



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE EN
LA CIUDAD DE SANTIAGO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE**

ELSA ADRIANA DURÁN HORMAZÁBAL

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO ANDRÉS TIRACHINI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO JAVIER BASSO SOTZ
MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ
JUAN CARLOS MUÑOZ ABOGABIR

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE:
Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte
POR: Elsa Adriana Durán Hormazábal
FECHA: Mayo 2016
PROFESOR GUÍA: Alejandro Andrés Tirachini Hernández

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE EN LA CIUDAD DE SANTIAGO

La variabilidad del tiempo de viaje (VTV) es un atributo del nivel de servicio que refleja la variación en la duración de un viaje que se repite a lo largo de varios días, en similares condiciones. En la literatura se ha demostrado vastamente la alta valoración que los usuarios le atribuyen, por lo que se ha convertido en un factor clave para la evaluación de políticas de transporte.

En esta tesis se caracteriza la VTV en automóvil y transporte público en la ciudad de Santiago utilizando cuatro bases de datos que contienen observaciones repetidas de viajes, lo que permitió analizar el tiempo de viaje en transporte privado y el tiempo en cada etapa de un viaje en transporte público por separado (caminata, espera y en vehículo), y en conjunto para viajes puerta a puerta. La metodología utilizada consistió en encontrar una relación entre el tiempo de viaje promedio (TVP) y la VTV, representada tanto por una medida simétrica (desviación estándar), como por medidas asimétricas de la distribución del tiempo de viaje.

Al utilizar la desviación estándar para caracterizar el tiempo en vehículo, el análisis muestra que existe una relación mucho más fuerte entre el TVP y la VTV para buses y autos que para metro. Esto se debe a que la variabilidad de metro no está dada por la congestión como en el resto de los modos, sino que por la presencia de factores no recurrentes que hacen aumentar su tiempo en ocasiones, dándole una asimetría positiva a su distribución, lo que se demostró representando la VTV por la medida asimétrica λ_{skew} .

Al analizar viajes puerta a puerta en transporte público se encontró que la VTV total se explica principalmente por el promedio del tiempo en vehículo y de espera en bus, seguidos por el tiempo promedio en vehículo metro. El tiempo promedio de caminata y de espera en metro no influye significativamente. Esto indica que para reducir la variabilidad total de un viaje en transporte público se debe priorizar políticas que disminuyan el tiempo de espera y a bordo de buses, como la implementación de sistemas de control de flota que reduzcan el apilamiento, y de medidas que den prioridad de circulación al bus. Esto coincide con el análisis de la influencia del tráfico mixto, pistas sólo bus (PSB) y corredores segregados en la VTV en bus, donde se encontró que en tráfico mixto los buses no sólo poseen mayores tiempos de viaje, sino que además presentan una mayor VTV que en PSB y corredores.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi familia, el pilar fundamental de mi vida. A mis padres, gracias a ellos, a su amor y su esfuerzo, soy quien soy y he llegado hasta donde estoy hoy. A mi hermano Gabriel y Nicole, por el apoyo y el cariño entregado en todo momento.

A Mauricio, por tu corazón gigante, por estar siempre ahí y porque sin tu ayuda no habría podido alcanzar este logro.

Gracias a mis amigos por entender cuando tenía que desaparecer por semanas para dedicarme a estudiar.

A Alejandro, mi profesor guía, gracias por tu confianza, tu amistad y tu apoyo desde el primer día que llegué a la División, y por haberme dejado ser tu primera tesista.

A todos mis compañeros, conocerlos fue una de las mejores cosas de mi paso por la División. Agradezco en especial a los más cercanos, mis amigos, con quienes compartí el sufrimiento de largas noches de estudio, pero con quienes también lo pasé demasiado bien. Que la vida no nos separe.

A los profesores de la División, me siento afortunada de haber tenido la posibilidad de ser su alumna. Gracias por los consejos, enseñanzas, y por enseñarme a creer en mi misma y en mis capacidades.

A Carolina y Pablo, por permitirme compatibilizar el trabajo con la tesis.

Finalmente agradezco a Metro S.A., al Directorio de Transporte Público Metropolitano y a la Unidad Operativa de Control de Tránsito por facilitar la información con la que se elaboró esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 VALORACIÓN DE LA VTV.....	5
2.2 FUENTES DE VTV.....	8
2.3 MEDIDAS DE VTV.....	10
2.4 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LOS TIEMPOS DE VIAJE	13
2.5 VTV EN TRANSPORTE PÚBLICO.....	15
2.6 VTV EN TRANSPORTE PRIVADO.....	17
3. DESCRIPCIÓN DE DATOS.....	19
3.1 BD1: UOCT - TIEMPO DE VIAJE EN AUTOMÓVIL.....	19
3.2 BD2: TERMÓMETRO - TIEMPO DE VIAJE EN TRANSPORTE PÚBLICO .	22
3.3 BD3: GPS - TIEMPO DE VIAJE EN BUS.....	24
3.4 BD4: METRO - TIEMPO DE VIAJE EN METRO.....	26
4. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE.....	28
4.1 TEST DE BONDAD DE AJUSTE.....	28
4.2 DISTRIBUCIONES DE TIEMPOS DE VIAJE EN AUTO, BUS Y METRO ...	31
4.3 HISTOGRAMAS DE TIEMPOS DE VIAJE EN METRO Y BUS EN PISTA SÓLO BUS.....	35
5. IDENTIFICACIÓN DE INCIDENTES.....	38
5.1 PRUEBAS DE DETECCIÓN DE VALORES ATÍPICOS.....	38
5.2 DETECCIÓN DE INCIDENTES.....	40
6. VTV: DIFERENCIAS POR MODO Y POR ETAPA EN VIAJES EN TRANSPORTE PÚBLICO.....	45
6.1 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE EN AUTOMÓVIL.....	47
6.2 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE CAMINATA (ACCESO Y TRASBORDO) 49	
6.3 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE ESPERA.....	52
6.4 VARIABILIDAD DEL TIEMPO EN VEHÍCULO: BUS.....	56
6.5 VARIABILIDAD DEL TIEMPO EN VEHÍCULO: METRO.....	60
6.6 COMPARACIÓN DE LA VTV EN BUS EN TRÁFICO MIXTO, PISTA SÓLO BUS Y CORREDOR SEGREGADO.....	65
6.7 COMPARACIÓN DE LA VTV EN METRO VERSUS BUS EN PISTA SÓLO BUS 67	
6.8 OTRAS MEDIDAS DE VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE.....	72
7. VTV EN VIAJES PUERTA A PUERTA.....	78
8. CONCLUSIONES.....	82
8.1 RESUMEN.....	82
8.2 PRINCIPALES RESULTADOS.....	83
8.3 EXTENSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	85
GLOSARIO DE ABREVIACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87

ANEXOS	93
ANEXO A: TABLAS	93

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La variabilidad del tiempo de viaje (VTV) corresponde a la variación en la duración de 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 transporte, como modo, ruta y 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* (Small, 1982) y el modelo de media-varianza (Senna, 1994). Tu (2008) explica que 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. 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. Para utilizar el modelo de media-varianza sólo se requiere conocer las variaciones de los tiempos de viaje entre días, sin embargo, en el modelo de *scheduling* se debe conocer además, la hora preferida de llegada a destino (Carrion y Levinson, 2012).

Small (1999) concluye que si un modelo tiene completamente especificados sus costos de *scheduling* (costos de llegar antes o después de la hora deseada a destino), no es necesario agregar un costo adicional que represente la VTV. Sin embargo, existe evidencia empírica en la literatura (Börjesson et al., 2012) que sugiere que el valor de reducir la VTV en un modelo de *scheduling* podría ser menor que en el modelo de media-varianza. Börjesson et al. (2012) concluye que esto se debe a que para los usuarios, entre otros factores, la incertidumbre es una fuente de desutilidad por sí misma, independiente de si el usuario llega temprano, a tiempo, o tarde a su destino. Por esta misma razón, Bates et al. (2001) rechaza el argumento de Small (1999), indicando que el costo adicional de la VTV efectivamente existe y debe ser modelado. Finalmente, autores como Hollander (2006)

reportan que para valorizar los efectos de la VTV deberían utilizarse ambos enfoques.

La razón entre el valor de reducir la desviación estándar del tiempo de viaje y el valor de reducir el tiempo promedio se ha denominado razón de confiabilidad en la literatura. Según Li et al. (2010), el valor de la RC varía de un estudio a otro: por ejemplo, Batley e Ibáñez (2009) encontraron un valor de 2,1 y Hollander (2006), de 0,1. 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.

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 de viaje, ya que este último usualmente ha sido 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 y se han propuesto varias medidas, planteando además varias construcciones para analizar el grado de variabilidad en distintos modos y condiciones de viaje, lo que ha permitido comparar estas distintas medidas (Cambridge Systematics et al., 2013, Lomax et al., 2003, van Lint et al., 2008). Muchos autores han estimado funciones que relacionan el tiempo promedio de viaje con la VTV representada por la desviación estándar, como lo realizado para viajes en automóvil por May et al. (1989), Mahmassani et al. (2012), Peer et al. (2012), Cambridge Systematics et al. (2013) y Tirachini et al. (2014), y para viajes en bus por Mazloumi et al. (2010) y Moghaddam et al. (2011). Por otro lado, van Lint et al. (2008) entrega argumentos para preferir medidas que incorporen la asimetría de la distribución del tiempo de viaje, debido a que las distribuciones de los tiempos de viaje por lo general no son simétricas.

Para analizar la confiabilidad de los tiempos en transporte público se han propuesto varias otras medidas además de la desviación estándar, como por ejemplo, la probabilidad de llegar a la hora al destino, la razón entre los tiempos de viaje observados y programados, y medidas de variabilidad de los intervalos entre buses, ya que ésta incrementa los tiempos de espera (Abkowitz y Engelstein, 1983, Strathman et al., 1999, Strathman y Hopper, 1993) y hace empeorar el confort promedio experimentado por los usuarios (Delgado et al., 2012).

En esta tesis se utilizará en primer lugar la desviación estándar como medida de variabilidad, ya que a pesar de ser una medida simétrica que oculta las características de asimetría 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. En segundo lugar se analizarán dos medidas de variabilidad asimétricas, que corresponden a los parámetros de asimetría y de ancho de la distribución del tiempo de viaje para todos los modos en análisis, tal como lo sugiere van Lint et al. (2008), complementando estos resultados con el coeficiente de variación. Finalmente se expondrá las diferencias entre las distintas medidas de confiabilidad, comparando los tiempos de viaje en metro versus los modos de transporte en superficie.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es caracterizar 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 integra bus y metro. Se utilizará información de cuatro bases de datos que contienen observaciones repetidas de viajes realizados entre un grupo de pares origen destino en toda la ciudad. Tres de estas bases de datos contienen información de tiempo de viaje en transporte público, y una contiene observaciones de tiempo en transporte privado.

Para la obtención del objetivo general se ha planteado tres objetivos específicos. El primero de ellos es caracterizar la variabilidad del tiempo de viaje en todas las etapas de un viaje en transporte público por separado: acceso, espera, en vehículo 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.

El segundo objetivo específico es caracterizar la variabilidad del viaje puerta a puerta como función del tiempo promedio de viaje en cada una de las etapas: acceso, espera bus, espera metro, en vehículo bus, en vehículo metro y trasbordo. Esto será posible debido a la riqueza de la información proporcionada por una de las bases de datos de transporte público con la que se cuenta. Se estimará 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 influyen significativamente en ella.

El tercer objetivo específico es analizar el impacto en la VTV de medidas que dan prioridad de circulación a buses, como las pistas sólo bus y los corredores segregados, 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. Además se comparará la VTV de viajes realizados en los mismos pares origen destino en metro y en buses en pista sólo bus.

La contribución de esta tesis a la literatura de VTV es variada y se encuentra ligada a estos tres objetivos específicos. En primer lugar, se caracterizará por primera vez en la literatura, la VTV en todas y cada una de las etapas de un viaje en transporte público por separado (acceso, espera, en vehículo y trasbordo). Los autores que han investigado la VTV en transporte público se han enfocado sólo en la confiabilidad del tiempo de viaje en vehículo y de los intervalos entre buses, como lo realizado por Arriagada et al. (2015), utilizando datos de tiempo de viaje obtenidos por GPS de dos servicios de transporte público de Santiago.

La segunda contribución está dada por la caracterización de la VTV puerta a puerta en transporte público en función del tiempo de viaje promedio de cada una de sus etapas. Varios autores en la literatura (El-Geneidy et al., 2011, Feng, 2014, entre otros) han estudiado el efecto en la VTV que tienen factores como el número de semáforos, el número de paraderos y la longitud del viaje, entre muchos otros, pero no se ha estudiado de qué manera influye cada una de las etapas de un viaje puerta a puerta en la VTV total. Este es el primer estudio que incluye variables como el tiempo de caminata y el tiempo de espera para poder explicar la variabilidad del tiempo total de viaje en transporte público.

Finalmente, se contribuirá al análisis de la VTV estudiando el impacto que tiene la implementación de medidas que dan prioridad de circulación a buses (como pistas sólo bus y corredores segregados) en la VTV, permitiendo hacer una comparación de lo que ocurre entre éste y otros modos, como metro y automóvil.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la literatura existe una gran cantidad de estudios en los que se ha analizado la VTV, tanto para viajes realizados en transporte privado, como en transporte público.

En este capítulo se presenta una revisión de la literatura que comprende los siguientes temas: valoración de la variabilidad del tiempo de viaje, fuentes de variabilidad, medidas de variabilidad, distribuciones de probabilidad de tiempo de viaje y variabilidad del tiempo de viaje en transporte público y en transporte privado.

Para facilitar la lectura de esta tesis, en el Glosario se presenta una tabla con las abreviaciones utilizadas a lo largo de este documento.

2.1 VALORACIÓN DE LA VTV

El valor del tiempo de viaje corresponde a la disposición a pagar que tienen los usuarios para reducir su tiempo de viaje. Es un concepto ampliamente estudiado y comúnmente utilizado en la modelación de transporte y en la evaluación de políticas relacionadas. Sin embargo, en la literatura se ha demostrado que los usuarios no sólo tienen disposición a pagar por ahorrar tiempo de viaje promedio, sino que además están dispuestos a pagar por disminuir la variabilidad de su tiempo de viaje (Bates et al., 2001, Lam y Small, 2001, Li et al., 2010), ya que de esta manera podrían planificar de un modo más eficiente el horario de salida desde el origen para llegar a una hora deseada a destino.

Asensio y Matas (2008) analizaron el valor que los usuarios le dan a la VTV utilizando datos obtenidos de una encuesta de preferencias declaradas realizada en Barcelona, donde se les hizo escoger a los usuarios entre dos alternativas que diferían en costo, tiempo de viaje promedio, VTV y hora de salida, y encontraron que los usuarios valoran en promedio 2,4 veces más la VTV que los ahorros en tiempo de viaje, es decir, están dispuestos a pagar incluso más por reducir la variabilidad del tiempo que el tiempo promedio de viaje. En Katsikopoulos et al. (2002) también se mostró que la gente prefiere rutas con tiempos medios de viaje mayores y menor variabilidad que una ruta con bajo tiempo medio de viaje y alta variabilidad.

Abdel-Aty et al. (1995) realizó un estudio para determinar las formas en las que la VTV afecta la elección de rutas de los usuarios, entre otras cosas. A partir de datos obtenidos de una entrevista telefónica de preferencias declaradas asistida por computador, realizada a 564 personas en Los Ángeles se desarrolló un modelo logit binario con una distribución normal mixta. Los

resultados indicaron que los usuarios le dan una alta importancia en sus decisiones de ruta tanto al grado de VTV como a la información de tráfico.

En la literatura se ha utilizado con mayor frecuencia dos modelos para estimar el valor que los usuarios le dan a la variabilidad del tiempo de viaje: el modelo de media-varianza y el modelo de *scheduling*.

En el modelo de media-varianza se asume que la VTV es una fuente directa de desutilidad para los usuarios, representando un costo por sí misma (Tu, 2008). Por lo general, en la función de utilidad de este modelo se expresa la VTV por medio de una variable que representa la variación estándar del TV, como la desviación estándar.

En la Ecuación 1 se muestra el modelo de media-varianza de Senna (1994). Se observa que la función de utilidad esperada tiene tres atributos: el tiempo esperado de viaje ($E(T)$), la desviación estándar del tiempo de viaje ($SD(T)$) y el costo de viajar (C). Además, β_T , β_{SD} y β_C son los respectivos parámetros estimados para cada una de estas variables.

$$E(U) = \beta_T E(T) + \beta_{SD} SD(T) + \beta_C C \quad (1)$$

En el modelo de *scheduling*, inicialmente propuesto por Small (1982) y complementado por Noland y Small (1995), se asigna una penalización por llegar más tarde o más temprano que una hora deseada a destino, considerando que ambas son fuentes extras 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).

El modelo de *scheduling* de Noland y Small (1995) se muestra en la siguiente ecuación, donde la utilidad esperada ($E[U(t_h)]$) está en función del tiempo esperado de viaje ($E[T(t_h)]$), del costo esperado de llegar antes ($E[SDE(t_h)]$), o *scheduling delay early* (SDE), del costo esperado de llegar tarde ($E[SDL(t_h)]$), o *scheduling delay late* (SDL) y de la probabilidad de llegar tarde ($P_L(t_h)$) y a su vez, todas estas variables dependen de la hora de salida desde el origen (t_h).

$$E[U(t_h)] = \beta_T E[T(t_h)] + \beta_{SDE} E[SDE(t_h)] + \beta_{SDL} E[SDL(t_h)] + \theta P_L(t_h) \quad (2)$$

Según Bates et al. (2001), el modelo de *scheduling* entrega mejores resultados para analizar los viajes en transporte privado, ya que en este contexto la hora de salida se puede ajustar de manera continua, en cambio, para viajes realizados en transporte público, la salida desde el origen dependerá del horario de pasada de los servicios, por lo tanto, será una elección discreta.

En Li et al. (2010) se aplicó tanto el modelo de media-varianza como el de *scheduling* con datos de autopistas con peajes en Australia y se estimó un modelo Mixed Logit, lo que permitió analizar el valor de ahorrar tiempo de viaje ($VTTs = \beta_T/\beta_C$) y una serie de conceptos relacionados con la VTV. Del modelo de media-varianza se obtiene el concepto de valor de la confiabilidad (VOR), que corresponde a la disposición a pagar de los usuarios por reducir la variabilidad del tiempo de viaje (SD) en una unidad ($VOR = \beta_{SD}/\beta_C$), y el concepto de razón de confiabilidad (RC), que es la tasa marginal de sustitución (adimensional) entre el tiempo promedio de viaje y su variabilidad ($RC = \beta_{SD}/\beta_T$). Según lo expuesto por Li et al. (2010), las estimaciones del valor de la razón de confiabilidad varían 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) encontraron que este valor era de 0,8 para autos y de 1,4 para transporte público, y Bates et al. (2001) obtuvieron un RC de 1,3 para autos y de no más de 2 para transporte público. Por otro lado, del modelo de *scheduling* se obtienen los costos de *scheduling*, correspondientes al concepto de valor esperado de llegar antes ($ESDE$) y al valor esperado de llegar tarde ($ESDL$) a un destino. El valor de la confiabilidad en este último modelo se puede modelar indirectamente por medio de los valores de $ESDE/VTTs$ y $ESDL/VTTs$. Al incorporar el costo de transporte (C) a la función de utilidad del modelo de *scheduling* de la Ecuación 2, como en Asensio y Matas (2008), y considerando que β_C es el parámetro del costo de transporte, los costos de *scheduling* se definen como $ESDE = \beta_{ESDE}/\beta_C$ y $ESDL = \beta_{ESDL}/\beta_C$.

En la investigación de Li et al. (2010) se obtuvo los siguientes resultados: en el modelo de *scheduling* el valor de ahorrar una hora de tiempo de viaje ($VTTs$) es de \$30,04, el costo medio por hora de $ESDE$ es de \$24,1 y de \$38,86 para $ESDL$, con un valor de $ESDE/VTTs$ de 0,8, y de $ESDL/VTTs$ de 1,29. En el modelo de media-varianza el valor de la confiabilidad (VOR) es de \$40,39 por hora y la razón de confiabilidad (RC) es de 1,43. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Börjesson et al. (2012), quien sugirió que el valor de reducir la VTV en un modelo de *scheduling* debería ser menor que en un modelo de media-varianza, ya que en este último se incorpora la incertidumbre como un costo por sí mismo, sin importar si el usuario llega antes o después a su destino.

En Tirachini et al. (2014) se utiliza el modelo de media-varianza para incorporar la variabilidad del tiempo de viaje (expresada como la desviación estándar) en la función de utilidad modal de los usuarios, de manera de analizar su efecto en la estimación de la tarifa óptima tanto de buses como de vehículos privados y en la capacidad y frecuencia óptima de los buses, en un escenario de maximización del bienestar social donde además se incorpora una variable de hacinamiento en buses en ciertos escenarios. Para este fin se utilizan datos de viajes que circulan por una avenida en Sydney, donde se asume que los modos disponibles son auto, bus y caminata. A

partir de datos empíricos de diversas avenidas y autopistas en la ciudad, se estimó una relación lineal entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de viaje, utilizada para relacionar la congestión y la VTV. Los resultados indican que al incorporar la VTV, la tarifa óptima de los autos aumenta linealmente a medida de que aumenta la sensibilidad de los usuarios a la VTV, es decir, a medida que aumenta la *RC*. Por otro lado, la tarifa óptima de los buses prácticamente se mantiene constante. Además, mientras mayor es el valor que los usuarios le dan a la confiabilidad, mayor es la frecuencia óptima de los buses. Finalmente, al incluir el hacinamiento además de la VTV en el análisis, el tamaño óptimo de los buses es mayor.

2.2 FUENTES DE VTV

Para poder realizar una adecuada caracterización de la VTV es importante identificar y analizar las variables que influyen en ella, tanto para viajes realizados en transporte público, como en vehículos privados.

Debido a que una de las principales fuentes de variabilidad es la congestión, es importante diferenciar entre la congestión recurrente, que es el resultado de una capacidad vial insuficiente para un cierto nivel de demanda y que se repite día a día (Tu, 2008), y la congestión no recurrente, que es causada por eventos temporales transitorios que el usuario no puede anticipar ni controlar, como por ejemplo accidentes o disminuciones temporales de capacidad por mal clima. El análisis de Tu (2008) muestra que para el caso de las autopistas holandesas en estudio, la congestión recurrente reduce la confiabilidad del tiempo de viaje en mayor medida que la congestión no recurrente, pero esta última hace aumentar de manera extrema los tiempos de viaje.

Tu (2008) clasifica las fuentes de variabilidad de tiempo de viaje que afectan a los automóviles en dos grupos.

- a. Fluctuaciones en la demanda, que se deben a:
 - Efectos temporales (distintas horas del día, días de la semana, etc.)
 - Efectos de la red (efectos en el tiempo de viaje de una vía provocados por el tráfico en vías adyacentes, paralelas, o que se conectan con ella)
 - Características de la población (diferencias temporales y espaciales en la composición del tráfico, en la actitud de los conductores, en el estilo de conducción, etc.)
 - Información de tráfico y respuesta de los usuarios
- b. Fluctuaciones en la oferta, que se deben a:
 - Geometría y layout de la infraestructura vial y regulaciones de tráfico (por ejemplo, los cambios de pista afectan la operación del sistema)
 - Condiciones ambientales: clima e iluminación.

- Gestión de tráfico: límites de velocidad, semáforos, etc.
- Accidentes

En la misma línea, Lomax et al. (2003) identifican las siguientes fuentes de variabilidad:

- Incidentes, colisiones, averías de vehículos y obstrucciones que interrumpen el flujo normal del tráfico.
- Zonas de trabajo, de construcción o mantenimiento.
- Clima: todas las condiciones que alteran la superficie de la carretera y los eventos que afectan la visión de los conductores, como niebla, nieve, lluvia, sol en los ojos del conductor, etc.
- Fluctuaciones en la demanda.
- Eventos especiales que tienen impacto en los volúmenes de viaje en sus proximidades.
- Dispositivos de control de tráfico: señales mal instaladas o semáforos mal sincronizados.
- Capacidad inadecuada, ya que normalmente las carreteras congestionadas son más susceptibles a los efectos de cualquiera de los factores antes mencionados.

Todos estos factores influyen en que los tiempos de viaje posean variabilidad. En Bates et al. (1987) se definen tres tipos de VTV:

- Variabilidad entre días: corresponde a cambios en los tiempos de viaje de un día a otro, y es producida por eventos inesperados, como el clima o los accidentes. Ocurre en viajes similares realizados en el mismo período de tiempo pero en distintos días y depende de los efectos de la congestión no recurrente.
- Variabilidad entre períodos del día: corresponde a cambios en el tiempo de viaje que se deben a la congestión recurrente de las horas punta, experimentada por vehículos que realizan similares viajes en distintos períodos de tiempo del día.
- Variabilidad entre vehículos: es el resultado del distinto comportamiento de los conductores, como la velocidad o los cambios de pista, experimentado entre varios vehículos que realizan un viaje similar en el mismo período de tiempo.

En esta tesis se estudiará la VTV entre días y entre períodos del día, ya que las bases de datos que se utilizan para este análisis contienen tiempos de viaje registrados en un conjunto de pares origen destino, que fueron repetidos a lo largo de varios días y en distintos períodos del día. Esto permitirá estudiar el efecto que la congestión recurrente y no recurrente posee en cada uno de los pares origen destino en estudio.

2.3 MEDIDAS DE VTV

En la literatura se ha propuesto un gran número de medidas de la variabilidad del tiempo de viaje, no existiendo un acuerdo sobre cuál es la manera más adecuada de medirla.

Las medidas de VTV propuestas y analizadas en la literatura se pueden clasificar en dos grupos (Pu, 2011): (i) medidas de confiabilidad de desempeño del sistema de transporte, como la desviación estándar de los tiempos de viaje que puede ser introducida en los modelos de media-varianza, y (ii) medidas que se utilizan para estimar la respuesta de los usuarios ante la falta de confiabilidad, como la probabilidad de llegar temprano o tarde al destino, variable que puede ser utilizada en un modelo de *scheduling*.

La importancia que la VTV tiene para los usuarios, influyendo de manera directa en sus decisiones de transporte como ruta, hora de salida del origen y modo, hace imprescindible determinar la mejor manera de medirla y encontrar así una relación entre esta medida y el tiempo promedio de viaje.

A continuación se presenta un listado de las medidas de VTV más frecuentemente utilizadas en la literatura. Es importante mencionar que todas estas medidas, incluso aquéllas basadas en percentiles, se obtienen de los tiempos de viaje medidos a lo largo de varios días.

- a) Desviación estándar (*SD*) del tiempo de viaje (Eliasson, 2006, Lomax et al., 2003, Mahmassani et al., 2012, Pu, 2011, Tirachini et al., 2014).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TV_i - \bar{TV})^2}{N}} \quad (3)$$

- b) Coeficiente de variación de los tiempos de viaje: proporción entre la desviación estándar y el promedio de los tiempos de viaje (Kieu et al., 2014, Pu, 2011).

$$CV = \frac{SD}{\bar{TV}} \quad (4)$$

- c) Variación porcentual (Lomax et al., 2003, Martchouk et al., 2010, Pu, 2011).

$$\text{Variación porcentual} = \frac{SD}{\bar{TV}} \times 100\% \quad (5)$$

- d) Diferencia entre los percentiles 90 y 10 de los tiempos de viaje (Eliasson, 2006, van Lint y van Zuylen, 2005).

e) Ventana de Tiempo de Viaje (Martchouk et al., 2010, Tu, 2008).

$$\text{Ventana de TV} = \overline{TV} \pm SD \quad (6)$$

f) Índice de variabilidad: representa la variación de las condiciones de viaje entre el período punta y fuera de punta y se define como la proporción entre el tiempo de viaje que corresponde al percentil 95 en hora punta y aquél que corresponde al percentil 95 del TV fuera de punta (Lomax et al., 2003, Tu, 2008).

g) Probabilidad de que un viaje se realice dentro de un rango que corresponde al promedio del TV por un factor determinado por el analista (Tu, 2008).

$$PR(a) = P(Ti \leq a * \overline{TV}) \quad (7)$$

h) Índice de tiempo búfer o de reserva (Aron et al., 2014, Cambridge Systematics et al., 2013, Lomax et al., 2003, Martchouk et al., 2010, Pu, 2011): es una medida que expresa el tiempo extra que un usuario debe asignar a su tiempo de viaje promedio para llegar a la hora a su destino el 95% de las veces.

$$\text{Índice de tiempo búfer} = \frac{\text{Percentil 95 del TV} - \overline{TV}}{\overline{TV}} \quad (8)$$

i) Índice de miseria: diferencia entre el promedio del 20% de los tiempos de viaje más largos y el tiempo de viaje promedio, normalizado por el tiempo de viaje promedio (Cambridge Systematics et al., 2013, Kim et al., 2013, Lomax et al., 2003, van Lint y van Zuylen, 2005).

$$\text{Índice de miseria} = \frac{\text{Promedio del 20\% de los mayores TV} - \overline{TV}}{\overline{TV}} \quad (9)$$

j) Índice de planificación de tiempo: corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje dividido en el tiempo de viaje a flujo libre (Aron et al., 2014, Cambridge Systematics et al., 2013, Lomax et al., 2003, Martchouk et al., 2010, Pu, 2011). Es la proporción de tiempo que un usuario debe asignar a su viaje, adicional al tiempo de viaje a flujo libre, para llegar a la hora el 95% de las veces.

$$\text{Índice de planificación de tiempo} = \frac{\text{Percentil 95 del TV}}{\text{TV a flujo libre}} \quad (10)$$

k) Percentil 95 (u otro) del tiempo de viaje (Pu, 2011): estima el tiempo de viaje que habrá en una ruta específica durante los días de mayor tráfico.

