísticamente significativas para explicar la variabilidad del tiempo total de viaje. En esta sección, se estima un modelo de regresión lineal múltiple para la desviación estándar del tiempo total de viaje, en función del promedio del tiempo de caminata, de espera, de trasbordo y en vehículo por modo, como se muestra a continuación en la ecuación 1:

$$\sigma = b_0 + b_1 t_{\text{walk-access}} + b_2 t_{\text{wait-bus}} + b_3 t_{\text{wait-metro}} + b_4 t_{\text{veh-bus}} + b_5 t_{\text{veh-metro}} + b_6 t_{\text{walk-trans}} \quad (1)$$

En la Tabla 2 se muestra el número de pares origen destino (OD) cuyos tiempos de viaje se registraron entre los años 2007 y 2012 y la variación promedio en las velocidades en bus, de forma de observar si hay un efecto creciente de la congestión vehicular que afecte a los buses.

Tabla 2: Características de los datos de El Termómetro por año

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Número de pares OD registrados	209	189	189	189	171	64
Promedio de observaciones por par OD	134	172	136	20,8	16	3
% Variación velocidad	-	7,2%	-1,2%	2,7%	0,8%	-17,5%

Se puede ver que el año 2007 se cuenta con el mayor número de pares OD registrados (209 pares), disminuyendo en 20 el 2008 y manteniéndose constante en 189 hasta el 2010. El 2011 disminuye levemente este número y finalmente en 2012 esta cantidad decrece considerablemente. Si se compara al primer año de los datos, existió en el 2012 una reducción de un 70% del número de pares OD medidos. Por otro lado, la velocidad promedio total en la encuesta se mantuvo más o menos constante entre 2008 y 2011. Entre el 2007 y el 2008 hubo un aumento de un 7,2% en la velocidad promedio, y una disminución fuerte, de un 17,5% entre el 2011 y el 2012. Por otro lado, el año 2007 fue el año en el que comenzó a operar Transantiago, por lo que es de esperar que los datos de tiempo de viaje sean poco confiables y no representen lo que ocurrió en el sistema de transporte de la ciudad en años posteriores.

De este breve análisis podemos concluir que para la investigación de lo que ocurre con los viajes puerta a puerta se tomará en consideración sólo los datos que se encuentran entre el 2008 y el 2011, por la estabilidad tanto en el tamaño de la muestra como en la velocidad promedio que presenta ese período. Se hizo el análisis además para cada uno de estos 4 años por separado, y para el período 2008-2011 completo, como se presenta en la Tabla 3.

Se puede ver que en la mayoría de estos modelos tanto el tiempo de espera en bus como el tiempo en vehículo bus son estadísticamente significativos para la explicación de la VTV total. Este resultado se muestra en el modelo que contiene datos de entre los años 2008 y 2011, y con el modelo del año 2008. Es importante notar que para el modelo de 2008-2011 el promedio del tiempo de viaje en vehículo metro se descarta para un 5% de significancia, pero no se descartaría para un 7%.

Tabla 3: Modelos de regresión para VTV puerta a puerta, agregados y por año

Modelo	2008-2011	2008	2009	2010	2011
Constante	2,03 (2,21)	1,68 (1,60)	2,04 (2,05)	6,29 (3,38)	1,72 (0,79)
Promedio del tiempo de acceso	-0,01 (-0,05)	0,05 (0,34)	0,01 (0,09)	-0,27 (-1,42)	-0,12 (-0,63)
Promedio del tiempo de espera bus	0,51 (5,78)	0,57 (6,50)	0,45 (4,21)	-0,01 (-0,02)	0,40 (1,91)
Promedio del tiempo de espera metro	-0,50 (-0,60)	-0,21 (-0,19)	-0,72 (-0,88)	-1,27 (-1,22)	1,73 (2,63)
Promedio del tiempo en vehículo bus	0,07 (5,61)	0,07 (4,40)	0,07 (5,48)	0,02 (0,61)	0,13 (3,84)
Promedio del tiempo en vehículo metro	0,15 (1,94)	0,14 (1,48)	0,16 (2,07)	0,12 (1,31)	-0,13 (-1,67)
Promedio del tiempo de trasbordo	-0,02 (-0,13)	-0,20 (-0,93)	-0,04 (-0,21)	0,54 (1,30)	0,01 (0,03)
R cuadrado	0,78	0,76	0,73	0,28	0,57
R cuadrado ajustado	0,72	0,69	0,66	0,08	0,44

Los modelos de los años 2010 y 2011 entregan resultados que no concuerdan con el resto. El modelo del año 2010 no considera estadísticamente significativa ninguna variable, y el del 2011 incluye como variable significativa al promedio de tiempo de espera en metro, entre otras. Estos resultados disímiles se pueden explicar ya que para los años 2010 y 2011 se posee muy pocas observaciones por par OD como se puede ver en la Tabla 2, lo que reduce la consistencia de los resultados de ambos modelos.