- l) Porcentaje de viajes a tiempo: es el porcentaje de viajes cuyo tiempo es menor a un nivel aceptable, por ejemplo, un valor del 1,1 veces el promedio del TV (Cambridge Systematics et al., 2013, Lomax et al., 2003, Martchouk et al., 2010, Pu, 2011).
- m) λ_{skew} o asimetría del tiempo de viaje (Aron et al., 2014, Cambridge Systematics et al., 2013, Pu, 2011, Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012, Tu, 2008, van Lint et al., 2008): indica el grado de asimetría de la distribución del tiempo de viaje. Para valores grandes de λ_{skew} la distribución es muy inclinada, y por lo tanto la confiabilidad del tiempo de viaje es baja. Cuando λ_{skew} es igual a uno la distribución es simétrica y es necesario analizar el ancho de la distribución para poder decir algo de la VTV (van Lint et al., 2008).

$$\lambda_{skew} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 50 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}} \quad (11)$$

- n) λ_{var} o ancho del tiempo de viaje (Aron et al., 2014, Cambridge Systematics et al., 2013, Pu, 2011, Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012, Tu, 2008, van Lint et al., 2008): entrega el ancho relativo de la distribución de TV con respecto a la mediana en un cierto período. Cuanto más amplia la distribución es relativa a la mediana, mayor será el rango de tiempos de viaje que pueden ocurrir y por lo tanto, la confiabilidad del tiempo de viaje será inferior (van Lint et al., 2008).

$$\lambda_{var} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV}} \quad (12)$$

La desviación estándar es una de las más medidas de variabilidad más utilizadas en la literatura. A pesar de esto, presenta ciertos inconvenientes (Pu, 2011):

- Es difícil de interpretar por audiencias no técnicas
- No está muy relacionada con experiencias diarias de viajes al trabajo
- Le da el mismo peso a llegar temprano que a llegar tarde, cuando se sabe que es peor llegar tarde

Pu (2011) examina analíticamente un grupo de medidas de confiabilidad asumiendo una distribución lognormal de los tiempos de viaje y recomienda utilizar el coeficiente de variación (CV) en lugar de la desviación estándar. Si bien es cierto, ambas medidas son similares en muchos aspectos, a diferencia de la desviación estándar, el coeficiente de variación se aproxima bien a otras medidas de confiabilidad, es decir, presenta estabilidad en su magnitud relativa a medidas como el Índice de planificación de tiempo o el parámetro λ_{skew} .

Lomax et al. (2003), recomienda el porcentaje de variación, el índice de miseria y el índice de tiempo búfer como medidas de confiabilidad.

van Lint y van Zuylen (2005) y van Lint et al. (2008) exponen que la media y la desviación estándar no dan un buen entendimiento de la VTV, ya que tienden a ocultar importantes aspectos de la distribución de los tiempos de viaje, como su asimetría y su ancho, los que constituyen aspectos relevantes de la falta de confiabilidad. Consecuentemente proponen dos medidas de confiabilidad basadas en los percentiles 10, 50 y 90 para una ruta dada: λ_{skew} y λ_{var} . Taylor y Susilawati (2012) y Susilawati et al. (2013) también argumentan que la desviación estándar no es la medida de variabilidad más apropiada, ya que se trata de una medida simétrica, y la forma de la distribución de probabilidad de los tiempos de viajes no es simétrica sino que presenta una notoria asimetría positiva, por lo tanto establecen que sería más adecuado utilizar una medida direccional que incluya el cálculo de percentiles, como el índice de tiempo búfer o los mismos λ_{skew} y λ_{var} .

En esta tesis se estudiará la VTV representada por medidas simétricas (SD) y por medidas asimétricas (λ_{skew} y λ_{var}) y se compararán los resultados obtenidos por ambos tipos de medidas para cada modo. La elección de la desviación estándar, como ya se mencionó anteriormente, se basa principalmente en el hecho de que se puede incluir de manera directa en el modelo de utilidad media-varianza.

Es necesario tener un buen conocimiento de la distribución del tiempo de viaje para determinar cuál de estas medidas es la más apropiada para cuantificar la variabilidad. En la siguiente sección se muestra lo expuesto en la literatura con respecto a este tema.

2.4 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

A lo largo de los años en la literatura se han empleado varias distribuciones de probabilidad para modelar los tiempos de viaje. Las distribuciones más utilizadas han sido Lognormal, Normal, Gamma, Burr y Weibull. La mayoría de los estudios muestran que la forma de la curva del tiempo de viaje es inclinada y presenta una cola derecha más larga (Kieu et al., 2014, Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012), sin embargo existen autores que han encontrado que ésta posee forma simétrica como la distribución Normal (Mazloumi et al., 2010).

En el estudio de Aron et al. (2014), se comparan seis distribuciones: Lognormal, Gamma, Burr, Weibull, Normal Mixture (una mezcla de dos distribuciones normales) y Gamma Mixture (una mezcla de dos distribuciones Gamma). Se realizaron pruebas para identificar los parámetros de todas ellas

y así determinar cuál ajusta mejor a la distribución empírica del tiempo de viaje, para una sección de tres kilómetros de la autopista francesa A4-A86. Los resultados indican que para estos datos, las distribuciones que mejor ajustan son la Normal Mixture y la Gamma Mixture.

En Kieu et al. (2014) se utilizó datos de tiempo de viaje en transporte público de Brisbane, Australia, para probar cuál de todas las distribuciones continuas de probabilidad ajustaba mejor a sus datos empíricos. Dejó fuera de su análisis sólo a las distribuciones discretas, debido a que la naturaleza del tiempo de viaje es continua. La lista de las distribuciones analizadas es: Beta, Birnbaum-Saunders, Burr, Chi-Squared, Dagum, Erlang, Exponential, Frechet, Gamma, Generalized Pareto, Inverse Gaussian, Levy, Logistic, Log-logistic, Lognormal, Nakagami, Normal, Rayleigh, Rician, Pareto, t location-scale y Weibull.

Los resultados muestran a cinco distribuciones de tiempo de viaje en autobús como mejores candidatas: Burr, Gamma, Lognormal, Normal y Weibull. Mientras Normal y Lognormal se utilizan comúnmente en los estudios de transporte público (Mazloumi et al., 2010), las otras tres son relativamente nuevas.

La distribución Burr ha sido utilizada para modelar el tiempo de viaje de vías urbanas en estudios recientes (Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012). Se describe como una distribución de cola pesada, muy asimétrica que ajusta mejor cuando el TV está inclinado a la izquierda y con una larga cola, por lo que su ventaja es que su cola a menudo encaja con las distribuciones empíricas, permitiendo modelar tiempos de viaje inusualmente altos y poco frecuentes.

En la tesis elaborada por Lagos (2014), se estudia el ajuste entre la distribución Lognormal, y la distribución de tiempos de viaje observados de dos servicios alimentadores del sistema de transporte público de Santiago, Transantiago. Los tiempos de viaje fueron obtenidos de datos de monitoreo de buses (GPS), y están asociados a un conjunto de 1036 arcos de la ciudad. La información es de junio del año 2010 y el análisis se realizó por hora, en 18 horas de un día laboral normal. Se obtiene como resultado que en el 58,8% de las combinaciones arco-hora, los tiempos de viaje observados distribuyen Lognormal. El resto de los arcos-hora posee características que hacen empeorar el ajuste, como por ejemplo, la presencia de semáforos y lomos de toro, entre otros. Además se analiza una muestra del total de arcos y se estudia el ajuste de los datos de tiempo de viaje a la distribución Burr, encontrando que el porcentaje de ajuste de los datos es de un 79,17%, es decir, esta última distribución modela mejor los tiempos de viaje que la Lognormal, coincidiendo con los resultados de Susilawati et al. (2013).

La distribución de Weibull ha sido utilizada en la literatura para representar el tiempo de viaje en arcos de una red (Al-Deek y Emam, 2006). Esta distribución es flexible, ajustándose a tiempos que presentan asimetría positiva, negativa, y también a datos simétricos.

La distribución Normal se ha sugerido como el descriptor del tiempo de viaje de bus en algunos estudios (e.g., Mazloumi et al., 2010). Tiene una forma simétrica y sus características son bien conocidas y se han estudiado a fondo, lo que facilita su análisis teórico. A pesar de su simetría todavía es una fuerte candidata como descriptor de tiempo de viaje de autobús según los resultados de Kieu et al. (2014).

Los resultados de las pruebas de Kieu et al. (2014) indican que las distribuciones Gamma y Lognormal son superiores al resto. Mencionan que la distribución Gamma se ha considerado durante mucho tiempo una de las que mejor ajusta a los tiempos de viaje en carretera. Además, demuestran que la distribución Lognormal es la mejor representante del tiempo de viaje en autobús (Mazloumi et al., 2010), debido a su flexibilidad y a su capacidad para ajustar a datos asimétricos. Concluyen finalmente que la Lognormal representa mejor los datos de TV de mayor asimetría y de colas más largas.

En esta tesis se analizará cuál de las distribuciones ajusta mejor a los tiempos de viaje empíricos que se posee, para metro, bus y automóvil. La metodología y los resultados de esta tarea se reportarán en los siguientes capítulos de esta tesis.

2.5 VTV EN TRANSPORTE PÚBLICO

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

- i. 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.
- ii. 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.
- iii. 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 cabezales en el caso de tiempos de viaje poco confiables. Esto aumenta la cantidad de buses y conductores necesarios para operar un plan.

En la literatura (Feng, 2014, El-Geneidy et al., 2011, entre otros) se ha comprobado por medio de análisis de regresión lineal múltiple, que la VTV en transporte público aumenta, además de con la congestión, con una serie de otros factores tales como el largo de ruta, el número de paradas y el número de pasajeros abordando o bajando de los buses.

Feng (2014) cuantifica simultáneamente los impactos de las demoras en el TV producidas por intersecciones semaforizadas, condiciones de tráfico y localización de paradas en un segmento entre paradas basándose en datos empíricos obtenidos de tres bases de datos de un corredor en una arteria urbana en Portland, Oregon: localización automática de vehículos a nivel de paradas de bus (Automated Vehicle Location - AVL), conteo automático de pasajeros (Automatic Passenger Counters - APC), conteo de vehículos en intersecciones y signal phase log data (que incluye las fases de los semáforos de prioridad o TSP). Desarrolla un modelo que analiza el tiempo de viaje entre paradas sin tomar en cuenta la actividad en el paradero, y otro en el que sí la considera. El resultado encontrado es que las demoras por semáforos en las intersecciones son el factor clave que afecta la VTV. El largo de las demoras está casi linealmente relacionado con la duración de la fase de rojo en la intersección y tanto el promedio como la desviación estándar del TV son mayores cuando la tasa RC es mayor. El efecto del volumen de tráfico en el TV de los buses varía significativamente por intersección y hora del día.

El-Geneidy et al. (2011) también utiliza datos de Automated Vehicle Location (AVL) y Automatic Passenger Counters (APC) de Metro Transit, Minnesota, para evaluar el desempeño del sistema. Realizó un análisis con modelos analíticos para predecir el tiempo de circulación (tiempo que le toma a un bus recorrer una ruta, considerando movimiento y detenciones), la adherencia a la programación y la confiabilidad del sistema de transporte público en dos escalas: a nivel de segmento entre puntos de control y a nivel de ruta. Se encuentra que las variables que significativamente aumentan la variabilidad del tiempo de circulación son el número de paradas, el número de pasajeros que utiliza el bus, el hecho de que el viaje sea en períodos punta, la desviación entre el intervalo real y el programado, la demora relativa al tiempo de pasada en el primer punto de control y la distancia de viaje.

Mazloumi et al. (2010) analiza la VTV en transporte público utilizando una base de datos de AVL de una ruta de bus en Melbourne, Australia. Analiza la distribución del tiempo de viaje para distintas ventanas de horas de salida y explora los factores que causan variabilidad con un análisis de regresión lineal, utilizando la desviación estándar (SD) como medida de la variabilidad. Los resultados muestran una relación casi lineal entre la SD y la media de los tiempos de viaje. Además muestran que en las horas punta los tiempos siguen una distribución normal, mientras que fuera de punta siguen una

distribución Lognormal. En su modelo de regresión las variables independientes significativas fueron el largo de la ruta, el número de paradas, el número de intersecciones semaforizadas, el uso de suelo de las zonas cercanas, el período (variables dummy que indican si corresponde a un período punta o fuera de punta), la lluvia (sólo en punta mañana), y la demora en la salida con respecto a la hora programada, algunas de las cuales se repiten en El-Geneidy et al. (2011).

Moghaddam et al. (2011) también utilizaron la desviación estándar como medida de la VTV. Utilizaron información de AVL y APC para estimar un modelo de regresión que busca medir la variación en los tiempos de viaje en una ruta de bus, o par OD, como se puede ver en la siguiente ecuación, donde $\widehat{SD}(OD)$ es la predicción de variabilidad del tiempo de viaje, $\hat{E}(OD)$ es el tiempo promedio de viaje estimado, VOC es la razón volumen-capacidad, que corresponde a un indicador de congestión en la ruta, y $signal$ es el número de intersecciones semaforizadas de la ruta.

$$\widehat{SD}(OD) = \beta_1 \hat{E}(OD) + \beta_2 VOC + \beta_3 signal \quad (13)$$

A diferencia de lo realizado por estos autores, en esta tesis se estudiará por primera vez de qué manera influye en la VTV el tiempo de viaje promedio de cada una de las etapas que constituye un viaje completo, de puerta a puerta: acceso, espera, en vehículo y trasbordo, para viajes realizados en metro y bus. Esto será posible debido a la riqueza de una de las bases de datos de tiempo de viaje en transporte público con la que se cuenta. En ella existen registros de tiempo de cada una de las etapas de una serie de viajes realizados entre varios pares origen destino, repetidos en distintos días a lo largo de varios años. La descripción en detalle de esta base de datos y el análisis realizado a partir de ella se muestra en los siguientes capítulos de esta tesis.

2.6 VTV EN TRANSPORTE PRIVADO

Para el estudio de la variabilidad en viajes realizados en automóvil, ha sido común en la literatura relacionar la VTV con la congestión, por lo tanto, si existe una correlación positiva entre el tiempo de viaje y su variabilidad, un aumento en el flujo vehicular en condiciones de congestión hará aumentar tanto el promedio como la varianza de los tiempos de viaje. En Eliasson (2006) se investiga la relación entre los niveles de congestión, representados por el aumento relativo en el tiempo de viaje (tiempo de viaje dividido en el tiempo de viaje a flujo libre), y la VTV, representada por la desviación estándar relativa del tiempo de viaje (desviación estándar dividida en el tiempo de viaje) y se estima una función que puede predecir cómo los cambios en la congestión afectan la desviación estándar del tiempo de viaje. Se utilizan datos de tiempo de viaje en automóvil medidos continuamente

por un sistema de cámaras en varias calles del centro de Estocolmo, donde para cada período de 15 minutos se calcula el tiempo promedio y la desviación estándar de cada arco.

Martchouk et al. (2010) también utilizaron una medida de la congestión en su análisis: la razón volumen-capacidad (V/C). Usaron tecnología bluetooth para recolectar tiempos de viaje en dos tramos de un segmento de autopista en Indianápolis. Se calculó la desviación estándar (SD) y el promedio del TV en intervalos de 15 minutos para analizar la VTV entre vehículos, entre períodos y entre días, estimando un modelo denominado SURE (Seemingly Unrelated Regression Equations) que consiste en un sistema de dos ecuaciones que describen y predicen el tiempo de viaje promedio y la VTV, representada por la SD. Las variables independientes del modelo de VTV son la velocidad, variables dummy para los períodos punta tarde y nocturno y la longitud del segmento estudiado. La SD oscila entre un 5 y un 15% del TV promedio y en hora peak aumenta hasta el 50%. El modelo es efectivo prediciendo el TV promedio en ambos tramos del segmento y prediciendo la SD sólo en un tramo que no posee rampa de salida. La predicción en el segundo tramo no es muy buena debido a que la salida provoca que se generen colas y que todos se muevan hacia la pista derecha, lo que hace que el flujo no sea consistente y sea difícil de predecir.

3. DESCRIPCIÓN DE DATOS

Para el análisis de la caracterización de la VTV en Santiago se cuenta con cuatro bases de datos (BD) que contienen información de tiempos de viaje para los distintos modos en análisis, que fueron proporcionadas por distintas entidades y cuya información fue obtenida por medio de distintas metodologías de recolección de datos. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los principales contenidos de estas bases de datos, y a continuación, se entrega la descripción en detalle de cada una de estas fuentes de información.

3.1 BD1: UOCT - TIEMPO DE VIAJE EN AUTOMÓVIL

Para el análisis de la variabilidad del tiempo de viaje en automóvil se elaboró una base de datos (BD1: UOCT) a partir de información de tiempo de viaje proporcionada por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT), la entidad gubernamental que está a cargo de administrar y operar los sistemas de control de tránsito en el área Metropolitana de Santiago.

Los tiempos de viaje fueron obtenidos mediante el método del vehículo flotante, el que consiste en solicitar a un vehículo de prueba registrar el tiempo que tarda en realizar un viaje determinado en un cierto par origen destino y período definido, manteniéndose en el flujo vehicular sin ser sobrepasado y sin sobrepasar a otros vehículos, o siendo adelantado por el mismo número de vehículos que él ha adelantado. La UOCT realiza este tipo de mediciones habitualmente en un grupo de pares origen destino en la ciudad de Santiago, de manera de monitorear la evolución de los tiempos de viaje a lo largo del tiempo.

Dato/Variable		BD1	BD2	BD3	BD4
Fuente		UOCT	DTPM	DTPM	Metro
Información contenida		Tiempo de viaje en automóvil	Tiempo de viaje en transporte público	Tiempo de viaje en transporte público	Tiempo de viaje en metro
Metodología de obtención de datos		Método del vehículo flotante	Mediciones en terreno por personas	Transacciones BIP! y GPS	Software interno de Metro
Etapas del viaje registrada		Tiempo en vehículo Automóvil	Tiempo de acceso, espera, en vehículo (bus y metro), trasbordo y total (puerta a puerta)	Tiempo en vehículo Bus	Tiempo en vehículo Metro
Fecha observada		Marzo 2010 - Junio 2014	Mayo 2007 - Diciembre 2012	25 - 31 de mayo 2014	18 - 25 de abril 2015
Períodos de tiempo registrados	Punta mañana	08:00-09:00	6:30-9:30	06:30-08:30	06:30-08:30
	Transición punta mañana			08:30-09:30	08:30-09:30
	Fuera de punta mañana		9:30-12:30	09:30-12:30	09:30-12:30
	Punta medio día			12:30-14:00	12:30-14:00
	Fuera de punta tarde		14:30-16:30	14:00-17:30	14:00-17:30
	Punta tarde	18:00-20:00	17:30-20:30	17:30-20:30	17:30-20:30
	Transición punta tarde			20:30-21:30	20:30-21:30
	Fuera de punta nocturno			21:30-23:00	21:30-23:00
Nocturno			20:30-01:00		
Número de observaciones		2.616 registros en 25 pares OD	35.340 registros en 66 pares OD	42.125 registros en 130 pares OD	29.860 registros en 28 pares OD
Velocidad promedio (km/h)	Punta mañana, auto	20,2			
	Punta tarde, auto	17,9			
	Punta mañana, bus		17,6	Tráfico mixto: 8,8 Pista sólo bus: 12,5 Corredor: 20,3	
	Fuera de punta mañana, bus		18,2	Tráfico mixto: 10,4 Pista sólo bus: 15,6 Corredor: 23,4	
	Punta tarde, bus		15,3		
	Punta mañana, metro		28,2		26,1
	Fuera de punta mañana, metro		31		24,8
	Punta tarde, metro		29,1		24,6
Longitud promedio de viaje (km)		2,4	Bus: 5,6 Metro: 9,6	2,1	3,6

Tabla 1: Descripción de bases de datos de tiempos de viaje

La información fue proporcionada en un documento Excel, en el formato que se muestra en la Figura 1, por lo que fue necesario elaborar una planilla con el compilado de estos datos.

Figura 1: Formato de información proporcionada por UOCT

MEDICIONES DE TIEMPOS DE VIAJE EN DIVERSOS EJES
(formato min:seg)

EJE: AV.BILBAO
 TRAMO: TOBALABA Y PEDRO DE VALDIVIA
 HORARIO: 18:00 - 20:00
 DISTANCIA: 2,3 KM
 SENTIDOS: O - P
 FECHA: martes 16/11/2010
 MEDIDOR: Nicolás Bustos

SENTIDO O - P	
HORA	TIEMPO
18:04	5:27
18:20	7:04
18:36	7:05
18:53	7:15
19:12	7:31
19:31	7:16
19:49	7:00

EJE: CINCO DE ABRIL
 TRAMO: AEROPUERTO Y GENERAL VELASQUEZ
 HORARIO: 8:00-9:00
 DISTANCIA: 2,3 KM
 SENTIDOS: P - O Y O - P
 FECHA: miércoles 17/11/2010
 MEDIDOR: Nicolás Bustos

SENTIDO P - O		SENTIDO O - P	
HORA	TIEMPO	HORA	TIEMPO
8:00	4:49	8:08	4:41
8:16	5:11	8:25	4:50

1trim2010	2trim2010	3trim2010	4trim2010	1trim2011	2trim2011	3trim2011
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede ver en la Tabla 2, la base de datos con la compilación de información posee 2.616 registros de tiempo de viaje, medidos en 13 tramos de avenidas y calles de Santiago, los que al ser diferenciados por período y por sentido, llegan a un total de 25 pares origen destino (OD), cuyo tiempo de viaje fue medido entre los años 2010 y 2014. Los viajes se registraron 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.

PAR OD	EJE	ENTRE CALLES	SENTIDO	PERÍODO	
				PM	PT
1	ALAMEDA	LAS REJAS Y EXPOSICIÓN	PO	98	181
2	ALAMEDA- PROVIDENCIA	SANTA ROSA Y SALVADOR	PO		169
3	AV. POCURO	PEDRO DE VALDIVIA Y TOBALABA	PO	72	124
4	AV. BILBAO	TOBALABA Y PEDRO DE VALDIVIA	OP	77	121
5	CARDENAL CARO	JOSÉ MIGUEL DE LA BARRA - LOS LEONES	PO		133
6	CINCO DE ABRIL	AEROPUERTO Y GENERAL VELASQUEZ	OP	66	
6	CINCO DE ABRIL	AEROPUERTO Y GENERAL VELASQUEZ	PO	77	
7	COLÓN-E. YÁÑEZ	A. VESPUCIO Y LOS LEONES	OP	83	
8	DIAGONAL PARAGUAY	SANTA ROSA Y SALVADOR	PO		163
9	LA DEHESA	AV. LAS CONDES Y EL RODEO	NS	79	147
9	LA DEHESA	AV. LAS CONDES Y EL RODEO	SN	86	154
10	MAPOCHO	W. MARTINEZ Y AV. BRASIL	PO	113	
11	TOBALABA	AV. GRECIA Y AV. QUILIN	NS	55	134
11	TOBALABA	AV. GRECIA Y AV. QUILIN	SN	56	
12	VICUÑA MACKENNA	LOS PIONEROS Y DEPARTAMENTAL	SN	68	
13	VIVACETA	HIPODROMO CHILE Y SANTA MARIA	NS	64	105
13	VIVACETA	HIPODROMO CHILE Y SANTA MARIA	SN	73	118

Tabla 2: Pares OD viajes en automóvil, base de datos BD1: UOCT

3.2 BD2: TERMÓMETRO - TIEMPO DE VIAJE EN TRANSPORTE PÚBLICO

Para estudiar la VTV en transporte público (bus y metro), en cada una de sus etapas por separado y en viajes completos de puerta a puerta, se utilizó información de mediciones de tiempo de viaje recogidas en Santiago en el marco del estudio "Elaboración de Indicadores de Desempeño del Sistema de Transporte Público de Santiago, Chile", más conocido como "Termómetro". Esta información fue proporcionada por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), que es la entidad gubernamental a cargo de planificar y regular el sistema de transporte público de Santiago, Transantiago, sistema que integra física y tarifariamente la totalidad servicios de buses de Santiago y la red de Metro, utilizando un único medio de pago (Tarjeta BIP!). DTPM fue el encargado de solicitar la ejecución del estudio "Termómetro" a una empresa consultora privada y 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.

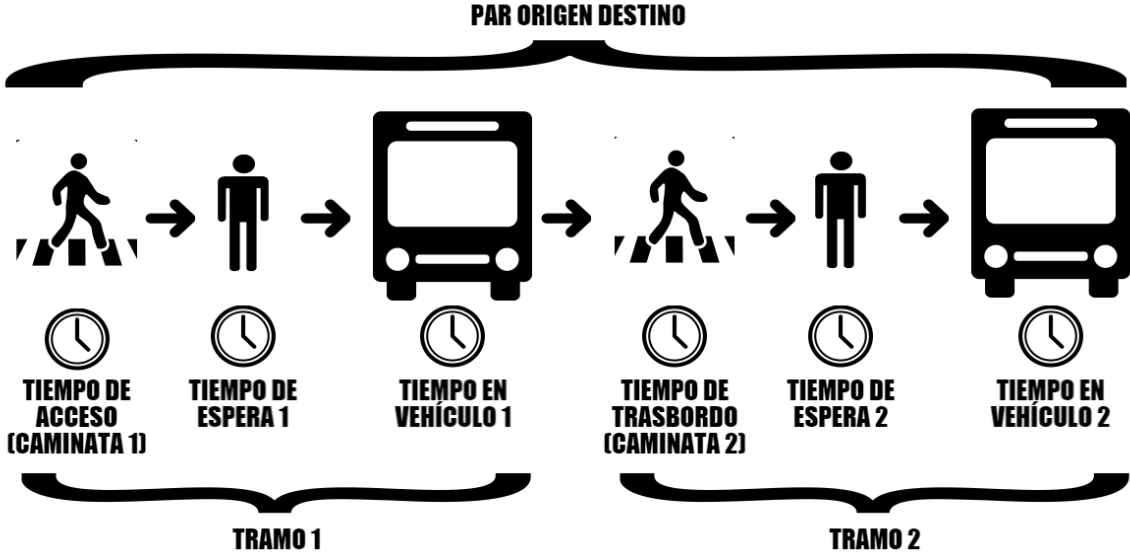
La información fue proporcionada en más de 200 bases de datos en MS Access y Excel, por lo que la primera parte de esta tarea consistió en compilar esta información, generando así una base de datos (BD2: TERMÓMETRO) que posee un total de 35.340 mediciones de tiempos de viajes realizados entre los años 2007 y 2012 entre 66 pares origen destino de la ciudad, en cinco períodos: punta mañana, fuera de punta, punta mediodía, punta tarde y nocturno. Las estrategias de viaje siempre fueron las mismas para cada uno de los pares OD, existiendo pares en los que el viaje se realiza en 1, 2, 3 y 4 vehículos (bus y/o metro).

La principal diferencia entre la información contenida en esta fuente de información y en las distintas bases de datos que se han empleado históricamente en el estudio de la confiabilidad de los tiempos de viaje, es que la riqueza de la BD2: TERMÓMETRO 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. Los viajes medidos se repitieron en los mismos períodos entre los mismos pares origen destino, en distintos días a lo largo de 6 años.

Luego de compilar la información se realizó una revisión preliminar a los datos con el objetivo de ver si existían en ellos errores de información en general o de digitación. Se encontró que el 15,2% de los datos poseía errores, donde gran parte de ellos correspondían a información errónea en los servicios que se utilizaron para hacer las mediciones (no correspondían a la línea o al servicio que debió haberse medido), registros de tiempo en blanco en alguna de las etapas del viaje, o claros errores de digitación. Finalmente la base de datos quedó con 29.967 observaciones válidas de tiempos de viaje.

A partir de esta base se elaboró una segunda base de datos, en la que se separó en registros distintos a cada tramo de cada viaje que se realiza en un vehículo distinto. En adelante en esta tesis, se entenderá por tramo a la parte de un viaje que se realiza en sólo un vehículo y que tiene asociado un tiempo de caminata, de espera y en vehículo. Por ejemplo, si el viaje realizado en la ruta X tiene un trasbordo y dos buses, se considera que en esta ruta hay dos tramos, con dos longitudes de viaje distintas, dos tiempos de caminata distintos, dos tiempos de espera distintos y dos tiempos en vehículo bus distintos, tal como se ilustra en la Figura 2. Resultó un total de 68.787 registros de tiempo de viaje realizados en 132 tramos. Al diferenciar estos tramos por el período al que pertenece cada observación, se obtienen 260 combinaciones *Tramo/Período*, de las cuales 209 se han efectuado en bus, y 51 en metro.

Figura 2: Diagrama de tiempos de viaje base de datos BD2: TERMÓMETRO



Fuente: Elaboración propia

3.3 BD3: GPS - TIEMPO DE VIAJE EN BUS

Para analizar la influencia que la implementación de infraestructura exclusiva para buses tiene en la VTV en bus se utiliza una base de datos que contiene tiempos de viajes del sistema Transantiago, tanto para bus como para metro. Esta base de datos fue proporcionada por DTPM y contiene observaciones de tiempo de todos los viajes registrados en el sistema entre el 25 y el 31 de mayo del 2015, completando un total aproximado de 23,6 millones de datos. Esta información se obtuvo a partir de las validaciones BIP! que los usuarios efectúan al abordar un bus o al ingresar a una estación de Metro. Debido a que en el sistema los usuarios no deben validar al bajar de un bus o salir de una estación de Metro, se desconoce el lugar y la hora de término del viaje, por lo que el tiempo que cada usuario se encuentra a bordo de un vehículo se estima a partir de la metodología desarrollada por Munizaga y Palma (2012), en base a las transacciones BIP! de un día completo, y de los pulsos GPS emitidos por los buses. La base de datos además incorpora las correcciones a la estimación de los tiempos de viaje en vehículo, de espera y de caminata propuesta en la tesis de Núñez (2015).

De esta base de datos original se seleccionó una submuestra de 42.125 registros de tiempos de viajes efectuados en 130 pares origen destino, que se utilizará para comparar la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo bus bajo tres alternativas de circulación: tráfico mixto, pista sólo bus (PSB) y corredor segregado. En la siguiente tabla se puede ver el número de observaciones y el número de pares OD que pertenece a cada una de estas alternativas.

TIPO DE VÍA	Nº OBSERVACIONES	Nº PARES OD
CORREDOR	8.839	41
PISTA SÓLO BUS	5.019	46
TRÁFICO MIXTO	28.267	43
TOTAL	42.125	130

Tabla 3: Pares OD y número de observaciones por tipo de vía, BD3: GPS

Para escoger los pares OD de viajes que se realizan en corredor se seleccionó de la base de datos original sólo aquellos viajes en los que tanto el paradero de subida como de bajada estuviesen en un corredor segregado. Además, la cantidad de viajes realizados en cada par y en cada período debía ser suficiente para poder hacer un posterior análisis estadístico. En este caso, se puso como condición que el número de observaciones debía ser mayor a 30 para un mismo par OD y período. Los 41 pares seleccionados se encuentran en las siguientes vías:

- 25 en Avenida Vicuña Mackenna – Concha y Toro (61%)
- 9 en Avenida Grecia (22%)
- 5 en Avenida Santa Rosa (12%)
- 2 en Avenida Las Rejas (5%)

Con respecto a los pares OD de viajes en pista sólo bus, se seleccionó un conjunto de viajes que se realizan en el Eje Alameda-Providencia-Apoquindo, ya que ésta constituye una de las principales arterias de la ciudad que cuenta con este tipo de infraestructura, y por lo tanto, existe un número bastante grande de viajes que se efectúa en ella. Además, esta información permitirá hacer una posterior comparación de la VTV entre dos modos distintos operando en distintas condiciones y sirviendo los mismos pares OD de un mismo eje: bus en pista sólo bus del Eje Alameda-Providencia-Apoquindo y Línea 1 de Metro.

Finalmente, para escoger los pares OD de viajes que se realizan en bus en tráfico mixto se seleccionó de la base de datos original, sólo aquellos viajes cuyos paraderos de subida y de bajada estuvieran en vías de tráfico mixto. En la Tabla 19 del ANEXO A: TABLAS se muestra el listado de vías seleccionadas, y se puede ver que estos pares se encuentran distribuidos por toda la ciudad.

Los datos seleccionados para los tres tipos de vía corresponden a 8 períodos del día, de acuerdo a la definición de períodos de Transantiago: punta mañana, transición punta mañana, fuera de punta mañana, punta mediodía, fuera de punta tarde, punta tarde, transición punta tarde y fuera de punta nocturno. Al desagregar por período cada viaje realizado en uno de los 130 pares OD, se obtiene un total de 314 combinaciones *ParOD/Período*, de las cuales 47 pertenecen a corredor, 71 a pistas sólo bus y 196 a tráfico mixto.

La riqueza de esta base de datos BD3: GPS permitirá comparar la variabilidad de viajes en bus operando en pistas sólo bus, en corredor y en tráfico mixto, y posteriormente comparar la VTV entre buses operando en pistas sólo bus, y metro.

3.4 BD4: METRO - TIEMPO DE VIAJE EN METRO

Para analizar la variabilidad del tiempo en metro se cuenta con una base de datos proporcionada por la Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A. Esta base de datos, a diferencia de las descritas en los puntos anteriores, cuenta con los itinerarios reales de todos los trenes de toda la red, en la semana del 18 al 24 de abril del 2015. Esto corresponde a los tiempos de viaje reales entre estaciones y a los tiempos en cada estación, de todas las expediciones de todas las líneas de la red, contando con un total de 493.603 registros de tiempo. Si bien es cierto, se cuenta con información de toda la red, para esta tesis sólo se consideró la Línea 1, ya que al contar además con una base de tiempos de viaje en bus para el Eje Alameda-Providencia-Apoquindo, como se describió en el punto anterior, resulta interesante hacer la comparación de lo que ocurre con la variabilidad del tiempo en dos modos de transporte público que operan en el mismo eje. Del total de observaciones de tiempo de la base de datos proporcionada por Metro, 143.139 registros corresponden a la Línea 1. La información contenida en esta base de datos es la siguiente:

- Id de Línea
- Estación
- Vía (o sentido de la expedición)
- Fecha
- Hora de salida de la estación
- Hora de llegada a la estación
- Id de Tren
- Tiempo recorrido entre la estación actual y la anterior
- Tiempo de estacionamiento en la estación

Debido a que el formato original de los datos no permitía su análisis directo, se procedió a ordenarlos, removiendo en primer lugar los errores (por ejemplo, estaciones en orden incorrecto de acuerdo al sentido, hora de llegada a la estación menor que la hora de salida de la estación anterior, entre otros), y se dejó fuera del análisis a los servicios cortos (o bucles), para facilitar la compilación de datos. Se asignó además un ID a cada expedición y se optó por dejar fuera del análisis a las expediciones que presentaban velocidades demasiado altas, y a aquéllas realizadas en días sábado y domingo. La base de datos BD4: METRO obtenida finalmente cuenta con 57.834 registros de tiempo de viaje entre estaciones, con 1.135 expediciones en Dirección Los Dominicos y 1.007 expediciones en dirección San Pablo.

A partir de esta información se seleccionó una submuestra que contiene el tiempo de viaje en metro de los mismos pares OD de la BD3: GPS para viajes en pista sólo bus. De esta manera se determinó que 28 pares OD de la línea 1 de metro corresponden a los mismos 46 pares OD de bus en PSB, tal como se muestra en la siguiente tabla. Existen pares OD de metro en los que hay más de un par OD de bus en PSB. Esto se debe a que existe más de una parada de buses asociada a una estación de Metro. Esta nueva base de datos cuenta con 29.860 registros.

PAR OD METRO	ESTACIÓN DE ORIGEN	ESTACIÓN DE DESTINO	N° PARES OD PSB
1	BAQUEDANO	UNIVERSIDAD DE CHILE	1
2	REPÚBLICA	U. DE SANTIAGO	1
3	UNIVERSIDAD DE CHILE	REPÚBLICA	1
4	U. DE SANTIAGO	LAS REJAS	1
5	TOBALABA	PEDRO DE VALDIVIA	1
6	MANUEL MONTT	BAQUEDANO	1
7	TOBALABA	MANUEL MONTT	1
8	TOBALABA	BAQUEDANO	3
9	TOBALABA	UNIVERSIDAD CATÓLICA	1
10	TOBALABA	SANTA LUCÍA	4
11	TOBALABA	LA MONEDA	3
12	TOBALABA	REPÚBLICA	1
13	TOBALABA	ESTACIÓN CENTRAL	1
14	TOBALABA	LAS REJAS	1
15	MANQUEHUE	LOS LEONES	1
16	UNIVERSIDAD DE CHILE	BAQUEDANO	1
17	MANUEL MONTT	LOS LEONES	1
18	REPÚBLICA	UNIVERSIDAD DE CHILE	1
19	LAS REJAS	SAN ALBERTO HURTADO	3
20	U. DE SANTIAGO	REPÚBLICA	1
21	LAS REJAS	ESTACIÓN CENTRAL	6
22	LAS REJAS	U. LATINOAMERICANA	1
23	LAS REJAS	LOS HÉROES	2
24	LAS REJAS	LA MONEDA	2
25	LAS REJAS	UNIVERSIDAD DE CHILE	1
26	LAS REJAS	SANTA LUCÍA	3
27	SALVADOR	TOBALABA	1
28	BAQUEDANO	TOBALABA	1

Tabla 4: Pares OD de viajes en metro seleccionados en base de datos BD4: METRO

4. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE

La VTV es el resultado de variaciones en el tiempo de viaje causadas por una serie de variables cuyo impacto no puede ser anticipado por los usuarios (Tu, 2008). Como se explicó en el punto 2.2 de esta tesis, algunas de las fuentes de VTV más frecuentes son las variaciones temporales en la demanda (e.g., entre horas punta y fuera de punta o entre días laborales y fines de semana), la actitud de los conductores, los accidentes, el clima, eventos especiales, trabajos en las vías, diferencias en la programación de semáforos y otros dispositivos de control de tráfico y los efectos que el tráfico en una vía produce en vías adyacentes (Cambridge Systematics et al., 2013, Kim et al., 2013, Tu, 2008, El-Geneidy et al., 2011, Mazloumi et al., 2010). Estos factores influyen en que el tiempo de viaje varíe entre días o entre distintas horas dentro de un mismo día.

Para esta tesis se cuenta con una serie de bases de datos que poseen registros de tiempo de viajes realizados en una misma ruta y en un mismo período del día, repetidos a lo largo de varios días laborales. Esto hace posible que se pueda analizar la variabilidad del tiempo de viaje entre distintos días, una de las variables más importantes que los usuarios toman en cuenta al realizar sus decisiones de viaje.

En este capítulo, en primer lugar se estimaron las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan a los tiempos de viaje observados en auto, bus y metro, para cada uno de los distintos tramos en los que existen mediciones en las bases de datos BD1: UOCT y BD2: TERMÓMETRO, es decir, 25 tramos de viajes en auto, 209 en bus y 51 en metro. En segundo lugar, se compararon los histogramas de tiempos de viaje realizados en metro y en bus en pista sólo bus para los mismos pares origen destino.

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 (e.g., desviación estándar, índice de miseria, índice de planificación de tiempo, entre otros), como lo hecho por Pu (2011) suponiendo una distribución Lognormal.

4.1 TEST DE BONDAD DE AJUSTE

Para analizar cuál es la distribución que mejor ajusta a los datos con los que se cuenta, se utilizarán los tests de bondad de ajuste Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov y el software estadístico Statgraphics. Los test de bondad de ajuste corresponden a pruebas estadísticas que se utilizan para determinar si los datos observados se ajustan o no a alguna distribución de probabilidades teórica (Ross, 2005), es decir, ver si existen diferencias

estadísticamente significativas entre la distribución observada (F_o) y la distribución esperada (F_e). Las hipótesis estadísticas que se plantean son las siguientes:

H_0 : Los datos observados siguen una distribución M

$$F_o = F_e$$

H_1 : Los datos observados no siguen una distribución M

$$F_o \neq F_e$$

Para la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov se utiliza un estadístico D , que está definido como la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $\hat{F}_o(x)$ y la frecuencia acumulada teórica $F_e(x)$ obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula. Para una muestra de tamaño n , el estadístico D se define en la Ecuación 14.

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} |\hat{F}_o(x_i) - F_e(x_i)| \quad (14)$$

Si los valores observados $\hat{F}_o(x)$ son similares a los esperados $F_e(x)$, el valor de D será pequeño, por lo tanto, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será:

Si $D \leq D_\alpha \Rightarrow$ No rechazar H_0

Si $D > D_\alpha \Rightarrow$ Rechazar H_0

Si α es el nivel de significancia de la prueba, el valor D_α se elige de tal manera que:

$$P(\text{Rechazar } H_0 / H_0 \text{ es cierta}) = P(D > D_\alpha / \text{Datos distribuyen } M) = \alpha \quad (15)$$

La decisión del contraste mostrado en la Ecuación 15 también puede hacerse empleando el p-valor asociado al estadístico D observado. El p-valor se define como:

$$p - \text{valor} = P(D > D_{obs} / H_0 \text{ es cierta}) \quad (16)$$

Si el p-valor es grande significa que dado que la hipótesis nula es cierta, el valor observado del estadístico D era esperable y no hay razón para rechazar la hipótesis. De esta forma, para un nivel de significancia α , la regla de decisión para este contraste es:

Si p-valor $\geq \alpha \Rightarrow$ No rechazar H_0

Si p-valor $< \alpha \Rightarrow$ Rechazar H_0

El test de bondad de ajuste Chi Cuadrado para una muestra aleatoria de tamaño n perteneciente a una población que tiene una distribución $f_o(x)$ se

utiliza más frecuentemente para datos discretos, por lo que en primer lugar se debe agrupar las observaciones de la muestra en k clases, siendo o_i la cantidad de observaciones en cada clase $i = 1, 2, \dots, k$. Con el modelo especificado $f_0(x)$ se puede calcular la probabilidad p_i de que un dato cualquiera pertenezca a una clase i . Con este valor de probabilidad se puede encontrar la frecuencia esperada e_i para la clase i , es decir, la cantidad de datos que según el modelo especificado deberían estar incluidos en la clase i :

$$e_i = p_i n \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (17)$$

Existen entonces dos valores de frecuencia para cada clase i :

o_i : frecuencia observada (corresponde a los datos de la muestra)

e_i : frecuencia esperada (corresponde al modelo propuesto)

Una condición necesaria para aplicar esta prueba que $e_i \geq 5 \forall i$. Para analizar la diferencia entre las frecuencias observadas (o_i) y las calculadas (e_i) se utiliza el estadístico χ^2 mostrado en la Ecuación 18.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (18)$$

Si r es la cantidad de parámetros de la distribución que deben estimarse a partir de la muestra, el análisis tiene $v = k - r - 1$ grados de libertad.

Con un nivel de significancia α se define un valor crítico χ_{α}^2 para el rechazo de la hipótesis propuesta $H_0: f(x) = f_0(x)$. El criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será el siguiente:

Si $\chi^2 \leq \chi_{\alpha}^2 \Rightarrow$ No rechazar H_0

Si $\chi^2 > \chi_{\alpha}^2 \Rightarrow$ Rechazar H_0

Equivalentemente, si el p-valor es menor que α , también se debe rechazar H_0 .

El test de bondad de ajuste de Chi cuadrado es de naturaleza discreta y no debe usarse si los datos están severamente redondeados, ya que la naturaleza discreta de los datos puede fácilmente distorsionar los resultados. Se puede utilizar para distribuciones continuas, siempre y cuando el tamaño de la muestra sea grande. Kolmogorov-Smirnov se puede utilizar para tamaños de muestra más pequeños. Como ventaja respecto a Kolmogorov-Smirnov, en Chi Cuadrado la distribución a la que se pretende ajustar podría no estar completamente especificada.

4.2 DISTRIBUCIONES DE TIEMPOS DE VIAJE EN AUTO, BUS Y METRO

En la literatura se ha estimado distribuciones de probabilidad continuas para el tiempo de viaje en automóvil en ciudades como San Antonio (Rakha et al., 2010), Adelaide (Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012), Paris (Aron et al., 2014) y Estocolmo (Eliasson, 2007), entre otras, mientras que para transporte público se ha utilizado tiempo de viaje de ciertas rutas de buses en ciudades como Melbourne (Mazloumi et al., 2010) y Brisbane (Kieu et al., 2014). En la mayoría de los estudios se ha demostrado que la forma de la curva del tiempo de viaje es inclinada y presenta una larga cola derecha (Cambridge Systematics et al., 2013, Kieu et al., 2014, Susilawati et al., 2013, Taylor y Susilawati, 2012, van Lint y van Zuylen, 2005). La existencia poco frecuente de tiempos de viaje muy largos consecuencia de incidentes, hace que la distribución de tiempos de viaje en muchos casos presente dicha asimetría positiva (van Lint et al., 2008), por lo tanto, en la literatura se ha utilizado frecuentemente distribuciones asimétricas como la Lognormal, Gamma, Burr y Weibul para ajustar a la curva de tiempos de viaje observados, sin embargo, también se han utilizado distribuciones simétricas como la Normal (Eliasson, 2007).

Los resultados encontrados en esta tesis para el tiempo de viaje en bus, tal como se puede ver en la Tabla 5, indican que en el 65,6% de los tramos analizados, distribuciones asimétricas como Lognormal y Loglogistic son las que mejor ajustan. En el resto de los tramos, el mejor ajuste se dio con distribuciones simétricas como la Normal, Logistic y Laplace.

DISTRIBUCIÓN	Nº DE TRAMOS	%
LOGNORMAL	8	3,8%
LOGNORMAL (3 P)	35	16,7%
LOGLOGISTIC	94	45,0%
LOGISTIC	60	28,7%
LAPLACE	4	1,9%
NORMAL	8	3,8%

Tabla 5: Distribuciones que mejor ajustan a tiempos de viaje en bus (BD2: TERMÓMETRO)

Para los tiempos de viaje en metro se muestra en la Tabla 6 que en el 53,8% de los tramos analizados ajustan mejor distribuciones asimétricas como Lognormal y Loglogistic, y en el resto, distribuciones simétricas como Logistic, Laplace y Cauchy.

DISTRIBUCIÓN	Nº DE TRAMOS	%
LOGNORMAL	1	2,6%
LOGNORMAL (3 P)	2	5,1%
LOGLOGISTIC	18	46,2%
LOGISTIC	4	10,3%
LAPLACE	4	10,3%
CAUCHY	10	25,6%

Tabla 6: Distribuciones que mejor ajustan a tiempos de viaje en metro (BD2: TERMÓMETRO)

Finalmente, para el tiempo de viaje en automóvil se encontró que la mayoría de los casos (84%), 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, Cauchy y Logistic.

DISTRIBUCIÓN	Nº DE TRAMOS	%
LOGNORMAL	11	44,0%
LOGNORMAL (3 P)	9	36,0%
LOGISTIC	1	4,0%
TRIANGULAR	1	4,0%
NORMAL	2	8,0%
CAUCHY	1	4,0%

Tabla 7: Distribuciones que mejor ajustan a tiempos de viaje en automóvil (BD1: UOCT)

En el caso particular de los automóviles, la distribución Lognormal ajusta a los tiempos de viaje observados en el 80% de las rutas estudiadas. Esta distribución ha sido propuesta por varios autores en la literatura de VTV, como Rakha et al. (2010) y Susilawati et al. (2010).

Para los casos de bus y metro, la distribución Loglogistic ajustó bien con la mayoría de los tiempos de viaje observados (45% de las rutas correspondientes a bus y 46% de las correspondientes a metro).

Las distribuciones Lognormal y Loglogistic son similares en su forma, y ambas se encuentran dentro del grupo de distribuciones que se utilizan comúnmente para analizar la confiabilidad del tiempo de vida útil de componentes y sistemas¹. En las siguientes ecuaciones se muestran las funciones de densidad de probabilidades de las distribuciones Lognormal (Ecuación 19) y Loglogistic (Ecuación 20).

$$f(x; \mu_y, \sigma_y) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (19)$$

¹ Wolfram Documentation Center, <http://reference.wolfram.com/language/guide/DistributionsUsedInReliabilityAnalysis.html>, accedido el 30 de Octubre de 2015

Donde μ_y y σ_y son el promedio y la desviación estándar de $y = \ln(x)$.

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1}}{\left(1+\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right)^2} \quad (20)$$

Donde $\alpha > 0$ es la mediana (parámetro de escala), y $\beta > 0$ es el parámetro de forma.

Por otro lado, en la siguiente ecuación se presenta la función de distribución de probabilidades Lognormal de 3 parámetros (Lognormal 3P), la que representa la distribución normal del logaritmo de la variable reducida $(x - c)$, donde c es un límite inferior y a y b son los parámetros de escala y de forma, que corresponden a la desviación estándar y a la media de los logaritmos de $(x - c)$, respectivamente.

$$P(X \leq x) = \int_c^x \frac{1}{a(x-c)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x-c)-b)^2}{2a^2}} dx \quad (21)$$

En la siguiente ecuación se muestra la función de densidad de probabilidades de la distribución Burr, donde k y c son parámetros de forma, y α es el parámetro de escala.

$$f(x; k, c, \alpha) = \frac{\left(\frac{k*c}{\alpha}\right)\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1}}{\left(1+\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right)^{k+1}} \quad (22)$$

De acuerdo con lo expuesto por Tadikamalla (1980), la distribución Burr es una generalización de la Loglogistic, que corresponde al caso especial en el que $c = \beta$ y $k = 1$ (ver Ecuación 20). De acuerdo a esto, los resultados de esta tesis concuerdan con lo expuesto por Taylor y Susilawati (2012), Susilawati et al. (2013) y Lagos (2014), entre otros, quienes encontraron que la distribución que mejor ajusta a los tiempos de viaje es la Burr. En Kieu et al. (2014), se obtuvo como resultado que tanto la distribución Lognormal como la Burr están entre las distribuciones que mejor ajustan a los datos de tiempo de viaje en bus.

En la Tabla 8 y en las Figuras 3, 4 y 5 se muestran ejemplos de distribuciones de probabilidad de tiempos de viaje en automóvil, bus y metro en rutas específicas.

Figura 3: Histograma y distribución Lognormal tiempo en vehículo auto (minutos) - Avenida Eliodoro Yáñez, entre Américo Vespucio y Los Leones

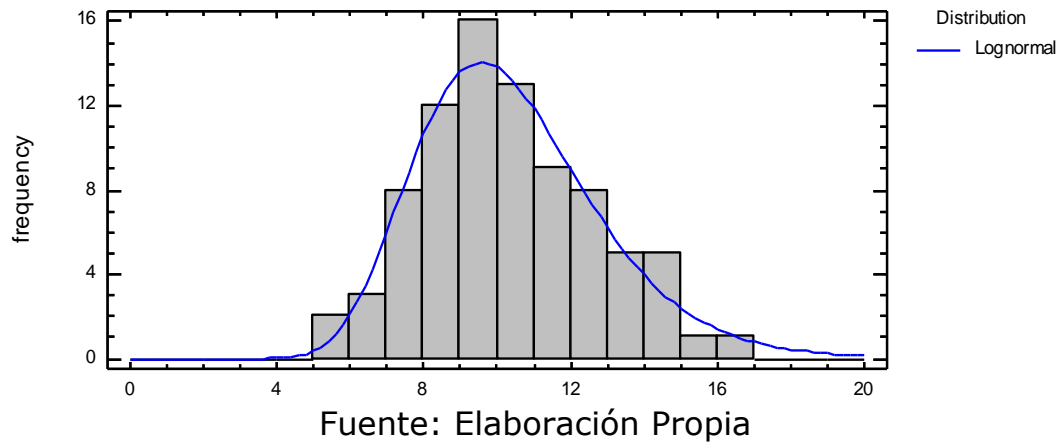


Figura 4: Histograma y distribución Loglogistic para tiempo en vehículo metro (minutos) - Viaje entre estaciones Plaza de Armas y Vicente Valdés

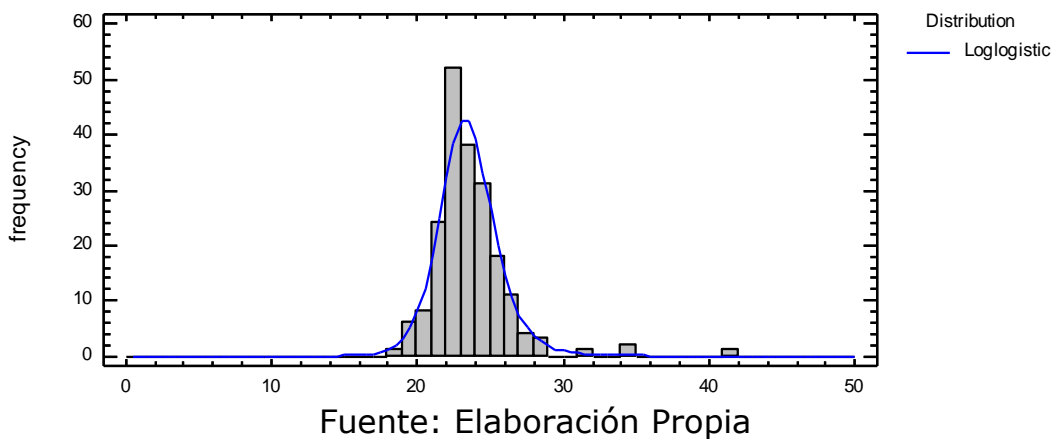
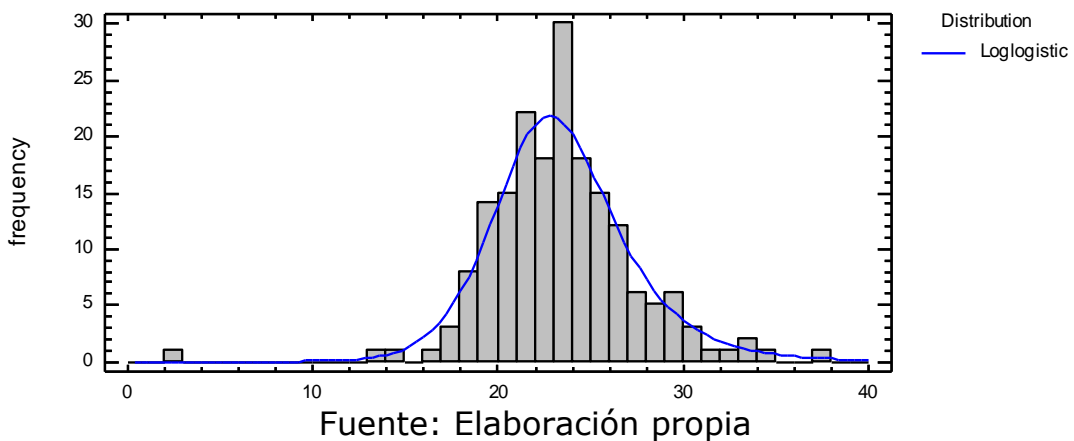


Figura 5: Histograma y distribución Loglogistic para tiempo en vehículo bus (minutos) - viaje realizado en el servicio 105, desde la parada Cardenal Raúl Silva H. y Pegaso, hasta la parada N°1 Metro San Alberto Hurtado



Modo	Auto	Bus	Metro
Distribución	Lognormal	Loglogistic	Loglogistic
μ (media)	10,42	23,53	23,65
σ (desviación estándar)	2,53	3,64	2,58
μ_y	2,32		
σ_y	0,24		
a (mediana)		23,18	23,38
b (forma)		0,09	0,05
Asimetría	0,27	0,73	2,64
Curtosis	-0,28	1,49	14,33
P-valor test Chi Cuadrado	0,78	0,97	0,57
P-valor test Kolmogorov-Smirnov	0,98	0,91	0,82

Tabla 8: Parámetros estimados para distribuciones en Figura 3, Figura 4 y Figura 5

De acuerdo a lo mostrado tanto en las Figuras 3, 4 y 5, como en la Tabla 8, se puede ver que el menor coeficiente de asimetría se encuentra en el histograma de tiempo de viaje en automóvil, y el mayor, en el histograma de metro. Esto indica que la curva del tiempo de viaje en metro presenta una mayor asimetría que la de los otros dos modos. Esta asimetría positiva está dada por valores atípicos en el tiempo de viaje en metro, producidos por eventos poco frecuentes que producen largas detenciones de trenes, como se observa en la cola de la derecha en el histograma de la Figura 4. Lo que la intuición indica sin embargo es que la variabilidad del tiempo de viaje debiese ser menor para viajes en metro, principalmente porque es un modo que no comparte infraestructura con otros modos, y no es afectado por la congestión. A continuación se compararán histogramas de tiempo de viaje en metro y en bus operando en pistas sólo bus, de manera de profundizar en este análisis.

4.3 HISTOGRAMAS DE TIEMPOS DE VIAJE EN METRO Y BUS EN PISTA SÓLO BUS

En el punto anterior se pudo observar que tanto para viajes realizados en automóvil, como en bus y en metro, las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan a los datos de tiempo de viaje observados corresponden a distribuciones asimétricas en su mayoría, como la Lognormal y la Loglogistic. En los ejemplos presentados en las Figuras 3, 4 y 5 y en la Tabla 8, se pudo ver que el modo que presenta una mayor asimetría positiva es el metro.

En las siguientes figuras se muestran dos ejemplos en los que se comparan los histogramas de frecuencias de tiempos de viaje para viajes realizados en un mismo par origen destino en dos modos de transporte público distintos: metro y bus en pista sólo bus. Los tiempos de viaje en metro fueron

extraídos de la base de datos BD4: METRO, y los de bus en pista sólo bus, de la BD3: GPS.