En resumen, los modelos muestran que las variables que pueden explicar significativamente la VTV puerta a puerta son el tiempo de espera en bus y tiempo en vehículo bus. Con respecto al tiempo en vehículo metro, el resultado no es conclusivo, ya que en el modelo del 2008-2011 es significativa al nivel 7%, en el de 2008 no es significativa y en el modelo de 2009 es significativa al 5%. El tiempo de espera en Metro no es significativo, como tampoco lo son los tiempos de caminata de acceso y trasbordo.

Este resultado apunta a que los esfuerzos para reducir la VTV en transporte público deben estar dirigidos a la reducción del tiempo promedio y/o la variabilidad de los tiempos de espera y en vehículo en bus. Por lo tanto, medidas como la segregación física de buses del resto del tráfico (pista solo bus, corredores segregados) y la adopción de un sistema de gestión de flota para reducir el apelotonamiento de buses y mantener intervalos más regulares entre vehículos, tienen un alto potencial de aumentar la confiabilidad de los tiempos de viaje puerta a puerta en transporte público.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha estudiado la variabilidad de tiempo de viaje (VTV) para viajes realizados en automóvil y en transporte público en la ciudad de Santiago. Se utilizó tres bases de datos para este propósito, una para tiempos de viaje en auto, obtenidos con el método de vehículo flotante en diferentes rutas, y dos bases que poseen el registro de los tiempos de viaje en transporte público, una de las cuales incluye las etapas fuera del vehículo (acceso, espera y trasbordo).

Al analizar la VTV de los viajes en auto, la relación lineal entre la media y la desviación estándar del tiempo de viaje (min/km) tiene una pendiente entre 0,30 y 0,32, lo que coincide con el resultado encontrado en Sydney (Tirachini et al., 2014), es decir, un aumento de 1 minuto por kilómetro en el tiempo promedio de viaje, se asocia con un aumento en promedio de entre 18 y 19 segundos en la desviación estándar. Para poder generalizar este resultado hace falta realizar análisis similares en otras ciudades del mundo.

Las relaciones encontradas entre la media y la desviación estándar de los tiempos de viaje para cada etapa de un viaje en transporte público son relevantes para la evaluación de políticas de transporte, ya que permitirán estimar el efecto que proyectos que buscan disminuir los tiempos promedio de viaje tienen en la reducción de la variabilidad del tiempo de viaje.

Al analizar la VTV de los viajes puerta a puerta en transporte público, se mostró que la VTV del tiempo total de viaje se explica de manera significativa por el tiempo promedio de espera y en vehículo bus, mientras que la caminata, tanto de acceso como de trasbordo, y el tiempo de espera en metro no resultaron estadísticamente significativos. Los resultados no son conclusivos en cuanto a la influencia del tiempo en vehículo Metro con respecto a la variabilidad del viaje completo. Por otra parte, en cuanto solo al tiempo en vehículo, metro resulta ser más confiable que el automóvil y que los buses, al menos cuando estos están sujetos a congestión.

Estos resultados tienen implicancias políticas, e indican que deben priorizarse intervenciones que reduzcan el tiempo de espera y a bordo de buses para poder reducir la variabilidad total del tiempo de viaje puerta a puerta. Ejemplo de estas intervenciones son el aumento en la frecuencia de buses y la implementación de medidas que den prioridad al bus, permitiendo reducir el apelotonamiento de buses y además aumentar las velocidades comerciales. Estos resultados se complementan con el análisis de la influencia que tienen las pistas sólo bus y el tráfico mixto en la VTV, realizado utilizando datos de viajes realizados en transporte público obtenidos por medio de tecnología GPS, ya que a partir de este análisis se ha podido demostrar que la implementación de medidas de prioridad para buses, como las pistas sólo bus, no sólo reducen el tiempo promedio de viaje, sino que además, reducen su variabilidad. Una línea futura de investigación incluye la estimación del efecto de elementos como paraderos de bus e intersecciones semaforizadas en la variabilidad del tiempo de viaje de buses y automóviles.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Unidad Operativa de Control de Tránsito de Santiago (UOCT) y al Directorio de Transporte Público Metropolitano (DPTM) por proveer los datos necesarios para la realización de esta investigación. Este trabajo es parte del Proyecto Fondecyt Iniciación “Social effects and quality of service valuation of public transport services” (Proyecto 11130227), financiado por CONICYT. También agradecemos el apoyo del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ICMP-05-004-F, CONICYT FBO16).