Figura 6: Histograma para tiempo en vehículo metro (minutos) - Viaje entre estaciones Tobalaba y Baquedano en punta tarde

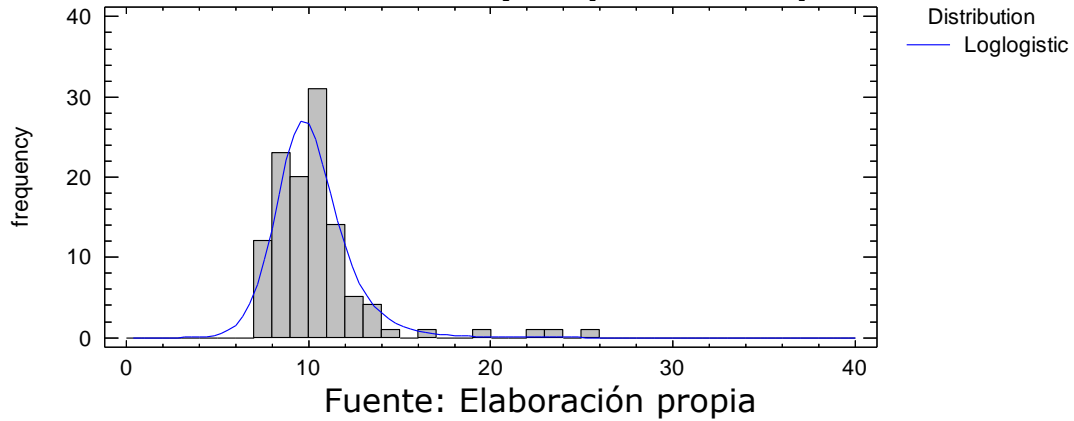


Figura 7: Histograma para tiempo en vehículo bus (minutos) -Viaje entre estaciones Tobalaba y Baquedano en punta tarde, en servicios T427 - T426 - T407 - T406

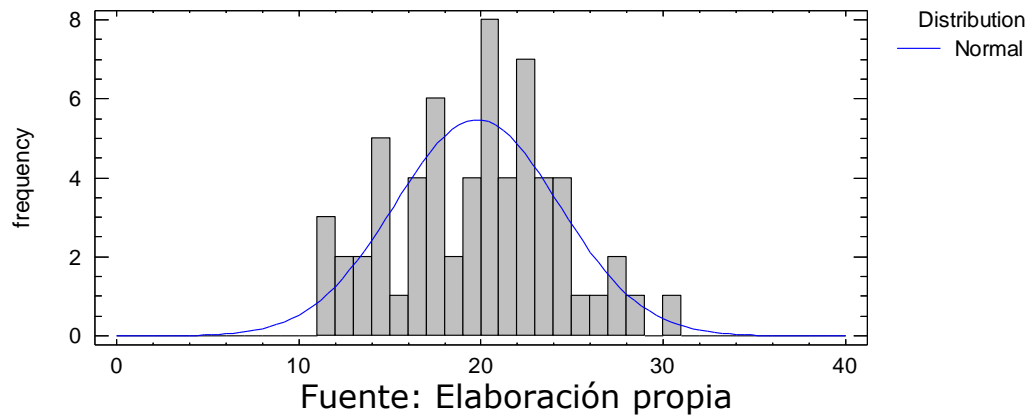


Figura 8: Histograma para tiempo en vehículo metro (minutos) - Viaje entre estaciones Tobalaba y Santa Lucía en punta tarde

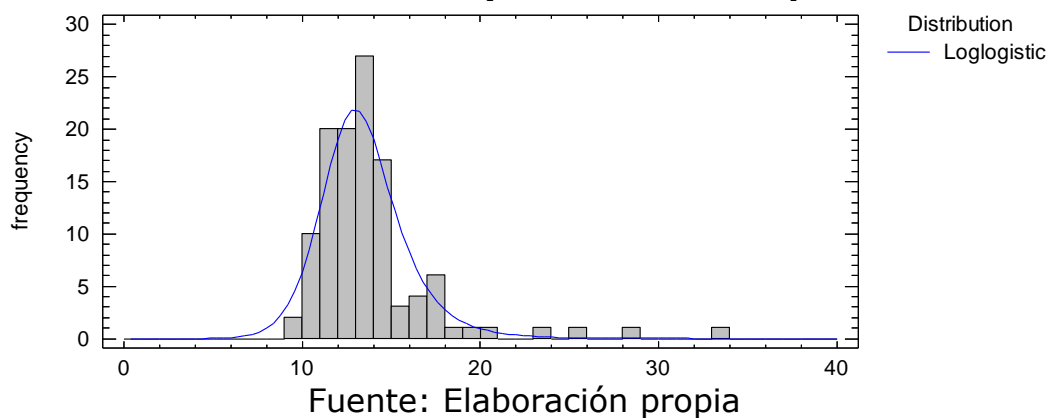
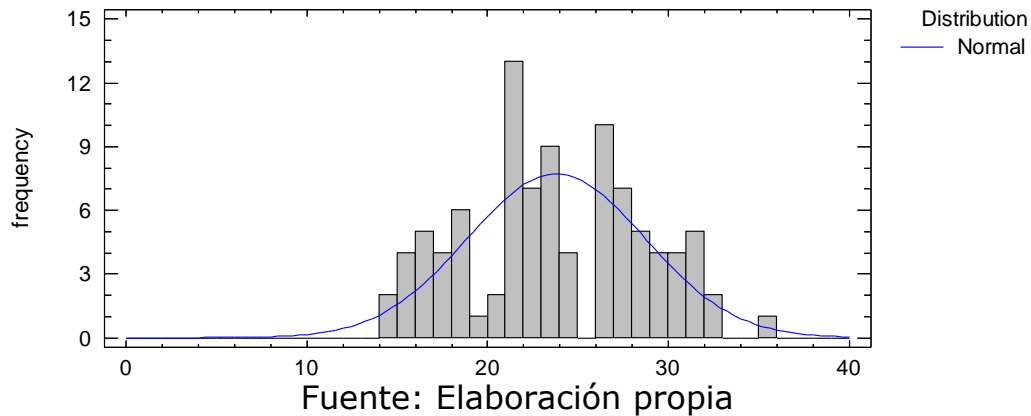


Figura 9: Histograma para tiempo en vehículo bus (minutos) - Viaje entre estaciones Tobalaba y Santa Lucía en punta tarde, en servicios T427 - T426 - T407 - T406



En ambos casos se puede ver que efectivamente las curvas de tiempo en metro presentan una mayor asimetría que las de buses. Sin embargo, esto no implica que metro posea una mayor VTV que bus. Como se definió en el punto 2.3 de esta tesis, existen dos medidas de variabilidad que tienen que ver con características de la distribución de tiempos de viaje: λ_{skew} y λ_{var} , relacionadas con la asimetría y con el ancho de la curva, respectivamente. Lo que estos valores nos indican es que si la curva de tiempos de viaje es muy inclinada ($\lambda_{skew} \gg 1$), la variabilidad en los tiempos de viaje es alta. Sin embargo, λ_{var} representa otro tipo de variabilidad, dada por el ancho de la curva con respecto a la mediana. Si la curva es muy ancha, existe un alto rango de valores que puede tomar el tiempo de viaje, y por lo tanto, existe baja confiabilidad a pesar de que la curva no presente una asimetría tan fuerte.

En el ejemplo mostrado se puede ver a simple vista que las curvas de tiempo en bus presentan un ancho relativo a la mediana mayor que las de tiempo en metro, pero una asimetría menor. Se observa entonces que ambos modos presentan predominancia de dos tipos de variabilidad distintos, la primera dada por una mayor asimetría positiva de la curva producida por pocos valores atípicos de tiempo, probablemente generados por algún incidente, y la segunda, dada por el ancho de la curva con respecto a la mediana. Se definirán estos dos tipos de variabilidad como *VTV por asimetría* y *VTV por ancho*, respectivamente. En los siguientes capítulos se analizará en profundidad cada uno de estos conceptos.

5. IDENTIFICACIÓN DE INCIDENTES

Para estudiar la VTV de manera correcta es importante en primer lugar conocer las variables que inciden en ella. Una de las fuentes de variabilidad más comunes es la congestión, pero es relevante distinguir entre la congestión recurrente, resultado de una capacidad vial insuficiente para los niveles de demanda en ciertos 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 momentos.

Es fundamental entonces detectar la presencia de incidentes en las rutas estudiadas en esta tesis. El objetivo de este capítulo es identificar los valores extremos de tiempo de viaje presentes en las bases de datos BD1: UOCT y BD2: TERMÓMETRO, que corresponden a incidentes, para todos los tramos de viaje en automóvil (25), bus (209) y metro (51), de manera de determinar la influencia de estos incidentes en la variabilidad de los tiempos de viaje.

Para conseguir este objetivo se aplicarán tres pruebas de detección de valores atípicos (también llamados valores extremos o *outliers*): el test de Grubbs, el test de Hampel y el test MAD Z-Score. Además se utilizará el software estadístico Statgraphics. A continuación se describen los test utilizados y se exponen los resultados obtenidos.

5.1 PRUEBAS DE DETECCIÓN DE VALORES ATÍPICOS

El objetivo de las pruebas de detección de *outliers* es determinar si en una muestra de n observaciones numéricas existen o no valores atípicos. Un valor atípico es una observación que presenta una marcada desviación con respecto a los valores de todas las otras observaciones de la muestra (Grubbs, 1969). En el contexto de esta tesis, corresponde a una observación que posee un tiempo de viaje muy por sobre el tiempo promedio presente en una ruta y en un período en particular.

Existe una serie de procedimientos para la identificación de *outliers* (Manoj y Senthamarai Kannan, 2013), dentro de los que se encuentran el test de Grubbs, el de Hampel, el test de Dixon, el Z-Score y el MAD Z-Score, o Z-Score Modificado. La hipótesis que se plantea en estos test es la siguiente:

H_0 : no existen valores atípicos en la muestra

H_1 : existe al menos un valor atípico en la muestra

Para el análisis que se presenta a continuación se utilizaron 3 métodos de detección de valores atípicos: test de Grubbs, test MAD Z-Score y test de Hampel. Los dos primeros asumen normalidad en los datos, y el tercero calcula la robustez de los datos a partir de la distancia entre cada observación y la mediana de la muestra.

El test de Grubbs (Grubbs, 1969) es válido sólo cuando la muestra es de tamaño $n \geq 3$. Para su aplicación, en primer lugar se debe calcular el estadístico G , que corresponde al número máximo de desviaciones estándar a la que los valores x_i de la muestra se encuentran de la media muestral \bar{x} , de la siguiente manera:

$$G = \frac{\max|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (23)$$

Donde s es la desviación estándar de la muestra. Tomando como referencia una distribución t de Student con $n - 2$ grados de libertad, y siendo α el nivel de significancia del test, se define k tal que:

$$\Pr(t_{n-2} > k) = \frac{\alpha}{2n} \quad (24)$$

La hipótesis nula se rechazará entonces si se cumple la siguiente condición:

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{k^2}{n-2+k^2}} \quad (25)$$

El segundo test que se aplicará a los datos es el Test de Hampel (Hampel, 1985), el que corresponde más a una prueba de robustez de los datos que a un test de detección de valores atípicos, ya que trabaja en base a la mediana y no a la media. Para su aplicación, en primer lugar se calcula la mediana (Me) de la muestra de datos a analizar. Luego se obtiene la Desviación Absoluta con respecto a la Mediana o *MAD* (por sus siglas en inglés: *Median Absolute Deviation*), de todos los datos x_i de la muestra, de la siguiente forma:

$$MAD = \text{mediana}|x_i - Me| \quad (26)$$

Finalmente, si se cumple que $|x_i - Me| \geq g * MAD$, entonces x_i es un valor atípico, donde g es el identificador de Hampel, cuyo valor usualmente es 4,5, pero puede variar de acuerdo al tamaño de la muestra y al nivel de significancia del test (Hampel, 1985, Davies y Gather, 1993).

El tercer test aplicado en esta tesis corresponde al MAD Z-Score. Esta prueba nace a partir del test Z-Score. Para utilizar el test Z-Score en una muestra de n observaciones, donde $X_i \sim N(\mu, \sigma)$, μ es la media y σ , la desviación estándar de la muestra, se define una variable $Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$, con $Z \sim N(0,1)$. Si se cumple

que $|Z_i| > 3$ (Sincich, 1996), x_i es considerado un valor atípico. Esto quiere decir que x_i se encuentra a una distancia de por lo menos 3 desviaciones estándar de la media. Este test presenta varias limitantes. Una de ellas (Seo, 2002) es que tanto el valor de la media como el de la desviación estándar puede estar inflado por uno o unos pocos valores atípicos, por lo que un *outlier* menos extremo podría no ser identificado como tal, debido a la presencia de un *outlier* más extremo.

Para evitar este problema, Iglewicz y Hoaglin (1993) propusieron el test MAD Z-Score, o Z-Score Modificado, en el que en lugar de incluir la media y la desviación estándar en su definición, incluye a la mediana (\tilde{x}) y a la desviación absoluta con respecto a la mediana (MAD). Se define la variable M_i como se muestra a continuación:

$$M_i = \frac{0,6745(x_i - \tilde{x})}{MAD} \quad (27)$$

Cualquier valor x_i para el cual $|M_i| > 3,5$ se identifica como un valor atípico.

Para la aplicación de los test de Grubbs y MAD Z-Score a los datos de tiempo de viaje de esta tesis se utilizó el software Statgraphics, trabajando sobre el logaritmo natural de los tiempos de viaje, ya que estas pruebas asumen normalidad en los datos. El test de Hampel, por otro lado, se aplicó directamente. Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la siguiente sección.

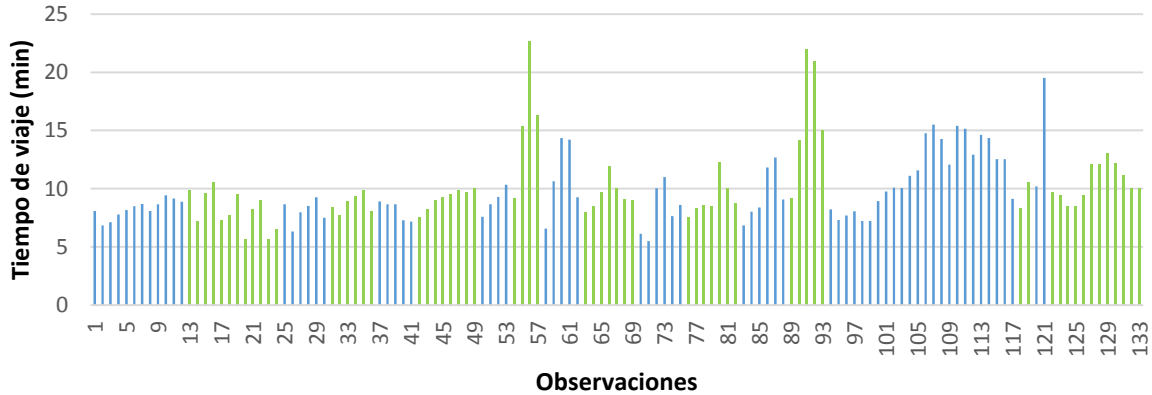
5.2 DETECCIÓN DE INCIDENTES

La presencia poco frecuente de tiempos de viaje más largos de los habituales hace que la distribución de tiempos de viaje presente una asimetría positiva. Sin embargo, si se analizan los ejemplos de las Figuras 3, 4 y 5, se podría decir que la influencia de valores atípicos en estos casos es limitada, ya que las distribuciones estimadas no presentan una gran asimetría (ver Tabla 8).

La influencia de los valores atípicos se puede apreciar en los datos con los que se cuenta en esta tesis. En las Figuras 10, 11 y 12 se muestra un ejemplo de una ruta de automóvil ubicada en el eje Cardenal Caro, entre las calles José Miguel De La Barra y Los Leones en dirección poniente oriente en punta tarde, donde se puede observar de manera clara las diferencias entre los resultados arrojados por cada test. Los datos de tiempo de viaje identificados como valores atípicos se muestran de color rojo, mientras que las observaciones de un mismo día se muestran de un mismo color, ya sea verde o azul. En el ejemplo de la Figura 10, Grubbs no encontró ningún valor atípico, en cambio Hampel (Figura 11) identificó como outliers a observaciones de tiempo de viaje que no necesariamente son resultado de la presencia de algún incidente. El resultado más acertado en este ejemplo fue

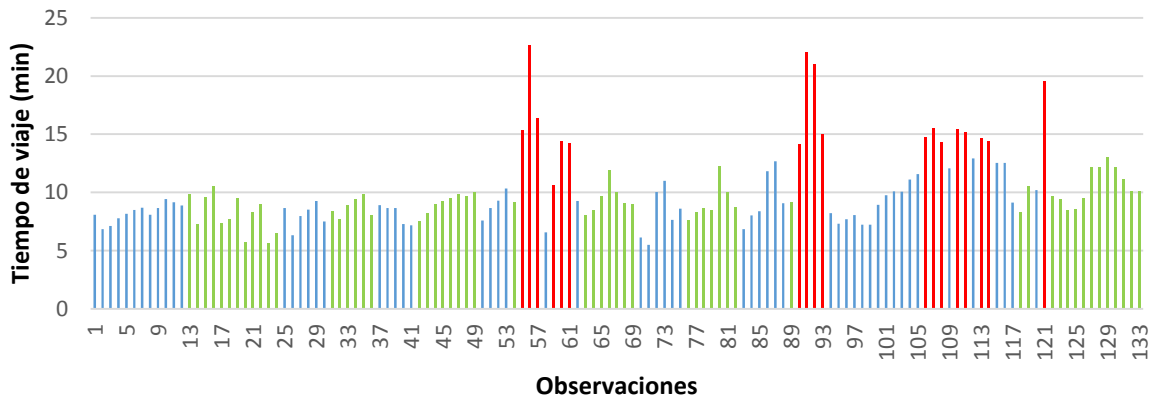
el entregado por MAD Z-Score (Figura 12), donde identifica como valores atípicos sólo a las observaciones de tiempo que claramente son producto de incidentes.

Figura 10: Valores atípicos encontrados en test de Grubbs



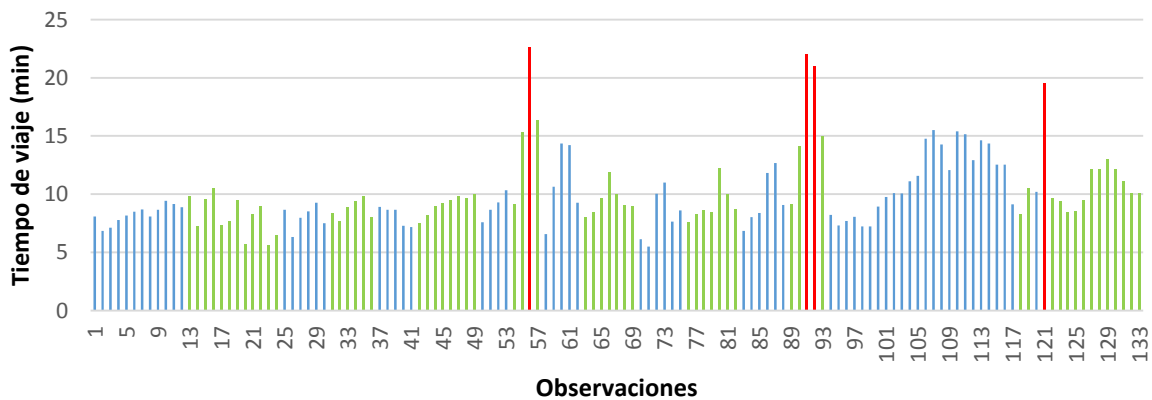
Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Valores atípicos encontrados en test de Hampel



Fuente: Elaboración propia

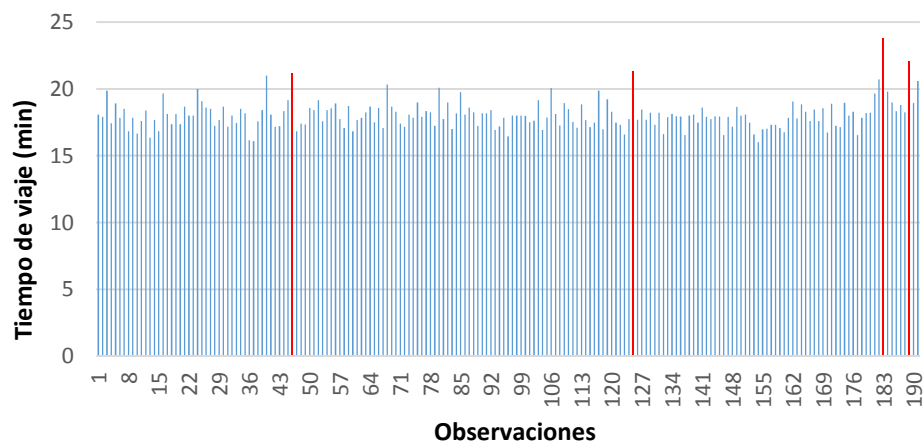
Figura 12: Valores atípicos encontrados en test MAD Z-Score



Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de los tramos analizados tanto para bus, como para metro y automóvil, el test MAD Z-Score identificó el número más acertado de incidentes al compararlo con los otros dos métodos. Sin embargo, existen casos especiales como el que se muestra en la Figura 13, donde para una ruta de metro de la Línea 5, entre estaciones Baquedano y Vicente Valdés en fuera de punta, que posee un tiempo de viaje bastante estable, MAD Z-Score identifica como valores extremos (de color rojo), mediciones que se alejan muy poco de la media y que podrían ser atribuibles a interrupciones menores en el sistema, más que a incidentes.

Figura 13: Valores atípicos encontrados en test MAD Z-Score



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se concluye que ninguno de los tests de *outliers* formales utilizados es completamente efectivo para la identificación de incidentes, por lo que luego de la aplicación de estas pruebas se hizo indispensable el criterio del analista para determinar cuáles de los *outliers* identificados corresponden realmente a incidentes y cuáles no.

Para efectos ilustrativos se presenta en la Figura 14 observaciones de tiempo de viaje de tres rutas realizadas en automóvil. La Figura 14.a representa el tiempo de viaje en punta mañana en la ruta correspondiente a la avenida Mapocho entre calle Walker Martínez y Avenida Brasil, 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 14.a, no hay incidentes claros y toda la variación en los tiempos de esta ruta parece deberse a la congestión recurrente. Por otra parte, en la Figura 14.b se muestra las observaciones de tiempo de viaje de la ruta ubicada en calle Vivaceta, entre Hipódromo Chile y Santa María en punta tarde. En este gráfico se destacan dos observaciones (barras rojas) que poseen tiempos mucho mayores a los demás. Estas observaciones fueron identificadas como valores atípicos por los test de detección de *outliers*. Probablemente estos tiempos corresponden a viajes afectados por algún

incidente que hizo aumentar el tiempo de viaje de una manera no atribuible a la congestión recurrente.

Por último, en la Figura 14.c correspondiente al eje Alameda-Providencia entre avenidas Santa Rosa y Salvador se muestra otro caso interesante, en el que dos observaciones fueron identificadas como valores atípicos (barras rojas), sin embargo, el tiempo de los dos viajes inmediatamente posteriores (barras naranjas) es también más grande de lo normal debido al incidente que ocurrió antes (barras rojas), pero no fueron identificadas como *outliers*. A pesar de esto, estas dos observaciones también deben ser consideradas como afectadas por incidentes, ya que son resultado del efecto negativo en el tiempo de viaje de las dos observaciones anteriores.

En la Tabla 9 se muestra el número de incidentes encontrados en la BD1: UOCT para tiempos de viaje en automóvil y en la BD2: TERMÓMETRO para buses y metro, y el número de valores atípicos detectados por cada uno de los test estadísticos aplicados. Se puede ver finalmente que el total de viajes afectados por incidentes está entre un 0,7 y un 0,8% del total de observaciones para todos los modos. En el caso de los buses, el valor de los incidentes en promedio es un 135% mayor a la media de los tiempos de viaje, mientras que para metro es un 103% mayor, y en los autos, un 170% mayor.

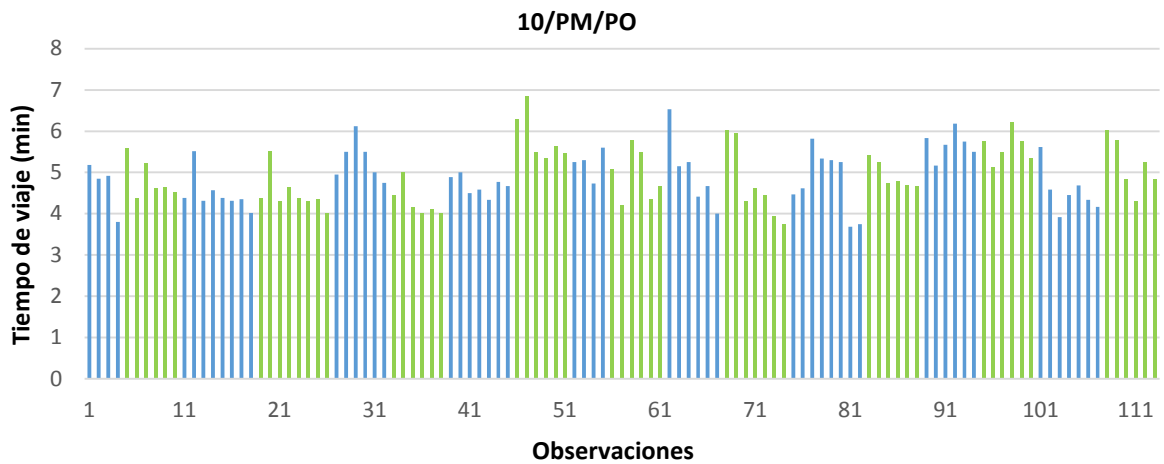
MODO	AUTO	BUS	METRO
N° PARES OD	25	209	51
N° OBSERVACIONES	2.616	35.164	9.659
N° INCIDENTES	19	286	78
% OBSERVACIONES CON INCIDENTES	0,70%	0,80%	0,80%
N° OUTLIERS GRUBBS	13	284	215
N° OUTLIERS MAD Z-SCORE	63	403	410
N° OUTLIERS HAMPEL	134	947	630

Tabla 9: Número de incidentes detectados en BD1: UOCT y BD2: TERMÓMETRO

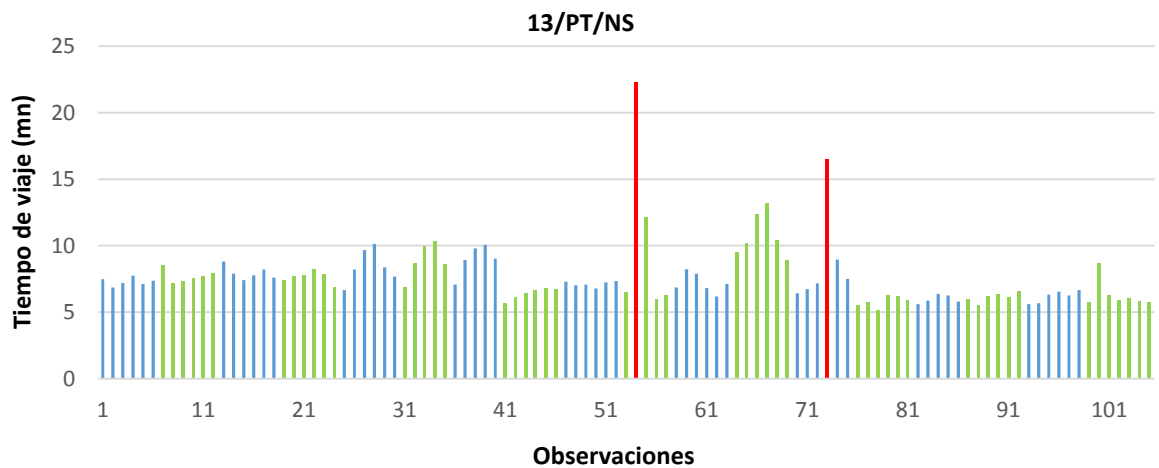
Es importante mencionar que las pruebas estadísticas que fueron aplicadas en este capítulo se utilizan sólo para identificar posibles *outliers*, no para retirarlos de la muestra de datos. Un valor atípico no debe eliminarse a no ser que en la investigación se encuentre una causa que lo justifique. El enfoque que debe utilizarse en este caso es analizar los datos, primero incluyendo los valores atípicos y luego no incluyéndolos en la muestra. Si los resultados obtenidos del análisis son diferentes, entonces se considera que los *outliers* tienen influencia relevante en la varianza de tiempos de viaje. 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 14: Variabilidad en tiempos de viaje en automóvil, casos con y sin incidentes

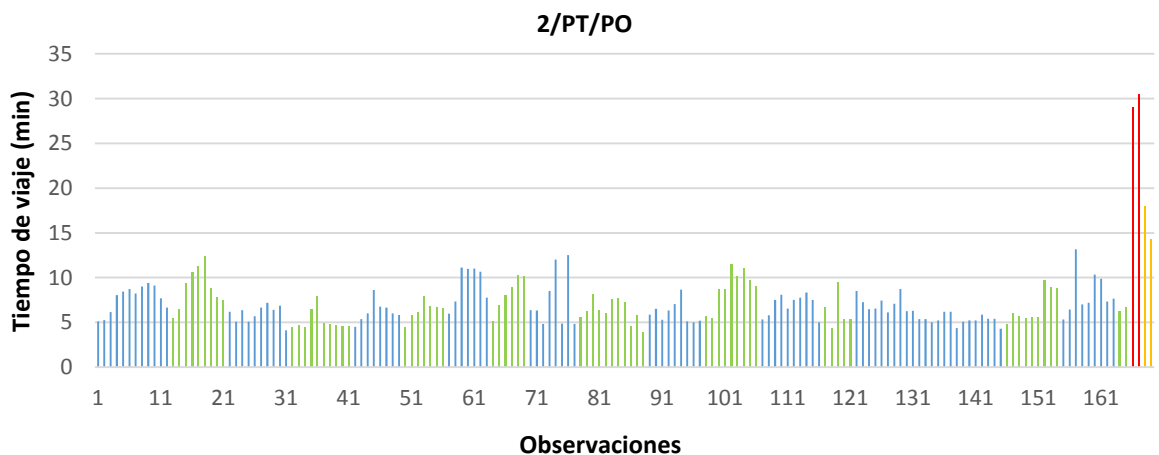
(a) Tiempo de viaje en avenida Mapocho entre calle Walker Martínez y Avenida Brasil, punta mañana



(b) Tiempo de viaje en calle Vivaceta, entre Hipódromo Chile y Santa María, punta tarde



(c) Tiempo de viaje en eje Alameda-Providencia entre avenidas Santa Rosa y Salvador, punta tarde



Fuente: Elaboración propia

6. VTV: DIFERENCIAS POR MODO Y POR ETAPA EN VIAJES EN TRANSPORTE PÚBLICO

En este capítulo se presenta la caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje para los tres modos analizados en esta tesis (bus, metro y automóvil). Para los viajes en transporte público se analiza cada etapa por separado: caminata, espera y tiempo en vehículo. El enfoque consiste en encontrar la relación que existe entre el tiempo de viaje promedio (TVP) y la variabilidad del tiempo de viaje (VTV) de cada una de las etapas, representada en primer lugar por una medida simétrica como la desviación estándar. Además, para el tiempo de viaje en vehículo analizado a partir de las BD1: UOCT y BD2: TERMÓMETRO se estudiará el efecto que los incidentes tienen en la VTV. Las regresiones estimadas tienen la forma de la Ecuación 28.

$$\sigma = m * \mu + n + \varepsilon \quad (28)$$

Donde σ es la desviación estándar del tiempo de viaje, μ es el promedio del tiempo de viaje, ε es el error aleatorio asociado, y m y n son los parámetros de la regresión relacionados con la pendiente y el intercepto de la recta.

En segundo lugar, se analizará la relación entre el TVP y la VTV, representada por dos medidas asimétricas: λ_{var} y λ_{skew} , definidas en las ecuaciones 11 y 12, respectivamente.

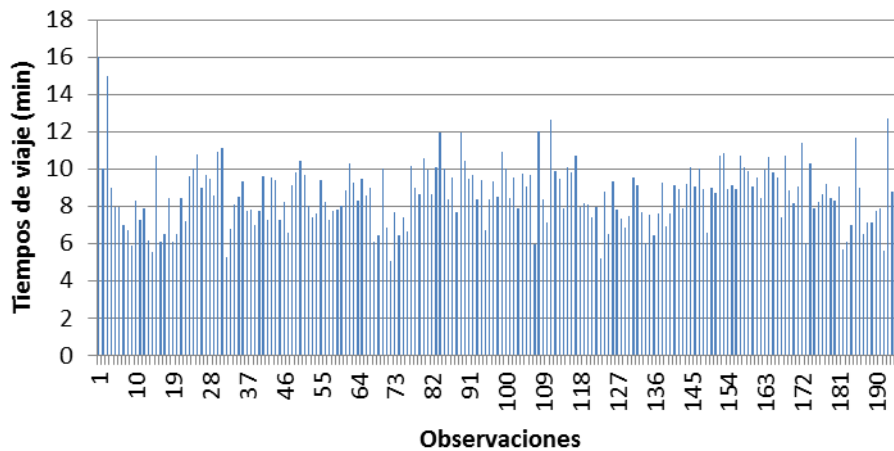
En el Capítulo 3 de esta tesis se presentó el detalle de la información contenida en cada una de las cuatro bases de datos que se utilizaron en el análisis que se presentará en esta sección. En la Tabla 1 se observa que la temporalidad de los datos es muy distinta en las cuatro fuentes de información, ya que los períodos de tiempo en los que fueron observados los tiempos de viaje son muy diferentes. A pesar de las diferencias en la temporalidad, para el análisis de esta tesis se utilizó toda la información de estas bases de datos, con la siguiente justificación:

- Con respecto a los tiempos en automóvil y en transporte público de la BD1: UOCT y la BD2: TERMÓMETRO, en las Figuras 10, 11, 12, 13 y 14 se puede ver graficado el tiempo de viaje en varias rutas de automóvil (medido entre marzo del 2010 y junio de 2014), y de metro (medido entre los años 2007 y 2012). En estos ejemplos se puede ver que no existen cambios estructurales en los tiempos de viaje a lo largo de los años. Si bien es cierto, hay varianza entre las observaciones, no existe una tendencia en los tiempos de viaje, ni al aumento ni a la disminución, que se mantenga a lo largo de los años. Lo mismo sucede en el resto de los pares OD de viajes de la BD1 y BD2, lo que justifica la utilización de la totalidad de la información en este análisis. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de tiempo de viaje en bus para un viaje realizado entre el paradero Las Tranqueras con Las Condes y

Escuela Militar, en el servicio C01, donde se aprecia el mismo fenómeno.

- Las bases de datos BD3: GPS y BD4: METRO poseen datos de tiempo de viaje observados sólo en una semana, de mayo de 2014 y de abril de 2015, respectivamente. Sin embargo, la metodología de obtención de información de ambas bases de datos permitió contar con un alto volumen de datos, correspondientes a todos los viajes registrados en el sistema para aquellas semanas. Por este motivo, el alto volumen de información permite que el análisis realizado sea robusto y consistente con las otras fuentes de información, como se verá más adelante en esta sección.

Figura 15: Tiempo de viaje en bus entre paradero Las Tranqueras con Las Condes y Escuela Militar en punta tarde, servicio C01



Fuente: Elaboración propia

Este capítulo se compone de los siguientes contenidos. En el punto 6.1 se analiza la VTV en automóvil con datos extraídos de la BD1: UOCT. En el punto 6.2 se estudia la variabilidad del tiempo de caminata, tanto de acceso como de trasbordo, a partir de información de la BD2: TERMÓMETRO. Luego, en el punto 6.3 se presenta el análisis de la variabilidad del tiempo de espera tanto de bus como de metro, también utilizando la BD2. Posteriormente se presenta la caracterización de la variabilidad del tiempo en vehículo para bus, usando las bases de datos BD2: TERMÓMETRO y BD3: GPS (punto 6.4), y para metro (punto 6.5) a partir de la BD2 y BD4: METRO. Después se presenta una comparación de la VTV para bus en tráfico mixto, pista sólo bus y corredor segregado, utilizando datos de la BD3 (punto 6.6), y una comparación de metro versus bus operando en pista sólo bus (punto 6.7). Finalmente, en el punto 6.8 se presenta el análisis complementario de otras medidas de confiabilidad (λ_{var} y λ_{skew}) para todas las bases de datos con las que se cuenta.

6.1 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE EN AUTOMÓVIL

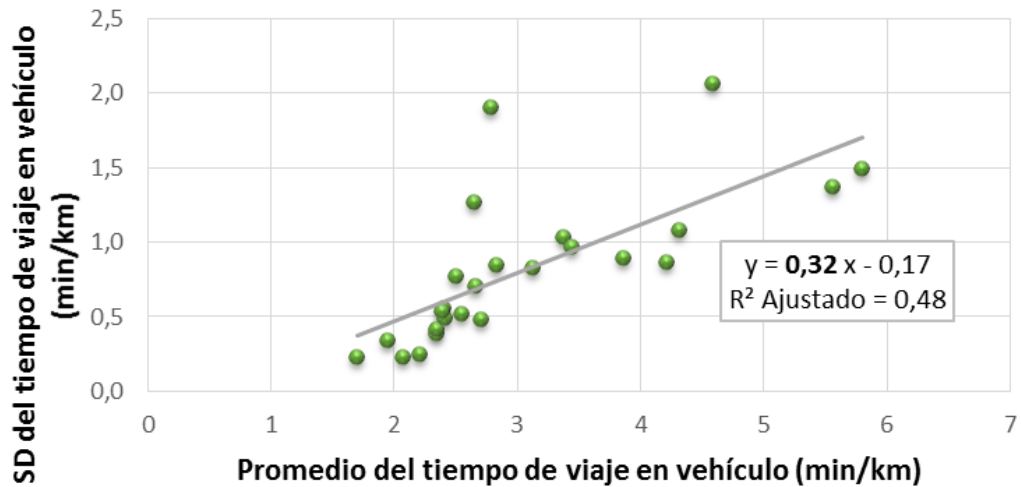
Para la caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje en automóvil se utiliza la información contenida en la base de datos BD1: UOCT, la que posee observaciones de tiempo de viaje medidos en 13 tramos de ejes de Santiago, los que al ser desagregados por período y por sentido, llegan a un total de 25 pares OD.

En las siguientes figuras se muestra la relación entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de viaje normalizado por la distancia, obteniendo una unidad (Min/km) que permitirá entender la relación entre el tiempo promedio y la congestión. En la Figura 16 se ha considerado todos los datos de la muestra, y en la Figura 17 se ha dejado fuera del análisis las observaciones con incidentes (el 0,7% de los datos), de manera de ver el impacto de la congestión recurrente como única fuente de VTV. Ambos diagramas de dispersión pueden ser ajustados con relaciones lineales. Los parámetros de la regresión lineal de esta figura se presentan en la Tabla 10.

Al comparar ambos gráficos se puede ver el efecto de los incidentes en la VTV. En la Figura 16 se ve que los incidentes aumentan la variabilidad de algunas observaciones y en la Figura 17 se ve que, como era de esperar, la eliminación de incidentes tiene un alto impacto en la bondad del ajuste de las regresiones, haciendo aumentar el R^2 Ajustado desde 0,48 hasta 0,83, pero el efecto sobre la pendiente de la relación lineal es pequeño, reduciendo su valor desde 0,32 (todas las observaciones), a 0,29 (sólo datos con congestión recurrente), es decir, sólo un 10%. Estos datos sugieren que un aumento de 1 minuto por kilómetro en el tiempo promedio de viaje, está asociado a un aumento promedio de la desviación estándar del tiempo de viaje de 17 segundos cuando sólo hay congestión recurrente, y de 19 segundos en presencia de incidentes, resultado muy similar al obtenido por Tirachini et al. (2014) utilizando 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, obteniendo una pendiente igual a 0,32.

Figura 16: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de viaje en automóvil, con incidentes

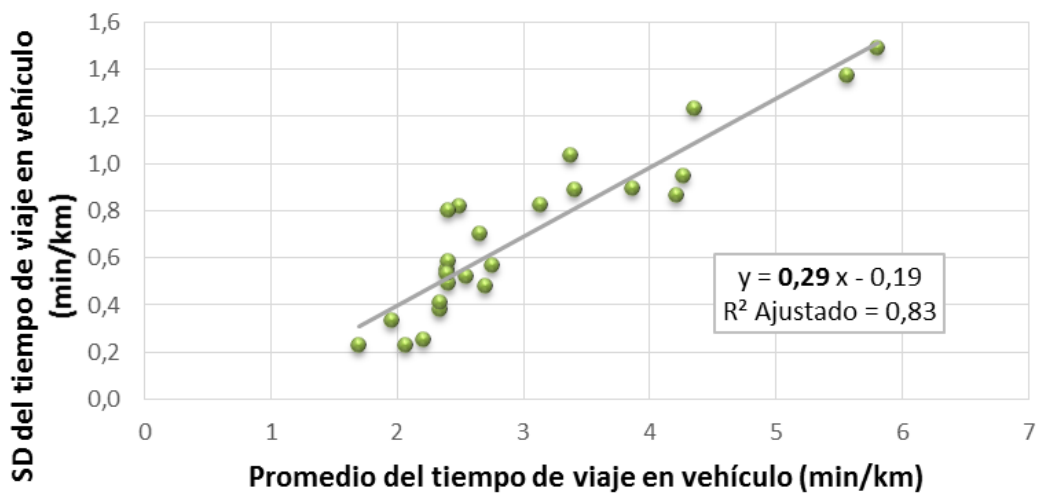
**VTV en vehículo - automóvil
(Con incidentes)**



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de viaje en automóvil eliminando incidentes

**VTV en vehículo - automóvil
(Sin incidentes)**



Fuente: Elaboración propia

REGRESIÓN	MODO	ETAPA	m	n	R ² AJUSTADO
FIGURA 16	AUTOMÓVIL	EN VEHÍCULO (CON INCIDENTES)	0,32 (0,19;0,46)	-0,17 (-0,63;0,28)	0,48
FIGURA 17	AUTOMÓVIL	EN VEHÍCULO (SIN INCIDENTES)	0,29 (0,24;0,35)	-0,19 (-0,36;-0,01)	0,83

Tabla 10: Parámetros de regresiones lineales de Figura 16 y Figura 17

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

Una relación lineal entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje es una manera muy simple de introducir una estimación de la VTV en un modelo de media-varianza utilizando sólo estimaciones del tiempo promedio 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) utilizó datos de tiempo de viaje obtenidos a partir de simulación en diferentes ciudades de los Estados Unidos y estimó regresiones lineales con pendientes que se encuentran entre 0,25 y 0,53, coincidiendo con los resultados presentados en esta tesis.

6.2 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE CAMINATA (ACCESO Y TRASBORDO)

La caracterización de la variabilidad del tiempo de caminata es un elemento que casi no se ha estudiado en la literatura acerca de 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. Muñoz et al. (2013) realizan un benchmark del nivel de servicio de los sistemas de transporte público en seis ciudades latinoamericanas: Santiago, Bogotá, Guadalajara, Ciudad de México, Lima y Porto Alegre, dentro del cual se compara la variabilidad del tiempo de caminata (entre otros atributos). El tiempo fue obtenido a partir de mediciones en una muestra de viajes en punta mañana, representativa del total de viajes. La variabilidad del tiempo de caminata se representa por el promedio de la desviación estándar del tiempo de caminata de cada viaje de la muestra. Los resultados indican que Santiago posee la mayor variabilidad del tiempo de caminata (10,1 minutos) y el mayor tiempo promedio de caminata (13,8 minutos) de todas las ciudades en estudio.

El análisis presentado en esta sección se basa en los datos de tiempo de viaje de la base de datos BD2: TERMÓMETRO, los que fueron registrados por 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, en distintos períodos del día.

Tanto para los tiempos de acceso, como para los de trasbordo registrados en la BD2, se determinó en primer lugar, cuáles de los 66 pares OD originales poseían efectivamente caminata. Esta base de datos proporciona información de la intersección donde se origina el viaje, y de la ubicación del primer paradero. Si bien es cierto, todos los viajes en transporte público poseen caminata de acceso, en algunos pares OD de la BD2 coincide el punto de inicio del viaje con el del primer paradero, por lo que a pesar de que exista un tiempo de caminata registrado, estos pares OD no se consideraron en el análisis, ya que se tomó como supuesto que no existe distancia entre ambos puntos.

De los 66 pares OD de la BD2, 59 tienen como primera etapa en vehículo al modo bus, y 7 al modo metro. Con respecto al tiempo de acceso, y tal como se puede ver en la Tabla 20 del ANEXO A: TABLAS, sólo en 38 pares OD hay caminata, debido a que la ubicación del origen es distinta a la del primer paradero. De este total, 31 tienen como primer vehículo al bus, y 7 al metro.

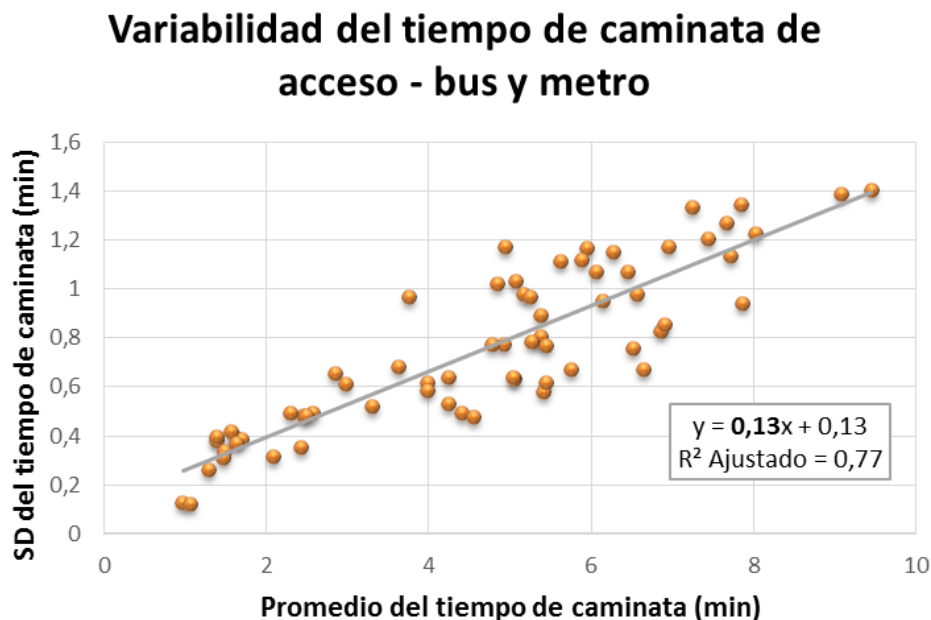
Del mismo modo, para los 50 pares OD que poseen trasbordo (TBD) se analizó si existe o no caminata. De estos pares, 38 poseen sólo un trasbordo, 8 poseen 2 trasbordos y 4 poseen 3 trasbordos. Por lo tanto se posee un total de 66 trasbordos, los que se pueden ver en la Tabla 21 del ANEXO A: TABLAS. De los 66, sólo 28 poseen caminata, y el resto posee la misma ubicación para los puntos de inicio y fin de la caminata de trasbordo.

El análisis que se presenta a continuación se realizó tomando en cuenta sólo los pares origen destino en los que efectivamente hay caminata, diferenciando las mediciones de cada par origen destino de acuerdo al período en el que se efectuó. Queda un total de 42 combinaciones Par OD-Período para los tiempos de trasbordo, y de 70 para el tiempo de acceso. El promedio y la desviación estándar de cada una de estas combinaciones representa un punto en las gráficas que se muestran en la Figura 18 y en la Figura 19. Se consideró sólo las observaciones en las que la velocidad de caminata se encuentra entre 3 y 7 km/h, considerando a las mediciones que están fuera de ese rango como errores de digitación.

La relación entre la media y la variabilidad del tiempo de caminata de acceso en minutos se representa en la Figura 18, donde se distingue una relación positiva que expone evidencia de que para caminar, en promedio, la variabilidad del tiempo de viaje aumenta con el largo de los viajes, debido a la probable influencia de una serie de factores como la presencia de

semáforos. Los parámetros de la regresión lineal de esta figura se presentan en la Tabla 11.

Figura 18: Relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de caminata de acceso



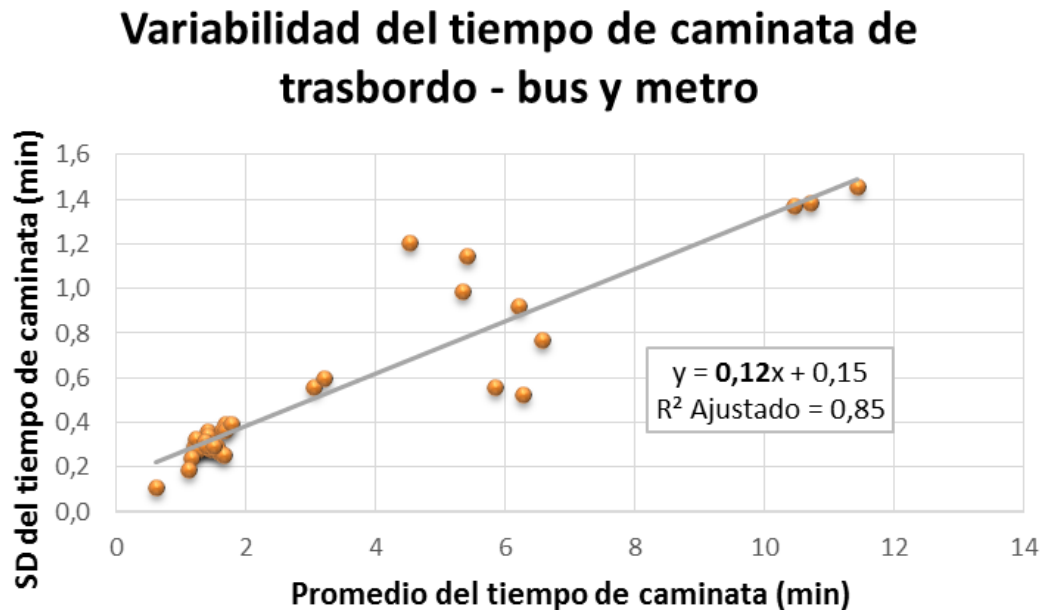
REGRESIÓN	MODO	ETAPA	m	n	R ² AJUSTADO
FIGURA 18	TRANSPORTE PÚBLICO	CAMINATA DE ACCESO	0,13 (0,12;0,15)	0,13 (0,04;0,22)	0,77
FIGURA 19	TRANSPORTE PÚBLICO	CAMINATA DE TRASBORDO	0,12 (0,10;0,13)	0,15 (0,08;0,21)	0,85

Tabla 11: Parámetros de regresiones lineales de Figura 18 y Figura 19

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

La relación encontrada entre ambas variables para los tiempos de trasbordo (Figura 19) también es creciente, y posee prácticamente la misma pendiente que la regresión lineal del tiempo de caminata de acceso (ver Tabla 11), pero el pequeño número de observaciones de esta gráfica no permite generalizar esta conclusión. Sin embargo se observa que la gran mayoría de las observaciones (70%) posee un tiempo promedio de caminata menor a los dos minutos, y una desviación estándar de menos de 0,5 minutos (Figura 19).

Figura 19: Relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de caminata de trasbordo



Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que no siempre fue el mismo medidor quien realizó todos los viajes pertenecientes al mismo par origen destino, por lo que podría existir una fuente de variación adicional que puede aumentar la varianza en la caminata estimada en los gráficos de esta sección, y que está dada por características personales de los medidores, las que se desconocen.

6.3 VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE ESPERA

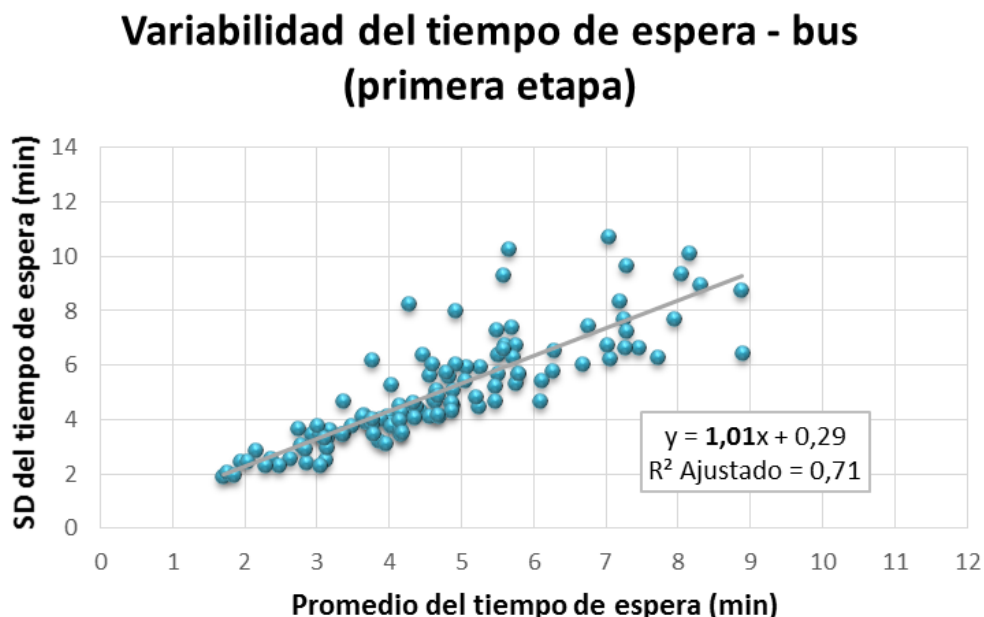
Muchos autores en la literatura han analizado la regularidad de los intervalos entre buses (e.g., Byon et al., 2011, Chen et al., 2009, Strathman et al., 1999), ya que se ha demostrado que su variabilidad hace aumentar los tiempos de espera (Osuna y Newell, 1972). Por este motivo se han estudiado e implementado estrategias como la retención de buses para mantener la regularidad entre intervalos. A pesar de que estos autores han demostrado la existencia de una relación entre la variabilidad de los intervalos y el promedio del tiempo de espera, en la literatura no se encontró trabajos que analicen la variabilidad del tiempo de espera de manera directa, principalmente debido a que la obtención de observaciones repetidas de tiempos de espera reales para varias rutas en varios días resulta muy difícil y costoso, mientras los intervalos entre buses son fáciles de registrar con tecnologías GPS.

La información contenida en la BD2: TERMÓMETRO hace posible la caracterización de la variabilidad del tiempo de espera en Santiago, ya que

contiene observaciones de todas las etapas de un viaje en transporte público (incluyendo la espera), repetido en las mismas rutas y en los mismos períodos a lo largo de varios días. Los resultados se muestran en las Figuras 20, 21, 22 y 23, y en la Tabla 12 se presentan los parámetros de las regresiones lineales asociados a cada una de estas figuras.

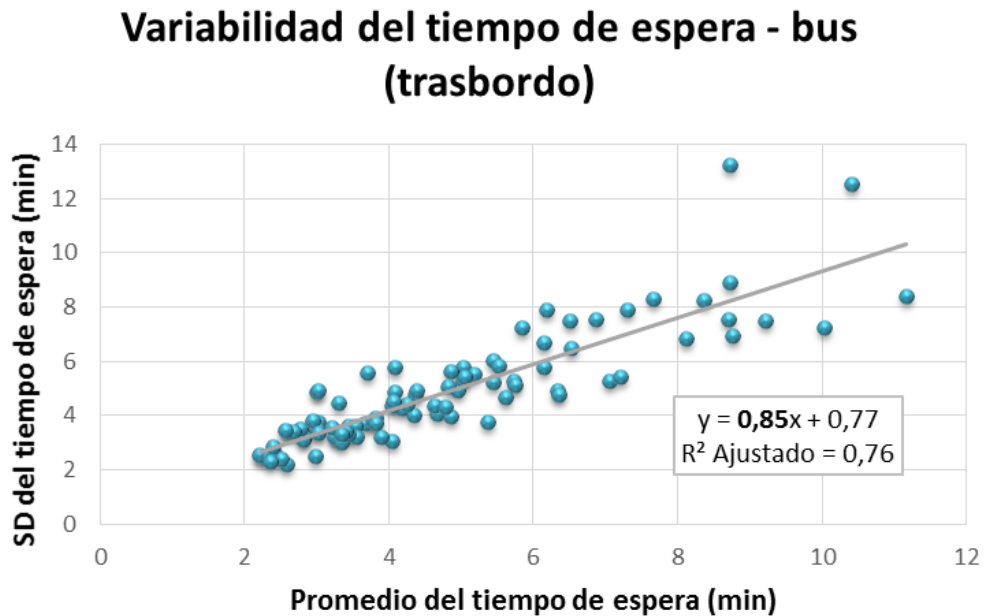
Con respecto a los viajes en bus, en la Figura 20 se muestra la relación lineal entre la media y la desviación estándar de los tiempos de espera. Como se puede ver en detalle en la Tabla 12, el valor de la pendiente de esta regresión es de 1,01. El hecho de que la pendiente sea cercana a 1, y el coeficiente de posición sea no significativo, es consecuente con una distribución exponencial en el tiempo entre llegadas de vehículos y usuarios, la que constituye un proceso Poisson. Esto, debido a que el intervalo entre buses no es regular en buses de Transantiago.

Figura 20: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de espera en bus, primera etapa



La Figura 21 presenta el análisis de la variabilidad del tiempo de espera cuando hay trasbordo entre buses, o entre metro y bus. La nube de puntos es razonablemente aproximada por una relación 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 las regresiones de la Figura 20 y la Figura 21.

Figura 21: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de espera en bus, trasbordo



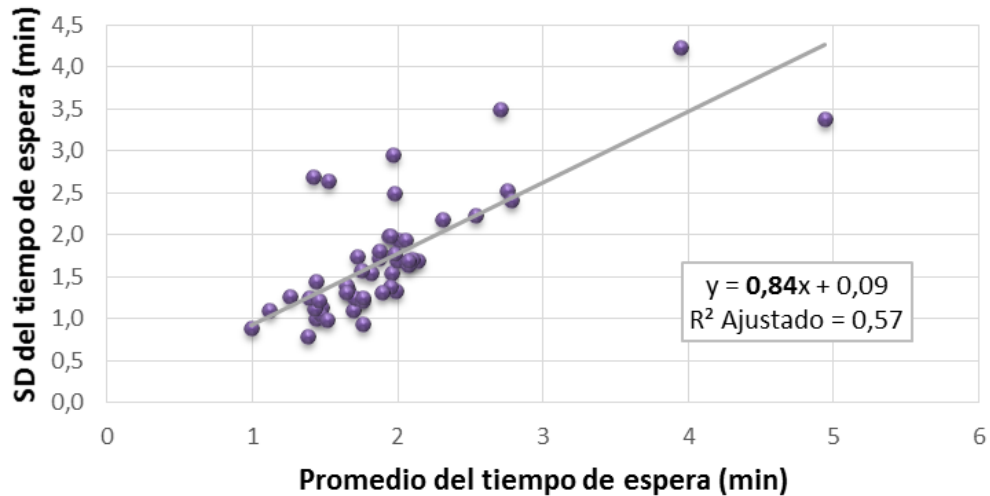
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los viajes en metro, en la Figura 22 se puede ver que la mayor parte de los tiempos de espera promedio en metro están por debajo de los 3 minutos (49 de 51 pares OD). Se observa que la relación entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de espera es creciente para los viajes cuyo tiempo de espera promedio es inferior a 3 minutos, mientras que para las dos observaciones de tiempo medio de espera de más de 3 minutos, la desviación estándar está entre 3,3 y 4,2 minutos. Esto podría indicar la existencia de una relación cóncava entre el promedio y la desviación estándar de los tiempos de espera, pero el hecho de que hay muy pocas observaciones con tiempos medios de espera de más de 3 minutos impide concluir tal resultado con certeza.