REFERENCIAS

Aron, M., N. Bhouri y Y. Guessous (2014) Estimating Travel Time Distribution for Reliability Analysis. *Transport Research Arena*

- Asensio, J. y A. Matas (2008) Commuters' valuation of travel time variability. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 44, 1074-1085.
- Bates, J., J. Polak, P. Jones y A. Cook (2001) The valuation of reliability for personal travel. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 37, 191-229.
- Batley, R. y N. Ibáñez (2009) Randomness in preferences, outcomes and tastes, an application to journey time risk. **International Choice Modelling Conference, Yorkshire, UK**.
- Byon, Y.-J., C. E. Cortés, F. J. Martínez, M. Muñizaga y M. Zúñiga (2011) Transit Performance Monitoring and Analysis with Massive GPS Bus Probes of Transantiago in Santiago, Chile: Emphasis on Development of Indices for Bunching and Schedule Adherence. **TRB 90th Annual Meeting, Washington D.C.**
- Cambridge Systematics, Texas A&M Transportation Institute, University of Washington, Dowling Associates, Street Smarts, H. Levinson y H. Rakha (2013) Analytical Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies. **SHRP 2 Report S2-L03-RR-1, Transportation Research Board, Washington D.C.**
- Carrion, C. y D. Levinson (2012) Value of travel time reliability: A review of current evidence. **Transportation Research Part A**, 46, 720-741.
- Chen, X., L. Yu, Y. Zhang y J. Guo (2009) Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. **Transportation Research Part A**, 43, 722-734.
- De Jong, G., M. Kouwenhoven, E. Kroes, P. Rietveld y P. Warffemius (2009) Preliminary monetary values for the reliability of travel times in freight transport. **EJTIR**, 9, 83-99.
- Hollander, Y. (2006) Direct versus indirect models for the effects of unreliability. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 40, 699-711.
- Kieu, L. M., A. Bhaskar y E. Chung (2014) Establishing Definitions and Modeling Public Transport Travel time Variability. **Transportation Research Board 93rd Annual Meeting**
- Kim, J., H. S. Mahmassani, P. Vovsha, Y. Stogios y J. Dong (2013) Scenario-Based Approach to Analysis of Travel Time Reliability with Traffic Simulation Models. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2391, 56-68.
- Li, Z., D. A. Hensher y J. M. Rose (2010) Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 46, 384-403.
- Lomax, T., D. Schrank, S. Turner y R. Margiotta (2003) Selecting travel reliability measures. **Texas Transportation Institute monograph (May 2003)**

Mahmassani, H. S., T. Hou y J. Dong (2012) Characterizing Travel Time Variability in Vehicular Traffic Networks. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2315, 141-152.

Mazloumi, E., G. Currie y G. Rose (2009) Using GPS Data to Gain Insight into Public Transport Travel Time Variability. **Journal of Transportation Engineering-asce**

Moghaddam, S., R. Noroozi, J. Casello y B. Hellinga (2011) Predicting the Mean and Variance of Transit Segment and Route Travel Times. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2217, 30-37.

Noland, R. B. y K. A. Small (1995).Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of the morning commute, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine.

Osuna, E. E. y G. F. Newell (1972) Control strategies for an idealized bus system. **Transportation Science**, 6, 52-71.

Pu, W. (2011) Analytic relationships between travel time reliability measures. **Transportation Research Record** 2254122-130.

Pu, W. (2011) Analytic relationships between travel time reliability measures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2254, 122-130.

Strathman, J., K. Dueker, T. Kimpel, R. Gerhart, K. Turner, P. Taylor, S. Callas, D. Griffin y J. Hopper (1999) Automated bus dispatching, operations control, and service reliability: baseline analysis. **Transportation Research Record**, 1666, 28-36.

Susilawati, S., M. A. Taylor y S. V. Somenahalli (2013) Distributions of travel time variability on urban roads. **Journal of Advanced Transportation**, 47, 720-736.

Taylor, M. A. P. y Susilawati (2012) Modelling Travel Time Reliability with the Burr Distribution. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 54, 75-83.

Tirachini, A., D. Hensher y M. J. Bliemer (2014) Accounting for travel time variability in the optimal pricing of cars and buses. **Transportation**, 41, 947-971.

Tu, H. (2008).Monitoring travel time reliability on freeways, TU Delft, Delft University of Technology.

van Lint, J. W. C., H. J. van Zuylen y H. Tu (2008) Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 42, 258-277.