Los dos puntos de mayor tiempo de espera promedio de la Figura 22 corresponden a viajes en punta mañana, entre estaciones Las Rejas y Escuela Militar, y Trinidad y Tobalaba. El alto tiempo de espera de los viajes realizados entre estas estaciones no es atribuible a la falta de regularidad en los intervalos, ya que a diferencia de lo que ocurre con los buses, en metro sí hay regularidad en la llegada de los trenes. Existe una variable adicional que hace aumentar la espera, y está dada por el hecho de que ambas estaciones de origen poseen una alta afluencia en punta mañana, lo que muchas veces implica que los usuarios no puedan abordar el primer tren.

Figura 22: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de espera en metro, todas las observaciones

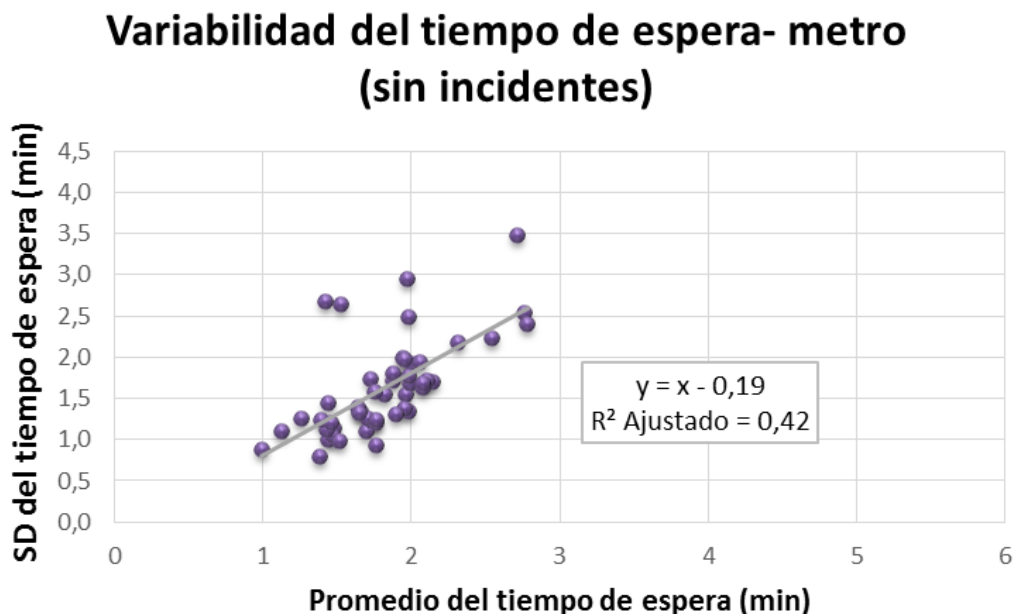
**Variabilidad del tiempo de espera- metro
(todas las observaciones)**



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, al centrarse en los 49 casos con tiempo promedio de espera menores a 3 minutos, se obtiene la Figura 23, donde se observa una pendiente unitaria para la relación lineal entre la media y la desviación estándar de los tiempos de espera (ver Tabla 12), valor similar a la pendiente 1,01 obtenida para el tiempo de espera en bus (Figura 20). El hecho de que la pendiente sea cercana a 1 en bus se debe a que el intervalo entre buses es irregular y puede ser bien explicado por la existencia de una distribución exponencial en el tiempo entre llegadas de vehículos y usuarios, pero en el caso de metro, la llegada de los usuarios es aleatoria, y la de los vehículos es uniforme (intervalos regulares). Al existir intervalos (h) regulares, el tiempo esperado de espera corresponde a $E(t_e) = h/2$, y la desviación estándar del tiempo de espera, a $SD(t_e) = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{h}{2\sqrt{3}} = \frac{E(t_e)}{\sqrt{3}} = 0,58E(t_e)$, por lo que la pendiente de la relación entre tiempo de espera esperado y desviación estándar del tiempo de espera disminuye desde 1 hasta 0,58 al tener intervalos perfectamente regulares entre vehículos.

Figura 23: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo de espera en metro, tiempo promedio menor a 3 minutos



REGRESIÓN	MODO	ETAPA	m	n	R ² AJUSTADO
FIGURA 20	BUS	PRIMERA ETAPA	1,01 (0,891;1,13)	0,29 (-0,31;0,88)	0,71
FIGURA 21	BUS	ESPERA EN TRASBORDO	0,85 (0,75;0,95)	0,77 (0,25;1,29)	0,76
FIGURA 22	METRO	ESPERA (TODAS LAS OBSERVACIONES)	0,84 (0,64;1,05)	0,09 (-0,33;0,51)	0,57
FIGURA 23	METRO	ESPERA (PROMEDIO MENOR A 3,5 MINUTOS)	1 (0,66;1,33)	-0,19 (-0,80;0,43)	0,42

Tabla 12: Parámetros de regresiones lineales de Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

6.4 VARIABILIDAD DEL TIEMPO EN VEHÍCULO: BUS

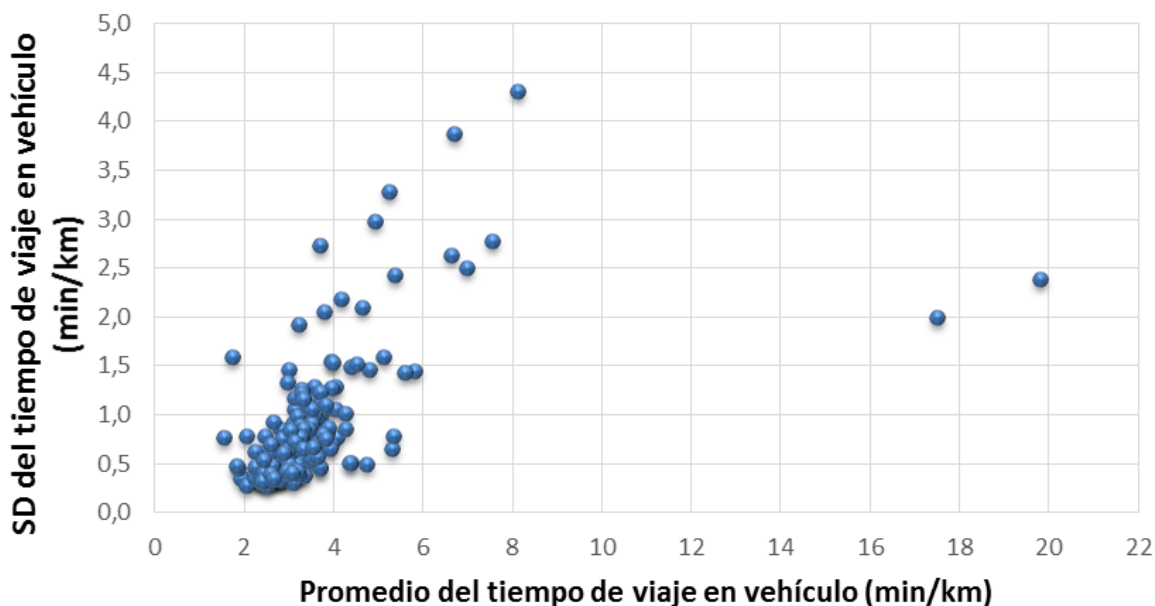
En esta sección se caracteriza la VTV para tiempos en vehículo bus, a partir de las bases de datos BD2: TERMÓMETRO y BD3: GPS. Al igual que en el caso de los automóviles, el análisis se hizo normalizando el tiempo por la distancia.

La base de datos BD2: TERMÓMETRO cuenta con registros repetidos de tiempos de viaje realizados en un mismo par OD y período del día, diferenciando el tiempo de cada una de las etapas. Se poseen 260 distintas combinaciones de *ParesOD/Período*, de las cuales 209 pertenecen a tramos de viaje realizados en bus, y 51 a viajes en metro.

En la Figura 24 se presenta el análisis de la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo bus tomando en cuenta todas las observaciones. El promedio y la desviación estándar de cada una de las 209 combinaciones *ParOD/Período* representan un punto en la gráfica. 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, es decir, una velocidad comercial² mayor a 7,4 km/h. Los dos casos restantes corresponden a viajes que poseen una velocidad comercial promedio inferior a 4 km/h, es decir, son viajes que están enfrentando congestión extrema. Estos dos puntos pertenecen a una misma ruta de 2,8 kilómetros de longitud, cuyo tiempo de viaje fue registrado en período fuera de punta y punta tarde. Esta ruta se ubica entre Avenida La Dehesa con El Rodeo y Avenida Las Condes con San Francisco de Asís y su viaje se realiza utilizando el servicio C09.

Figura 24: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo bus (BD2: TERMÓMETRO)

Variabilidad del tiempo en vehículo - bus

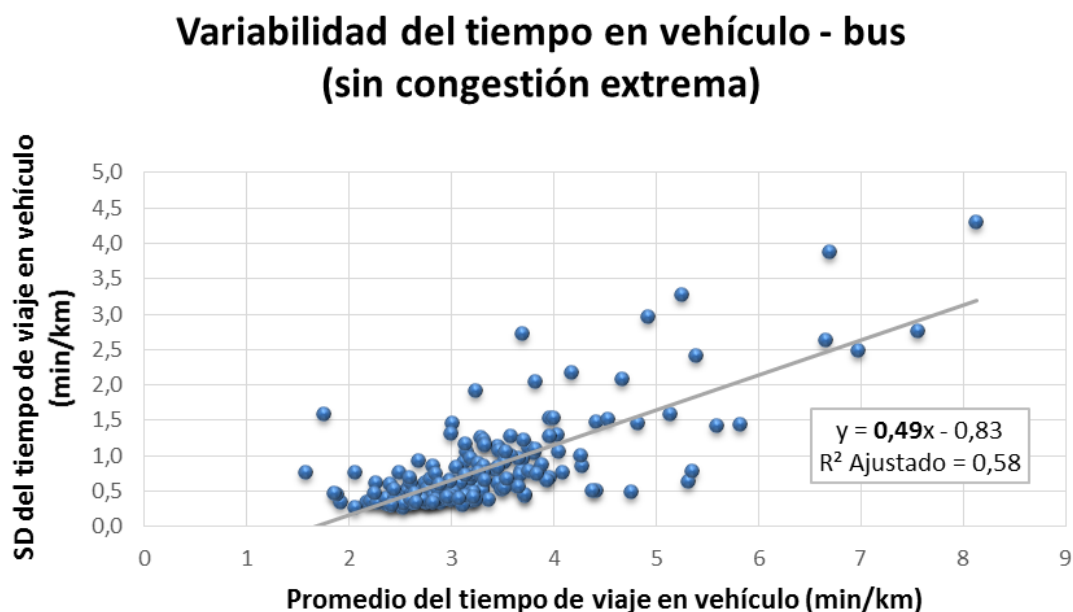


Fuente: Elaboración propia

² La velocidad comercial en transporte público es la velocidad cuando se realiza servicio comercial de pasajeros, es decir, incluye tiempo en movimiento y todas las detenciones que se realizan.

En la Figura 25 se puede ver que si se analiza la VTV tomando sólo en consideración los casos donde no existe congestión extrema, la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje no sólo es creciente, sino que además es lineal (los parámetros de la regresión lineal de esta figura se presentan en la Tabla 13). Sin embargo, si el enfoque toma en cuenta los dos puntos de congestión extrema (Figura 24), pareciera ser que la relación entre ambas variables crece sólo hasta cierto punto, y luego decrece.

Figura 25: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo bus sin congestión extrema (BD2: TERMÓMETRO)



Fuente: Elaboración propia

REGRESIÓN	MODO	ETAPA	m	n	R ² AJUSTADO
FIGURA 25	BUS	EN VEHÍCULO (SIN CONGESTIÓN EXTREMA)	0,49 (0,44;0,55)	-0,83 (-1,02;-0,63)	0,58
FIGURA 26	BUS	EN VEHÍCULO (197 PARES BD4: METRO)	0,61 (0,56;0,66)	-1,78 (-2,15;-1,41)	0,75
FIGURA 27	BUS	EN VEHÍCULO (TVP MENOR A 8,2 MIN/KM)	0,46 (0,40;0,53)	-0,95 (-1,36;-0,54)	0,56

Tabla 13: Parámetros de regresiones lineales de Figura 25, Figura 26 y Figura 27

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

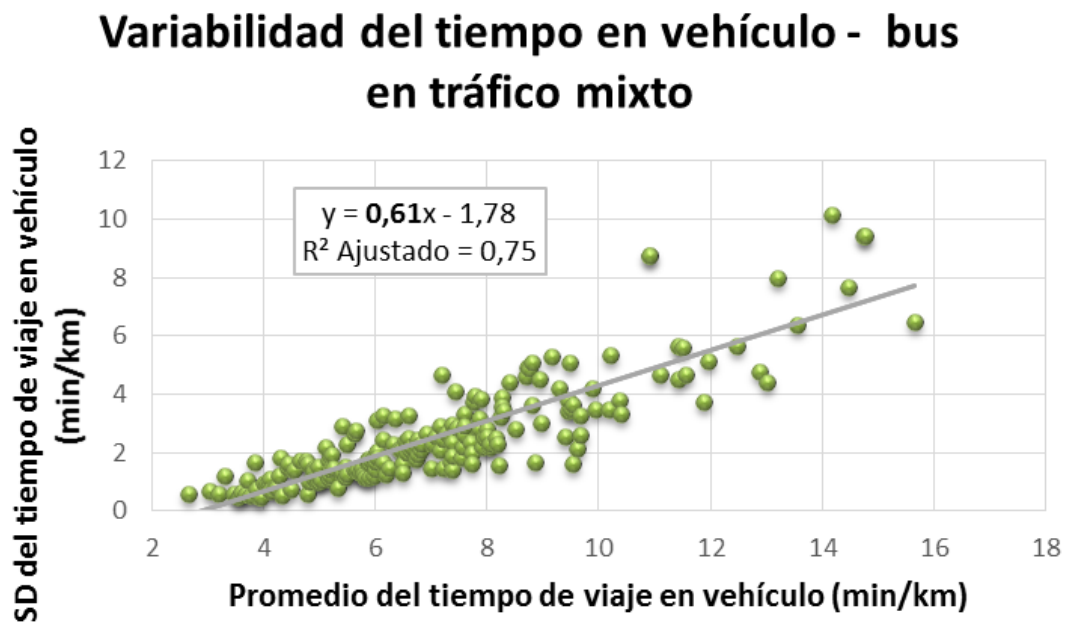
Debido a que la base de datos BD2: TERMÓMETRO no cuenta con observaciones de viajes cuyo tiempo en promedio se encuentre entre los 8,2

y los 17 Min/km, se ha complementado este análisis utilizando datos de la base de datos BD3: GPS.

La base de datos BD3 contiene más de 23 millones de registros de tiempos de viaje, que corresponden a la totalidad de los viajes realizados en el sistema de transporte público de Santiago en una semana de mayo del año 2014. A partir de estos datos se seleccionó una submuestra de más de 28 mil viajes en bus en tráfico mixto, realizados en 43 pares origen destino, los que al ser desagregados por período constituyen un total de 197 combinaciones *ParOD/Período*. La muestra se escogió de manera de poder tener observaciones en el rango de tiempos promedio donde no existen datos en la BD2: TERMÓMETRO (entre 8,2 y 17 Min/km).

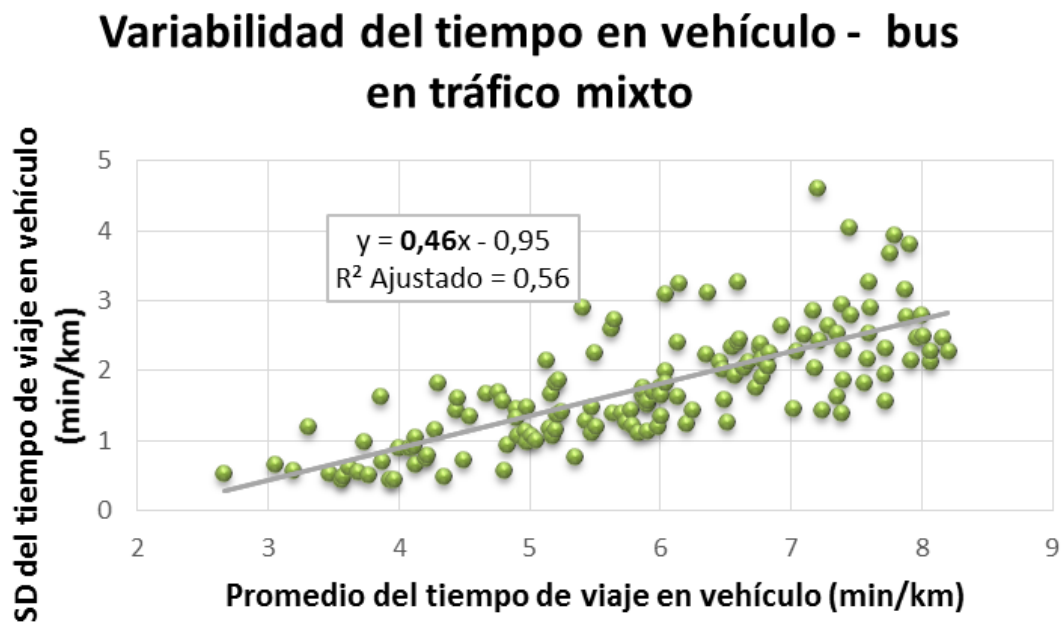
En la Figura 26 se puede ver la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje en bus operando en tráfico mixto (obtenida de la BD3) en Min/km, tomando en cuenta todos los *ParesOD/Período* de la submuestra (197). Se observa que el tiempo de viaje promedio se encuentra en un rango que va entre los 2,7 y los 15,7 Min/km, registrando alrededor de un 6% de casos con congestión extrema (velocidad comercial menor o igual a 5 kilómetros por hora). Se puede ver claramente, a diferencia de lo ocurrido en la Figura 24, que la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje es creciente a pesar de la presencia de congestión extrema. En la Tabla 13 se muestran los parámetros de la regresión lineal que se ha estimado para esta relación.

Figura 26: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo bus (197 pares de BD3: GPS)



Finalmente, en la Figura 27 se presentan sólo aquellos *ParesOD/Período* que poseen un tiempo promedio menor a los 8,2 Min/km, para tener una idea de la consistencia de la información proporcionada por las bases de datos BD2 y BD3. En la Tabla 13 se puede ver que la pendiente de la relación lineal entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje en bus mostradas en la Figura 25 (BD2) y en la Figura 27 (BD3) son muy cercanas (0,49 y 0,46), por lo que se puede decir que a pesar de que los tiempos no hayan sido registrados exactamente en los mismos pares OD ni con el mismo método de recolección de información, los datos provenientes de ambas bases son consistentes.

Figura 27: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo bus sin congestión extrema (BD3: GPS)



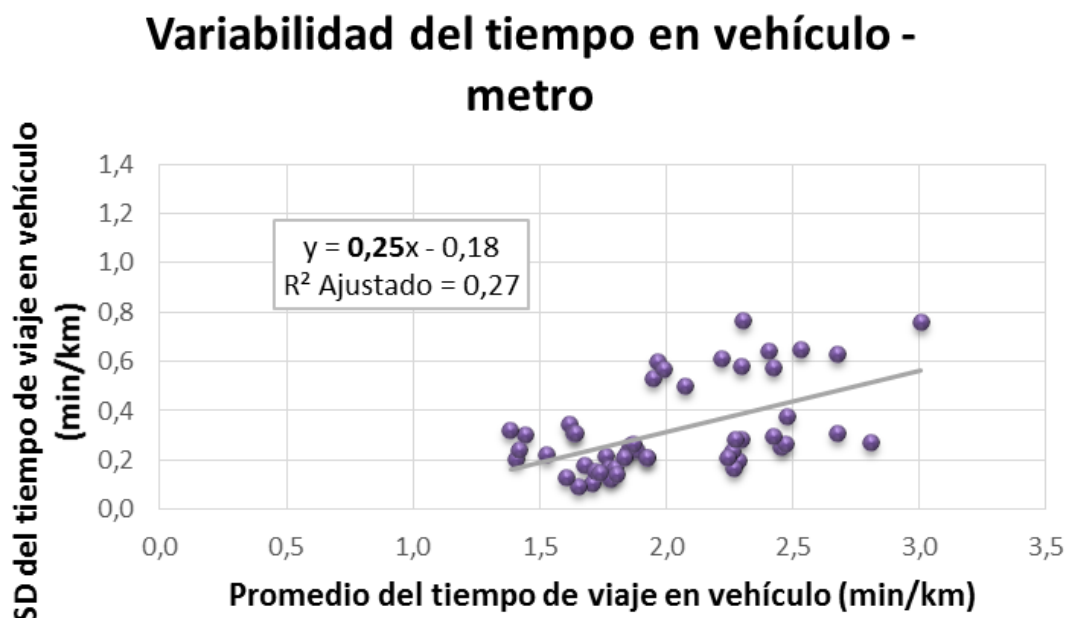
6.5 VARIABILIDAD DEL TIEMPO EN VEHÍCULO: METRO

En esta sección se caracterizará la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo para el modo metro, a partir de la información contenida en las bases de datos BD2: TERMÓMETRO y BD4: METRO. Este análisis se realiza normalizando el tiempo por la distancia, al igual que en el estudio de la VTV en vehículo para bus y automóvil.

Tal como se explicó en detalle en la Sección 3.2 de esta tesis, la base de datos BD2 posee información de tiempo para viajes realizados repetidamente en 260 distintas combinaciones de *ParesOD/Período*, de las cuales 51 pertenecen a viajes en las líneas 1, 4 y 5 de metro.

En la Figura 28 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 que existe una relación mucho más débil entre el tiempo de viaje promedio y su variabilidad para metro, que la encontrada para bus y automóvil. Sin embargo, se puede notar que el tiempo promedio de viaje 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 17) y para buses (entre 1,5 y 8,2 en la Figura 25).

Figura 28: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo metro (BD2: TERMÓMETRO)



REGRESIÓN	MODO	ETAPA	m	n	R ² AJUSTADO
FIGURA 28	METRO	EN VEHÍCULO	0,25 (0,13;0,36)	-0,18 (-0,41;0,05)	0,27
FIGURA 30	METRO	EN VEHÍCULO (ENTRE ESTACIONES CONSECUTIVAS)	0,54 (0,48;0,59)	-0,64 (-0,72;-0,56)	0,52

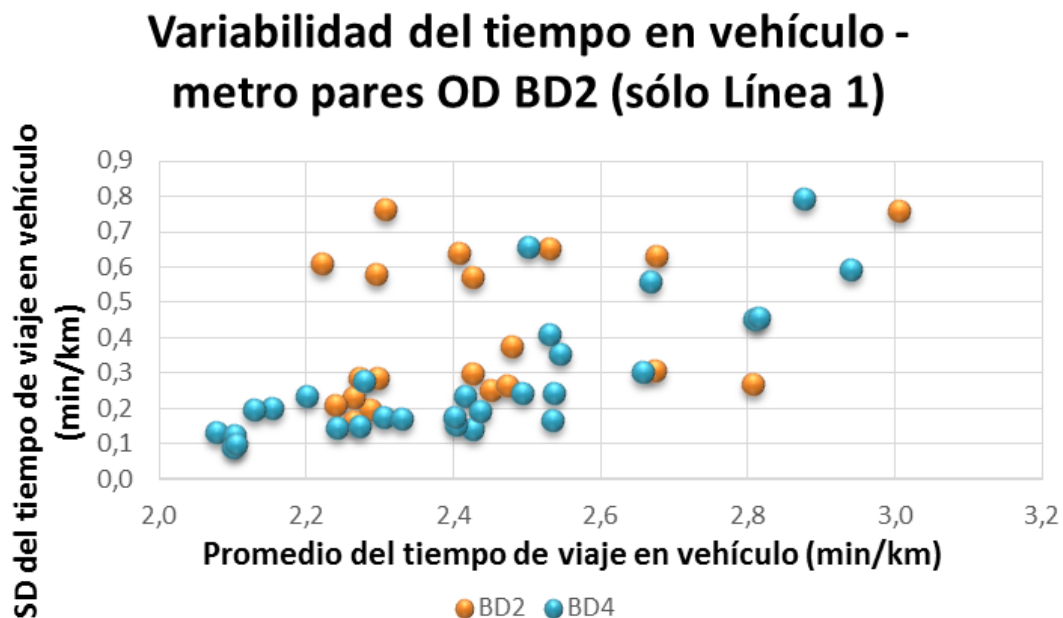
Tabla 14: Parámetros de regresiones lineales de Figura 28 y Figura 30

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

Debido a que el tamaño de la muestra proporcionado por la BD2: TERMÓMETRO para estudiar la VTV en metro es pequeño (51 ParesOD/Período), se complementó este análisis con datos extraídos de la

base de datos BD4: METRO. Como se explicó en detalle en la Sección 3.4, esta base cuenta con los tiempos de viaje reales de todas las expediciones y todas las líneas de la red (tiempos entre estaciones y en cada estación), de una semana de abril de 2015. Para este análisis se consideró sólo el tiempo de viaje de la Línea 1. En la Figura 29 se muestra la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje obtenida a partir de la BD2 y de la BD4, sólo para aquellos pares OD que fueron medidos en la BD2 y que corresponden a la Línea 1 de metro. Corresponden a 10 pares OD, los que al ser desagregados por períodos conforman un total de 20 combinaciones para la BD2 (de color naranja), y 29 para la BD4 (de color celeste). Se puede ver que a pesar de que el tiempo de viaje de ambas bases de datos se obtuvo a partir de distintas metodologías de recolección de información, tanto el promedio como la desviación estándar de los tiempos de viaje se encuentran en el mismo rango, lo que apunta a la consistencia de ambas fuentes de información.

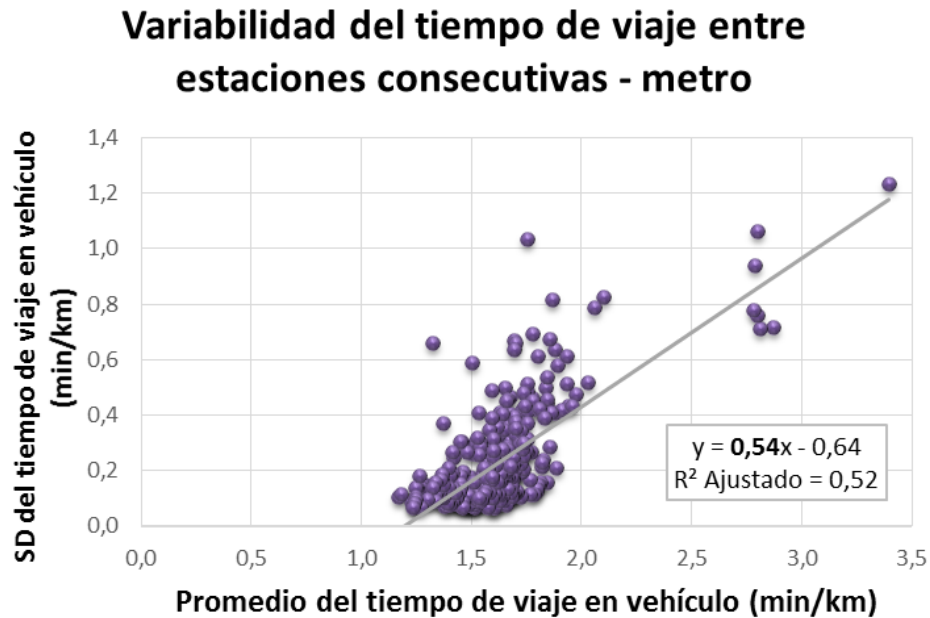
Figura 29: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo metro (Línea 1) con datos de BD2: TERMÓMETRO y BD4: METRO



Fuente: Elaboración propia

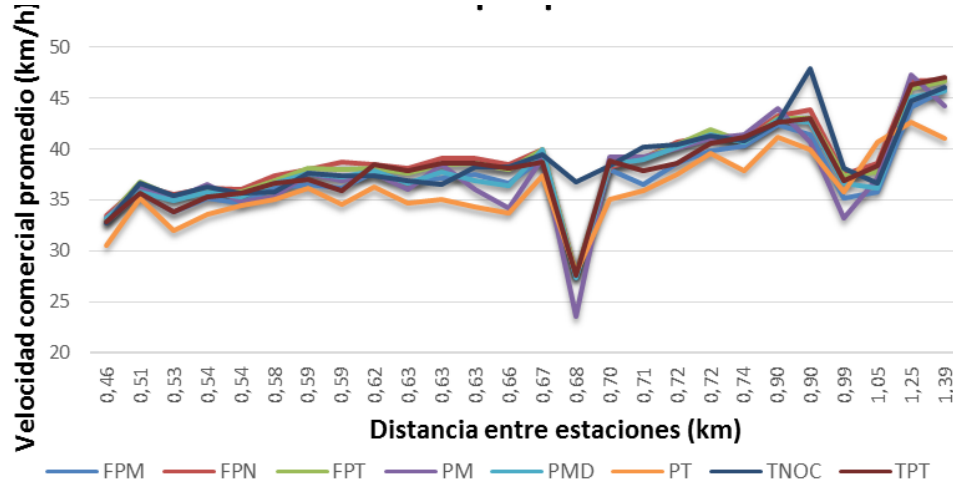
En la Figura 30 se muestra la variabilidad del tiempo entre estaciones consecutivas de la Línea 1 de metro, desagregando los viajes de acuerdo al período en que se realizaron. Estos tiempos consideran sólo el desplazamiento entre estaciones, desde el inicio del movimiento del tren en cada estación, hasta el instante de detención total en la estación siguiente, incluyendo períodos de aceleración y frenado. Se puede ver que para el 98% de los datos, el tiempo promedio se encuentra bajo los 2,1 min/km, es decir, poseen una velocidad de viaje entre estaciones mayor a los 29 km/h.

Figura 30: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo metro entre estaciones de la Línea 1



En la Figura 31 se puede ver la velocidad comercial promedio entre estaciones por período, ordenadas de menor a mayor distancia entre estaciones. Como es de esperar, a medida que aumenta la distancia entre estaciones, aumenta también la velocidad promedio. Pero además se puede apreciar que existen dos casos en los que la velocidad es baja no por efecto de una pequeña distancia entre estaciones, sino que por el hecho de llegar a la estación final del recorrido. El primero, y donde se observa la disminución en la velocidad más radical ocurre en dirección San Pablo, entre estaciones Neptuno y San Pablo (distancia entre estaciones 0,68 kilómetros), en todos los períodos (excepto período transición nocturno), y el segundo ocurre en dirección Los Domínicos, entre estaciones Hernando de Magallanes y Los Domínicos (distancia entre estaciones 1,05 km) en todos los períodos. Estos puntos coinciden con los puntos de tiempo promedio mayor a 2,8 min/km de la Figura 30. Se puede ver claramente entonces el efecto en el aumento del promedio del tiempo de viaje que posee la llegada de un tren a una estación de cabecera en todos los períodos.

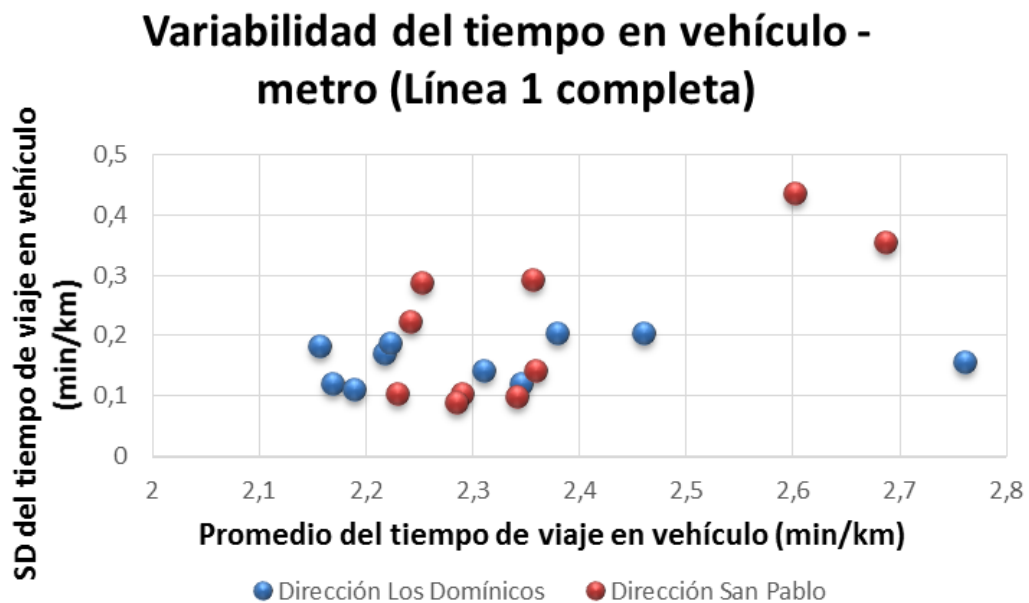
Figura 31: Velocidad entre estaciones de la Línea 1



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 32 se muestra la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo para viajes realizados en la Línea 1 completa: desde estación San Pablo a estación Los Domínicos y viceversa, desagregado por período. Si bien es cierto, no se encuentra una relación clara entre ambas variables, se observa una baja variabilidad en los tiempos de viaje, con una desviación estándar máxima de 0,44 min/km. El tiempo de viaje promedio también se encuentra en un rango acotado de valores, que van desde 2,2 hasta 2,8 min/km. Esto implica que el promedio de la velocidad comercial de la Línea 1 completa se encuentra entre 21 y 28 kilómetros por hora.

Figura 32: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo metro, Línea 1 completa



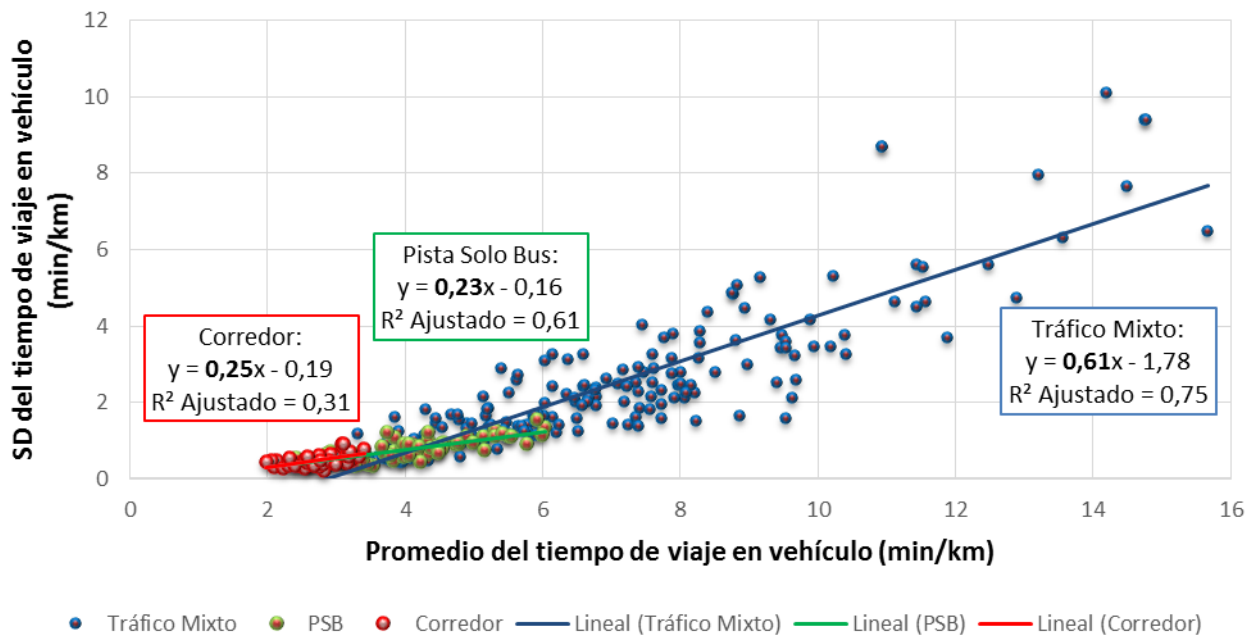
Fuente: Elaboración propia

6.6 COMPARACIÓN DE LA VTV EN BUS EN TRÁFICO MIXTO, PISTA SÓLO BUS Y CORREDOR SEGREGADO

En esta sección se analiza el efecto sobre la variabilidad del tiempo de viaje que tienen tres diferentes medidas de prioridad para buses: tráfico mixto, pista sólo bus (PSB) y corredor segregado. Para este análisis no fue posible utilizar la base de datos BD2: TERMÓMETRO, ya que no cuenta con observaciones de viajes realizados sólo en PSB o en corredor. Por lo tanto, se utilizan los datos extraídos de la BD3: GPS, que contiene más de 23 millones de registros del tiempo de viaje en vehículo para bus y metro, correspondientes a todos los viajes realizados en Santiago en una semana de mayo del año 2014, y que fueron obtenidos a partir de las transacciones efectuadas con tarjetas BIP! y los datos de GPS de los buses. De esta base de datos se seleccionó una submuestra de viajes realizados en días laborales en 43 pares origen destino (OD) correspondientes a tráfico mixto, 46 pares OD en pista sólo bus en el eje Alameda-Providencia-Apoquindo, y 41 pares OD en cuatro vías que poseen corredores segregados: Avenida Vicuña Mackenna, Avenida Las Rejas, Avenida Santa Rosa y Avenida Grecia. Cada uno de estos pares OD a su vez se desagregó en función del período del día en el que fueron registrados los datos, llegando a un total de 197 *ParesOD/Período* para tráfico mixto, 71 para PSB y 48 para corredor.

La Figura 33 muestra la relación entre el promedio y la desviación estándar de los tiempos de viaje en Min/km para las tres alternativas en estudio. Los parámetros de las regresiones lineales presentadas en la Figura 33 se entregan en la Tabla 15.

Figura 33: VTV en bus operando en tráfico mixto, PSB y corredor



Fuente: Elaboración propia

Se observa que, teniendo en cuenta todas las observaciones de viajes en tráfico mixto (puntos azules), la relación entre el promedio y la desviación estándar del tiempo de viaje es positiva y puede ser ajustada por una regresión lineal. El valor máximo de tiempo de viaje promedio que toman los datos es de 15 Min/km (velocidad de 4 km/h), lo que corresponde a un nivel de congestión extrema. Sin embargo, y tal como se expuso en la Sección 6.4, con el efecto de la congestión extrema no se observa una reducción en la VTV como en la Figura 24, donde hay dos casos con congestión extrema que poseen una desviación estándar relativamente baja.

En la Figura 33 también se muestra la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje para bus en pista sólo bus (puntos verdes) y en corredor segregado (puntos rojos). Se observa en la Tabla 15 que la pendiente de la regresión lineal de VTV es significativamente mayor para viajes en tráfico mixto (0,61) que para PSB (0,23) y para corredor (0,25). Además se puede ver que el intervalo de confianza de la pendiente de la regresión de PSB está contenido en el intervalo de confianza de la pendiente de la regresión de corredor segregado, por lo que no se observan diferencias significativas entre ambas regresiones lineales. En la Figura 33 se puede ver además que los viajes en PSB y en corredor poseen el mismo rango de VTV, pero que el corredor segregado posee tiempos de viaje promedio menores. Además, al analizar los viajes en tráfico mixto cuyo tiempo promedio se encuentra en el mismo rango de PSB y corredor segregado (menor a 6 Min/km) se puede ver que la mayoría de los puntos azules en este rango tienen una VTV mayor que los rojos y los verdes, y que además la pendiente de tráfico mixto es mayor.

REGRESIÓN	m	n	R ² AJUSTADO
TRÁFICO MIXTO	0,61 (0,56;0,66)	-1,78 (-2,15;-1,41)	0,75
PISTA SÓLO BUS	0,23 (0,19;0,28)	-0,16 (-0,35;0,02)	0,61
CORREDOR SEGREGADO	0,25 (0,14;0,37)	-0,19 (-0,5;0,11)	0,31
TRÁFICO MIXTO (TVP MENOR A 6 MIN/KM)	0,39 (0,28;0,51)	-0,64 (-1,21;-0,07)	0,37

Tabla 15: Parámetros de regresiones lineales de Figura 33

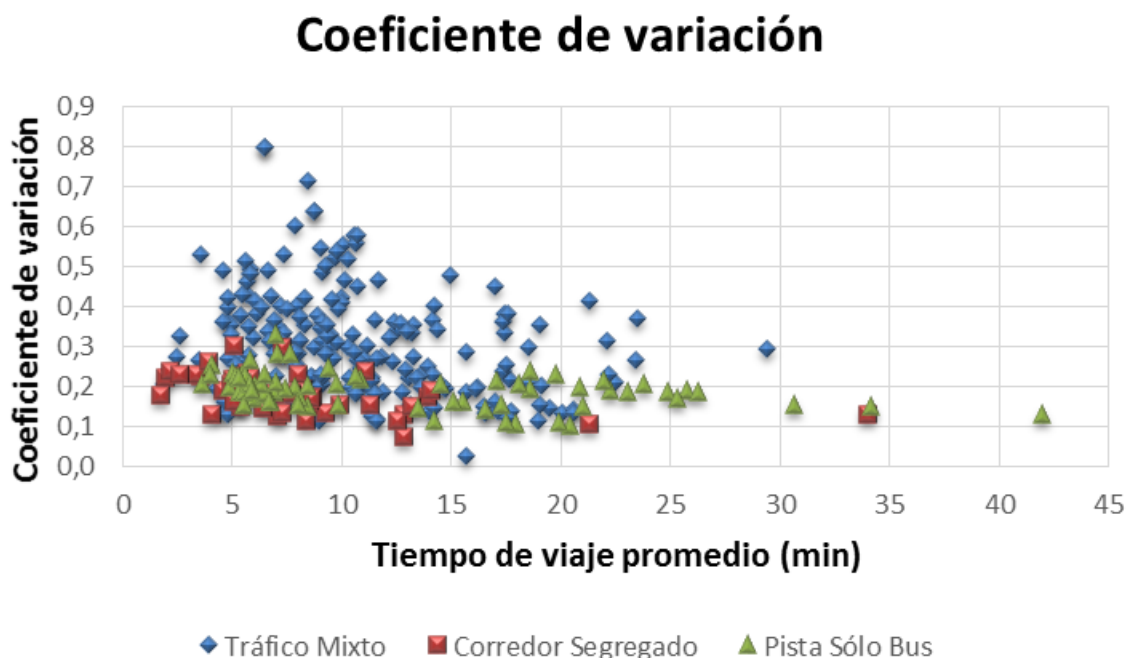
Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

Este resultado se complementa con la información presentada en la Figura 34, donde se analiza la relación entre el coeficiente de variación (CV) como medida de variabilidad, y el promedio del tiempo de viaje, para los mismos pares OD que se muestran en la Figura 33. El coeficiente de variación del tiempo de viaje está definido como la razón entre la desviación estándar (σ) y el promedio (μ) del tiempo de viaje, tal como se muestra en la siguiente ecuación. Valores altos de CV indican una alta VTV.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (29)$$

En la Figura 34 se muestran de color azul los puntos correspondientes a tráfico mixto, de color rojo los correspondientes a corredor y de color verde los de pista sólo bus (PSB). Se observa que los viajes en tráfico mixto presentan valores de CV mucho más altos (con un máximo de 0,8), que los que se generan en PSB y corredor, no mayores a 0,3 y 0,33, respectivamente.

Figura 34: Coeficiente de variación del tiempo de viaje en vehículo bus en tráfico mixto, PSB y corredor segregado



Fuente: Elaboración propia

En conclusión, en este análisis se pudo demostrar que los buses que operan en tráfico mixto no solo tienen tiempos de viaje promedio mayores, sino que además tienen una mayor VTV que los buses en PSB y en corredor segregado, dejando en evidencia que este tipo de medidas tiene beneficios adicionales relacionados con la reducción de la VTV, que no están siendo considerados en la evaluación de su implementación.

6.7 COMPARACIÓN DE LA VTV EN METRO VERSUS BUS EN PISTA SÓLO BUS

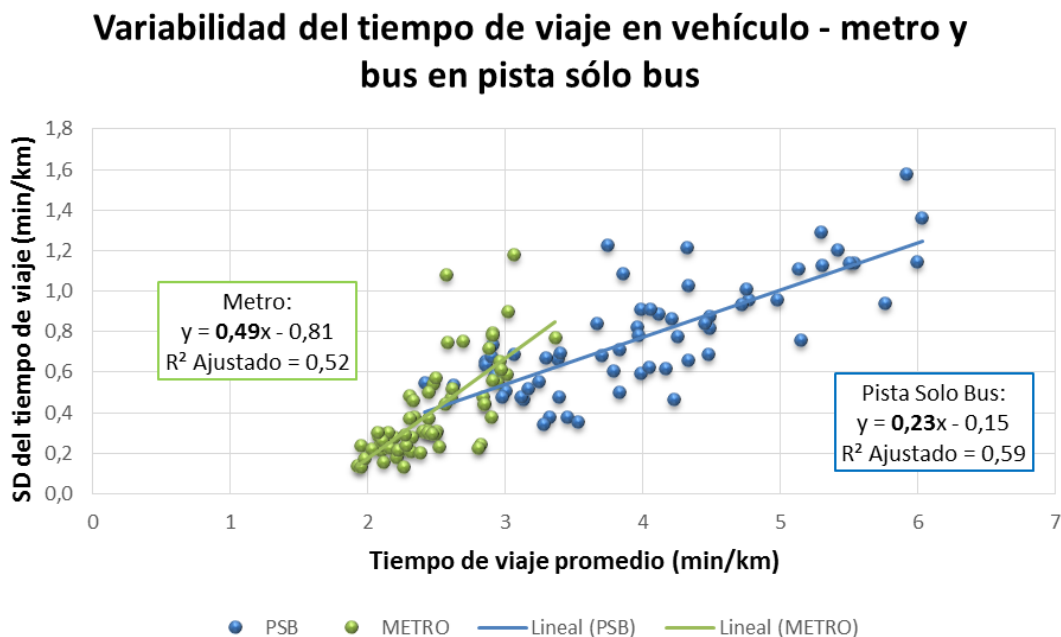
En esta sección se hace una comparación de la variabilidad del tiempo que se produce en viajes realizados en un mismo eje de la ciudad, pero en dos

modos distintos de transporte público: buses operando en la pista sólo bus del eje Alameda-Providencia-Apoquindo versus metro en la Línea 1.

Este análisis se basa en información contenida en las bases de datos BD3: GPS y BD4: METRO. De la BD3 se extrajo información tiempos de viaje registrados en 46 pares OD de viajes en pista sólo bus. De la BD4 se seleccionó una muestra que contiene tiempos de viaje para los mismos pares OD de la BD3. Es decir, se seleccionaron los tiempos de viaje de los 28 pares OD de la Línea 1 de metro que corresponden a los 46 pares OD de PSB (ver Tabla 4). El número de pares OD de metro es menor al de bus en PSB, ya que existe más de una parada de buses asociada a una estación de metro. Al desagregar los pares OD por período se llega a un total de 71 combinaciones *ParOD/Período* para PSB y a 62 para metro.

En la Figura 35 se muestra la relación entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje para metro y bus en PSB, para viajes realizados en los mismos pares OD y en los mismos períodos. En la Tabla 16 se muestran los parámetros asociados a las regresiones lineales estimadas para ambos modos. Se puede ver que la pendiente de metro es mucho mayor a la de PSB, pero el rango de valores que toma la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje en vehículo es menor en metro.

Figura 35: Relación entre desviación estándar y promedio del tiempo en vehículo metro y bus en PSB



Fuente: Elaboración propia

REGRESIÓN	m	n	R ² AJUSTADO
PSB	0,23 (0,18;0,28)	-0,15 (-0,36;0,05)	0,59
METRO	0,49 (0,37;0,61)	-0,81 (-1,11;-0,51)	0,52

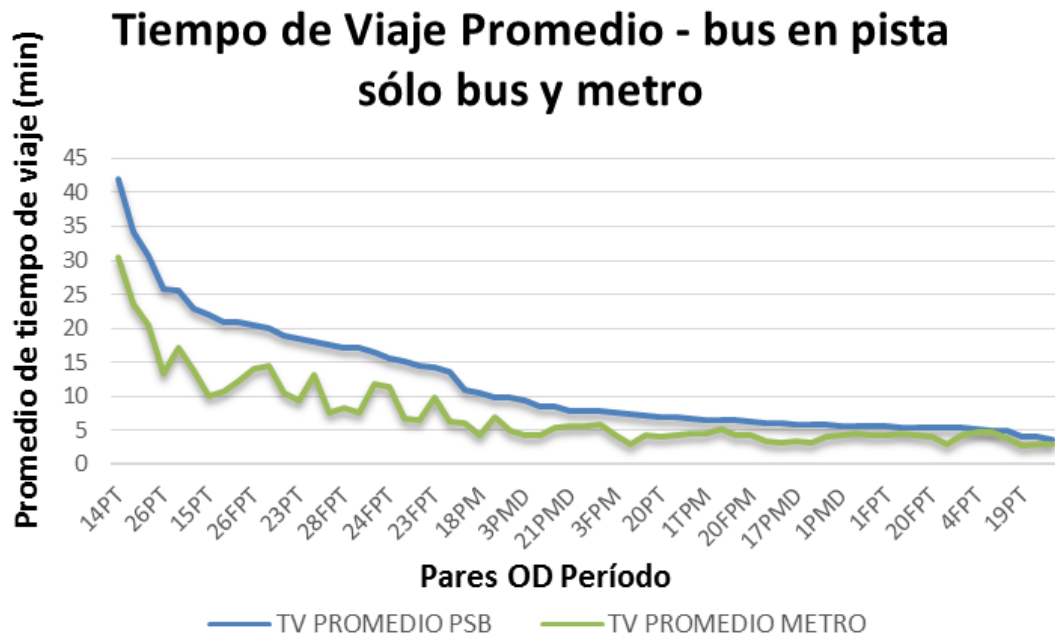
Tabla 16: Parámetros de regresiones lineales de Figura 35

Nota: Se muestra entre paréntesis el intervalo de confianza al 95% para cada parámetro. Las fuentes de color rojo se utilizan para los parámetros que estadísticamente no son significativos

En las gráficas de las figuras 36 a 38 que se presentan a continuación se muestra la comparación del promedio, de la desviación estándar y del coeficiente de variación del tiempo de viaje en minutos para metro y bus en PSB, para un mismo par OD y período, es decir, bajo los supuestos de la tesis, para un mismo viaje. Para generar estos gráficos se ordenaron los ParesOD/Período de mayor a menor tiempo de viaje promedio.

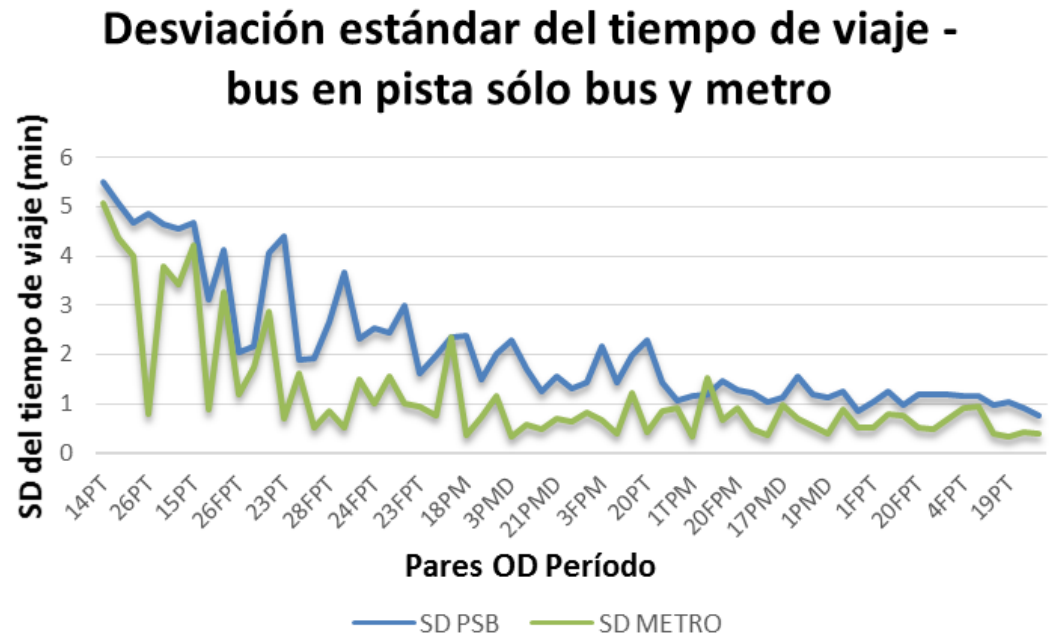
Se puede ver que el tiempo promedio siempre es menor en metro que en PSB, y que la VTV representada por la desviación estándar es menor en metro en 60 de los 62 ParesOD/Períodos analizados. Los dos casos restantes corresponden a viajes en punta tarde entre estaciones Baquedano y Universidad de Chile y entre estaciones Tobalaba y Santa Lucía, donde la desviación estándar es un 0,1 y un 30,2% mayor en metro que en bus en pista sólo bus, respectivamente. Esto se puede explicar debido a que ambas estaciones de origen son estaciones de combinación de la línea 1 con la línea 5 y la línea 4, respectivamente, y en punta tarde estos viajes en metro reciben una altísima afluencia de pasajeros, lo que hace aumentar el tiempo en y entre estaciones, por la ocurrencia poco frecuente de detenciones de los trenes y/o demoras extras en las subidas y bajadas de los pasajeros. De cualquier modo, en los pocos pares OD en los que el tiempo promedio es similar en ambos modos, la VTV representada tanto por la desviación estándar (SD) como por el coeficiente de variación (CV), es siempre mayor en bus.

Figura 36: Tiempo promedio de viaje en bus en PSB y en metro



Fuente: Elaboración propia

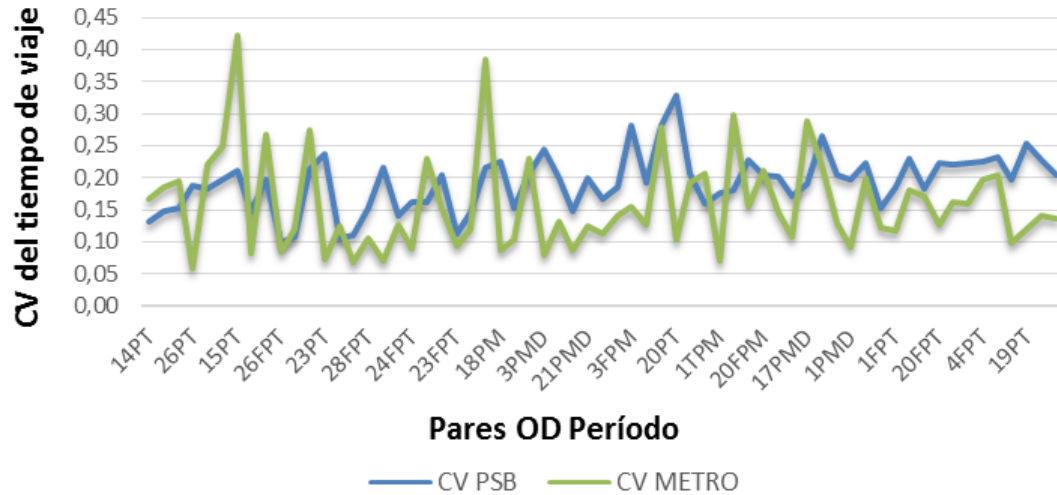
Figura 37: SD del tiempo de viaje en bus en PSB y en metro



Fuente: Elaboración propia

Figura 38: CV del tiempo de viaje en bus en PSB y en metro

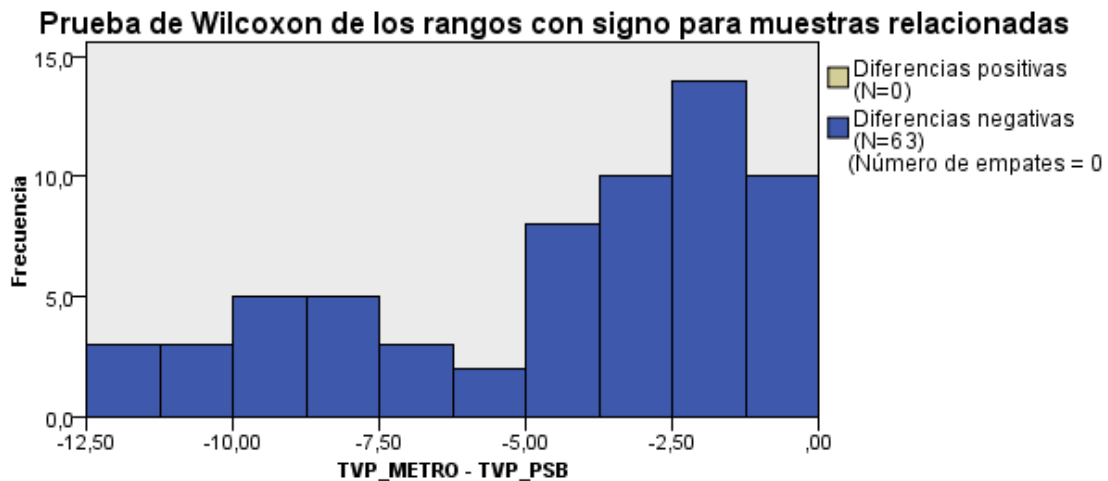
Coeficiente de Variación del tiempo de viaje - bus en pista sólo bus y metro



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la siguiente figura se muestra el resultado de la aplicación del test de Wilcoxon a los datos de tiempo promedio de viaje en bus en PSB y en metro, para estudiar si estos valores en ambas muestras son significativamente distintos. La hipótesis nula que busca probar este test es que la mediana de las diferencias entre el tiempo de viaje promedio en pista sólo bus y el tiempo de viaje promedio en metro para cada uno de los pares OD, sea igual a cero, es decir, que los datos en ambas muestras son similares. El resultado de la aplicación de este test da que se rechaza la hipótesis nula, ya que los datos de tiempo de viaje promedio son siempre mayores en PSB que en metro.

Figura 39: Prueba de Wilcoxon para comparar el tiempo promedio de viaje en bus en PSB y en metro



Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La mediana de las diferencias entre TVP_PSB y TVP_METRO es igual a 0.	Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo para muestras relacionadas	,000	Rechace la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es ,05.

Fuente: Elaboración propia

Se concluye, al comparar los tiempos de viaje en metro y en bus en pista sólo bus para los mismos pares OD y períodos, que el tiempo promedio siempre es menor en metro que en PSB, y que la VTV es menor en metro en el 97% de los casos, con dos excepciones en las que la desviación estándar del tiempo en metro aumenta por motivos extra que ya fueron explicados. Además, en los pocos pares OD en los que el tiempo promedio es similar en ambos modos, la desviación estándar y el coeficiente de variación son siempre mayores en bus.

6.8 OTRAS MEDIDAS DE VARIABILIDAD DEL TIEMPO DE VIAJE

Para complementar los resultados obtenidos al utilizar la desviación estándar como medida de la variabilidad del tiempo de viaje, en esta sección se aplicarán dos medidas asimétricas, tal como lo sugiere van Lint et al. (2008).

La primera de ellas corresponde a λ_{skew} , parámetro que indica el nivel de asimetría de la distribución del tiempo de viaje. Se obtiene a partir de la

razón entre la diferencia entre los percentiles 90 y 50 y los percentiles 50 y 10, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda_{skew} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 50 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}} \quad (30)$$

Valores altos de λ_{skew} indican la existencia de una fuerte asimetría positiva en la distribución de los tiempos de viaje principalmente debida a la presencia de incidentes, y por lo tanto, una alta variabilidad en los tiempos de viaje.

Cuando λ_{skew} es igual a uno la distribución es simétrica y es necesario analizar el ancho de la distribución, es por esto que la segunda medida calculada corresponde a λ_{var} , parámetro que indica el ancho relativo de la distribución de tiempo de viaje con respecto a la mediana. Cuanto más amplia la distribución es relativa a la mediana, mayor será el rango de tiempos de viaje que pueden ocurrir y por lo tanto, la confiabilidad del tiempo de viaje es inferior (van Lint et al., 2008), por efecto de la congestión recurrente. Este indicador se define como la razón entre la diferencia de los percentiles 90 y 10, y la mediana del tiempo de viaje, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\lambda_{var} = \frac{\text{Percentil 90 del TV} - \text{Percentil 10 del TV}}{\text{Percentil 50 del TV}} \quad (31)$$

En la Figura 40 se muestran los valores de λ_{skew} y λ_{var} para los tiempos de viaje en metro, en automóvil y en bus, distinguiendo entre tráfico mixto, pista sólo bus y corredor segregado, obtenidos a partir de los datos de las bases de datos BD1: UOCT para automóvil, BD2: TERMÓMETRO para el caso de metro, y BD3: GPS para bus.

Es interesante notar los altos valores que toma λ_{skew} para viajes en metro. Si se comparan estos valores con los obtenidos en los modos bus en pista sólo bus y corredor segregado, se observa que el 94% de los pares OD de viajes realizados en metro posee valores mayores a 1, con un valor máximo que llega a 5,2, mientras que sólo un 58% de los pares OD de bus en pista sólo bus y un 55% en corredor segregado están por sobre 1, con valores máximos de 2,57 y 2,7, respectivamente. Esto se debe a que en metro, la variabilidad del tiempo de viaje está dada por unas pocas observaciones que corresponden a viajes con tiempos inusualmente altos, mientras que la mayoría de los datos se concentran en las cercanías a la media, como se puede ver en la Figura 4.

Figura 40: Asimetría (o inclinación) y ancho de curva de tiempo de viaje en metro, automóvil, y bus en tráfico mixto, PSB y corredor



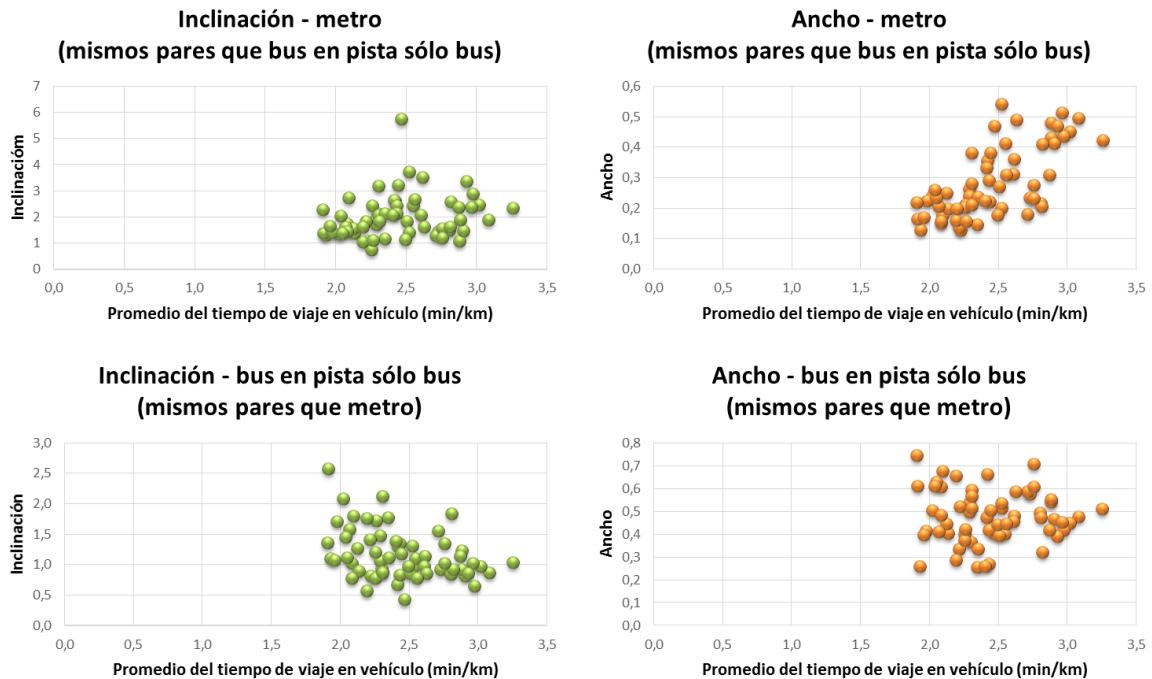
Fuente: Elaboración propia

Lo que esto indica es que el tiempo en metro presenta un tipo de variabilidad distinta, no detectada en el análisis realizado utilizando la desviación estándar como medida de variabilidad. Este resultado refuerza el

planteamiento de van Lint et al. (2008), quien concluyó que se pueden obtener resultados distintos al comparar distintas medidas de confiabilidad, y en particular cuando se comparan medidas simétricas que no consideran la asimetría de la distribución de tiempos de viaje, con medidas asimétricas que sí lo hacen.

En la Figura 41 se muestra λ_{skew} y λ_{var} para el tiempo de viaje en bus en pista sólo bus y en metro, con datos extraídos de las bases de datos BD3: GPS y BD4: METRO, para los mismos pares OD. Se aprecia un resultado similar al mostrado en la figura anterior, donde el 98% de los pares OD de viajes en metro poseen un λ_{skew} mayor a 1, con un valor máximo de 5,76, mientras que en pista solo bus el 58% de los viajes en bus están por sobre 1, alcanzando un máximo de 2,57.

Figura 41: Asimetría (o inclinación) y ancho de curva de tiempo de viaje en los mismos pares OD en metro (BD4: METRO) y en bus en pista sólo bus (BD3: GPS)



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, al analizar el parámetro del ancho de la curva del tiempo de viaje en las figuras anteriores, se puede ver que los modos sujetos a congestión (automóviles y buses en tráfico mixto) poseen distribuciones de tiempo de viaje mucho más anchas que metro y buses operando en pista sólo bus y corredor, y por lo tanto poseen una mayor variabilidad en los tiempos de viaje, coincidiendo este análisis con el realizado utilizando la desviación estándar como medida de variabilidad. Los rangos en los que se encuentra λ_{var} para el tiempo de viaje en automóvil y bus en tráfico mixto

son $[0,3;1,2]$ y $[0,3;2,6]$, y los de metro, PSB y corredor son $[0,1;0,7]$, $[0,25;0,75]$ y $[0,2;0,8]$, respectivamente (ver Figura 40).

Finalmente, en la siguientes figuras se muestran los valores de λ_{skew} y λ_{var} para los mismos pares OD en PSB (BD3: GPS) y metro (BD4: METRO). Se puede ver, que al igual de lo ocurrido en la Figura 36, la Figura 37 y la Figura 38, para aquellos pares OD donde el tiempo de viaje promedio es similar en PSB y metro, la VTV representada por λ_{var} es menor en metro, pero al ser representada por λ_{skew} , se encuentra que la distribución en PSB es menos inclinada, debido a los incidentes que hacen aumentar los tiempos de viaje en metro en contadas ocasiones.

Figura 42: Ancho de la curva de tiempo de viaje en bus en PSB y metro

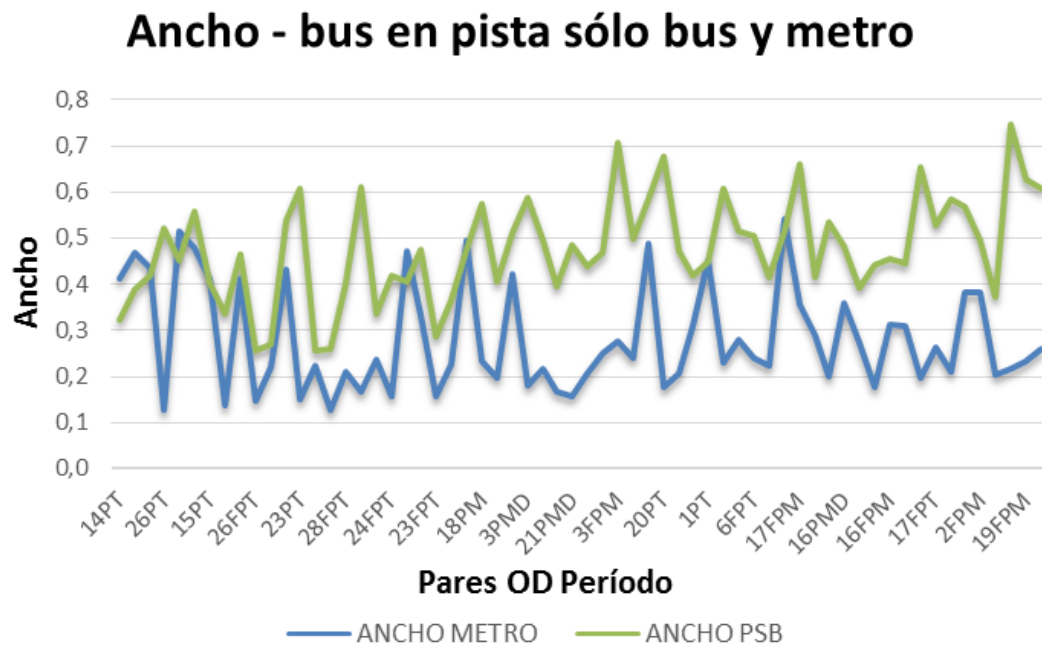
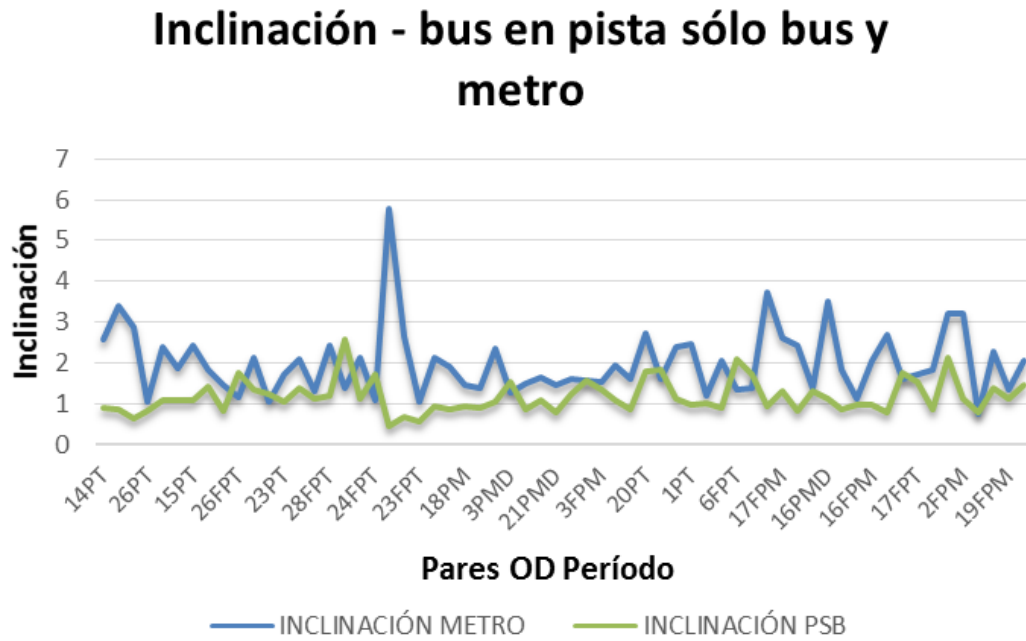


Figura 43: Asimetría (o inclinación) de la curva de tiempo de viaje en bus en PSB y metro



Fuente: Elaboración propia

7. VTV EN VIAJES PUERTA A PUERTA

En el capítulo anterior se ha presentado la caracterización de la variabilidad del tiempo de cada etapa de un viaje en transporte público de forma separada, con el objetivo de estudiar las diferencias en la VTV en caminata, espera, y a bordo de bus o metro.

En el presente capítulo se profundiza en el análisis, identificando las etapas de viaje que son estadísticamente significativas para explicar la variabilidad del tiempo total de viaje. Para esto, 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 en minutos, como se muestra a continuación en la Ecuación 32:

$$\sigma = b_0 + b_1 t_{acc} + b_2 t_{esp-b} + b_3 t_{esp-m} + b_4 t_{veh-b} + b_5 t_{veh-m} + b_6 t_{tbd} \quad (32)$$

Donde:

- t_{acc} : tiempo promedio de caminata de acceso en minutos
- t_{esp-b} : tiempo promedio de espera en bus en minutos
- t_{esp-m} : tiempo promedio de espera en metro en minutos
- t_{veh-b} : tiempo promedio a bordo de vehículo bus en minutos
- t_{veh-m} : tiempo promedio a bordo de vehículo metro en minutos
- t_{tbd} : tiempo promedio de caminata de trasbordo en minutos

Este análisis se realiza a partir de la información contenida en la base de datos BD2: TERMÓMETRO, que posee observaciones repetidas de viajes puerta a puerta entre los años 2007 y 2012. En la Tabla 17 se muestra el número de pares origen destino (OD) cuyos tiempos de viaje están contenidos en la BD2, 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.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
NÚMERO DE PARES OD REGISTRADOS	66	60	60	60	57	42
PROMEDIO DE OBSERVACIONES POR PAR OD	156	192	155	22	17	4
% VARIACIÓN VELOCIDAD BUS	-	7,2%	-1,2%	2,7%	0,8%	-17,5%

Tabla 17: Características de los datos de BD2: TERMÓMETRO por año

Se puede ver que el año 2007 se cuenta con el mayor número de pares OD registrados (66 pares), disminuyendo a 60 en el período 2008-2010. En el año 2012 sólo fueron medidos 42 pares. Por otro lado, el número de observaciones promedio por par OD se reduce significativamente en los años 2010, 2011 y 2012, debido principalmente a que en los últimos años ha sido más fácil recolectar tiempos de viaje a partir de los pulsos GPS de los buses

y las transacciones BIP!. Con respecto a la velocidad promedio de los buses, se observa que se mantuvo prácticamente constante en el período 2008-2011, pero entre el 2007 y el 2008 hubo un aumento significativo (de un 7,2%), lo que es explicado por el hecho de que el 2007 entró en operación el sistema de transporte público actual de Santiago (Transantiago), y se generó una serie de problemas operacionales (Muñoz y Gschwender, 2008), por lo que es de esperar que para este año 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.

Para la caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje total se toma 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 analiza cada uno de estos 4 años por separado, y el período 2008-2011 completo, como se presenta en la Tabla 18. Además se incluye un modelo para el período 2008-2009, dado que ambos años presentan un número bastante mayor de observaciones por par OD que los años 2010 y 2011. El análisis se realiza sólo para los 34 pares origen destino que poseen caminata de acceso y de trasbordo.

En la Tabla 18 se presentan los parámetros estimados para cada uno de los modelos analizados. Enfocándose en la bondad de ajuste de los modelos, se puede decir que los mejores resultados corresponden a los 4 modelos que incluyen datos de los años 2008 y 2009, donde el valor de R^2 Ajustado está entre 0,62 y 0,66.

Los años 2010 y 2011 poseen muy pocas observaciones por par OD para poder estimar modelos confiables (ver Tabla 17), lo que se refleja en la baja bondad de ajuste de estos modelos y en el hecho de que en el modelo del año 2010 ninguna variable sea estadísticamente significativa.

Al enfocarse en la significancia de las variables, se observa que en los modelos realizados con datos más confiables (años 2008, 2009 y período 2008-2009) el tiempo promedio de espera en bus y el tiempo promedio en vehículo bus son estadísticamente significativos para explicar la VTV total a un nivel de confianza del 99%.

El tiempo promedio en vehículo metro es estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95% en los modelos estimados con datos del año 2009 y del período 2008-2009, y es significativo al 94% de confianza en el modelo del período 2008-2011, pero no es significativo en los modelos de los años 2008 y 2011.

Finalmente se observa que el tiempo promedio de caminata, tanto de acceso como de trasbordo, y el tiempo promedio de espera en metro no son

estadísticamente significativos para explicar la VTV total en ninguno de los modelos.

MODELO	2008-2011	2008-2009	2008	2009	2010	2011
CONSTANTE	2,03 (2,21)	1,83 (1,97)	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)	0,04 (0,36)	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)	0,53 (6,21)	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)	-0,56 (-0,63)	-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 (5,30)	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)	0,16 (1,95)	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)	-0,10 (-0,54)	-0,20 (-0,93)	-0,04 (-0,21)	0,54 (1,30)	0,01 (0,03)
R CUADRADO	0,78	0,78	0,76	0,73	0,28	0,57
R CUADRADO AJUSTADO	0,72	0,72	0,69	0,66	0,08	0,44

Tabla 18: Modelos de regresión para la VTV total, agregados y por año

Nota: El test-t se muestra entre paréntesis bajo el valor del parámetro de cada variable. Las variables que no son estadísticamente significativas se muestran en fuente de color rojo.

La Tabla 18 es el primer esfuerzo en la literatura por determinar si una etapa específica de un viaje en transporte público es significativa en explicar la variabilidad del tiempo de viaje total puerta a puerta, confirmando los resultados presentados en el capítulo anterior. Se concluye que principalmente el tiempo promedio de espera y en vehículo para el modo bus son las etapas que en mayor grado afectan a la VTV total, seguidas por el tiempo promedio en vehículo metro. Es interesante notar que el tiempo promedio de espera en estaciones de metro no es significativo, lo que se intuye que sucede debido a la estabilidad en los intervalos del metro de Santiago y a su alta frecuencia de operación. El tiempo de caminata, a pesar de estar sujeto a variabilidad al igual que el resto de las etapas, no influye de manera significativa³ en la VTV total.

³ Los datos en la BD2: TERMÓMETRO fueron recolectados por distintas personas, que poseen distintas velocidades de caminata, por lo que la variabilidad del tiempo de caminata podría verse aumentada más allá de lo estimado, por el comportamiento de las personas al caminar.

Estos resultados sugieren que la implementación de políticas de transporte que reduzcan la variabilidad del tiempo de viaje en transporte público, deben estar enfocadas en reducir el tiempo promedio de espera en bus y el tiempo en vehículo bus, y además en controlar la estabilidad del tiempo de recorrido de metro. En este sentido se puede concluir que medidas que hacen disminuir en promedio el tiempo de recorrido de los buses, como la segregación física de buses del resto del tráfico por medio de la implementación de pistas sólo bus, vías exclusivas o corredores segregados, y además, la incorporación de un sistema de control de flota para reducir el apilotonamiento de buses, disminuyendo de esta manera el tiempo promedio de espera en bus, serán significativas para aumentar la confiabilidad en los tiempos de viaje de puerta a puerta en transporte público.

8. CONCLUSIONES

8.1 RESUMEN

En esta tesis 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 utilizaron cuatro bases de datos para este propósito; la primera de ellas contiene tiempos de viaje en automóvil obtenidos con el método de vehículo flotante en diferentes rutas, y las otras tres poseen tiempos de viaje en transporte público registrados a partir de distintas metodologías. Es importante destacar que una de estas bases de datos incluye además del tiempo en vehículo, el tiempo de las etapas del viaje que se efectúan fuera del vehículo (acceso, espera y trasbordo).

La metodología utilizada consistió en encontrar una relación entre el tiempo de viaje promedio (TVP) y la VTV. En primer lugar, se representó la VTV con una medida simétrica, la desviación estándar. Luego, se utilizaron dos medidas asimétricas, los parámetros de asimetría (λ_{skew}) y de ancho (λ_{var}) de la distribución del tiempo de viaje. El análisis se realizó para transporte privado y para cada una de las etapas de un viaje en transporte público por separado (caminata, espera y a bordo de un vehículo). Por otro lado, se analizó la VTV total para un viaje completo puerta a puerta en transporte público en función de cada una de estas etapas.

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 permiten cuantificar el efecto en la reducción de la variabilidad del tiempo de viaje que tienen los proyectos que buscan disminuir los tiempos promedio de viaje.

Por otro lado, se estimaron las distribuciones de probabilidad que mejor ajustan a los tiempos de viaje observados en dos de las bases de datos utilizadas en esta tesis para los modos automóvil, bus y metro, para cada uno de los distintos tramos de viaje.

Complementariamente, se realizó un análisis de detección de valores atípicos de tiempo de viaje en dos de las bases de datos utilizadas, de manera de analizar de qué manera influye en la VTV la presencia de incidentes que provocan este tipo de valores anómalos de tiempos de viaje. Para esto se aplicaron tres pruebas de detección de *outliers*, y sobre los resultados obtenidos se aplicó el criterio del analista para determinar si los valores atípicos detectados corresponden o no a incidentes. Este resultado se utilizó para contrastar el efecto en la VTV de la congestión recurrente, quitando los incidentes de la muestra, y de la congestión no recurrente, tomando en cuenta para el análisis todas las observaciones de tiempo de viaje.

8.2 PRINCIPALES RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje se encuentran fuertemente relacionados para el modo automóvil y para las etapas espera y a bordo del vehículo del modo bus. Por otra parte, para el tiempo de espera y en vehículo del modo metro la relación encontrada es más débil. Este resultado era de esperarse, ya que a diferencia de lo que ocurre con buses y automóviles, los viajes en metro no se ven afectados por la principal fuente de VTV: la congestión. Es por este motivo que el tiempo de viaje en vehículo metro es más estable cuando se utiliza una medida de confiabilidad simétrica como la desviación estándar o el ancho λ_{var} . La variabilidad del modo metro está dada por la presencia de otros factores no recurrentes que hacen aumentar el tiempo de viaje en ciertas ocasiones, haciendo que su curva presente una asimetría mayor a la del resto de los modos, lo que quedó en evidencia al representar la VTV por una medida asimétrica como lo es λ_{skew} . Para complementar este análisis se comparó la variabilidad del tiempo de viaje en vehículo metro y en bus circulando en pista sólo bus en el mismo eje (Alameda-Providencia-Apoquindo y Línea 1 de Metro) y entre mismos pares OD, obteniendo como resultado que el tiempo promedio y la variabilidad del tiempo de viaje en metro siempre es menor al bus al utilizar medidas de VTV simétricas, incluso en aquellos pares OD en los que el tiempo promedio es similar en ambos modos. El tiempo de viaje en metro resulta tener menos varianza que el tiempo de viaje en automóvil y en buses, incluso cuando estos últimos tienen prioridad parcial en el uso de vías (pistas solo bus).

Al analizar las distribuciones que mejor ajustan a los tiempos de viaje observados para todos los tramos de viaje analizados en dos de las bases de datos, los resultados indican que en la mayoría de los casos (65,6% para bus, 53,8% para metro y 84% para autos), distribuciones de probabilidad asimétricas como Lognormal, Loglogistic y Triangular son las que mejor ajustan, mientras en el resto de las observaciones ajustan mejor las distribuciones simétricas.

Por otro lado, y con el objetivo de poder hacer un análisis de la influencia que los incidentes pudiesen tener en la VTV se estudió la presencia de valores atípicos, encontrando que el total de viajes afectados por incidentes no alcanza el 1% para todos los modos. En el caso de los buses, el valor de los incidentes en promedio es un 135% mayor a la media de los tiempos de viaje, mientras que para metro es un 103% mayor, y en los autos, un 170% mayor.

Al analizar la VTV en automóvil, se encontró una relación lineal y creciente entre la media y la desviación estándar del tiempo de viaje (en minutos por kilómetro) con pendiente entre 0,30 y 0,32, coincidiendo con el resultado encontrado por Tirachini et al. (2014) con datos empíricos de tiempos de

viaje en automóvil de la ciudad de Sydney. Esto quiere decir que 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. La evidencia encontrada en Sydney y en Santiago podría constituir un patrón con respecto al valor de la pendiente de la relación lineal entre el tiempo de viaje promedio (TVP) y la desviación estándar (SD) del tiempo de viaje en Min/km, pero es muy pronto para generalizar esta conclusión y hace falta realizar análisis similares en otras ciudades del mundo. Es importante mencionar que en Mahmassani et al. (2012) se estimaron regresiones lineales a partir de datos de simulación de tiempo de viaje en automóvil en un grupo de ciudades de Estados Unidos, encontrando pendientes entre 0,25 y 0,53, concordando también con los resultados presentados en esta tesis.

Al analizar el efecto de los incidentes en la VTV del automóvil se obtuvo como resultado que efectivamente éstos aumentan la variabilidad del tiempo de viaje de algunas observaciones al encontrarse bajo la influencia de congestión no recurrente. Al aislar el efecto de la congestión recurrente en la muestra, el impacto en la relación entre la media y la desviación estándar del tiempo de viaje fue sólo un 10%.

La relación encontrada entre la SD y el promedio del tiempo de caminata también es creciente, pero el hecho de que la información utilizada en este análisis haya sido registrada por más de una persona en un mismo par OD, dejó en evidencia que existe una fuente de variabilidad adicional dada por características personales de los medidores, como edad, género y condición física, entre otras, información que no fue levantada en la medición, por lo que este análisis quedó fuera del alcance de esta tesis.

Al analizar la VTV de los viajes puerta a puerta en transporte público, se obtuvieron resultados que concuerdan con lo encontrado en la caracterización de la VTV de cada etapa por separado. Se demostró que la variabilidad del tiempo total de viaje se explica principalmente por el tiempo promedio de espera bus y por el tiempo promedio en vehículo bus (etapas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99%), seguidas por el tiempo promedio en vehículo metro. El tiempo de caminata, tanto de acceso como de trasbordo, no influye de manera significativa en la VTV total, y el tiempo promedio de espera en estaciones de metro tampoco lo hace, probablemente debido a la estabilidad en los intervalos del metro y a la alta frecuencia de operación. Estos resultados tienen implicancias para políticas de transporte que tiendan a aumentar la confiabilidad de los viajes en transporte público, 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 control del apilamiento de buses y la implementación de medidas que den prioridad vial al bus, permitiendo aumentar las velocidades comerciales.

Estos resultados se complementan con el análisis de la influencia que tienen los corredores segregados, las pistas sólo bus y el tráfico mixto en la VTV. En este análisis se encontró que en tráfico mixto los buses no sólo poseen mayores tiempos de viaje, sino que además presentan una mayor VTV que los buses que operan en pistas sólo bus y corredores. Por otro lado, los viajes realizados en pista sólo bus presentan rangos similares de VTV que aquéllos pertenecientes a corredor segregado, pero su tiempo de viaje promedio es mayor. Estos resultados muestran una vez más que las medidas que dan prioridad de circulación al transporte público, efectivamente poseen beneficios que no están siendo cuantificados ni tomados en consideración al ser evaluada su implementación, asociados a la reducción de la VTV.

8.3 EXTENSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación presentada en esta tesis deja abiertas varias líneas de investigación futura.

En primer lugar es importante el desarrollo de modelos que permitan cuantificar los beneficios de la reducción de VTV en la valoración de las personas, para ser incluidos en la evaluación de la implementación de políticas de transporte, ya que estos beneficios van más allá de los obtenidos al reducir el tiempo de viaje en promedio. Para esto, las relaciones entre la desviación estándar y el promedio del tiempo de viaje encontradas en esta investigación podrían ser incorporadas de manera simple en un modelo de media-varianza.

Por otro lado, y con el objetivo de mejorar el análisis de la VTV en caminata es preciso contar con observaciones de tiempo que puedan hacerse cargo de fuentes de variabilidad extra, como las características físicas de los medidores, ya que los datos utilizados en esta tesis no siempre fueron registrados por el mismo medidor en un mismo par origen destino. Además, se desconoce la ruta tomada por los medidores, lo que impidió analizar otras variables como el número de semáforos, de intersecciones de prioridad, o la longitud del tramo caminado, por lo que futuras investigaciones se podrían enfocar en el análisis de este tipo de variables del sistema, las que influyen en tanto en la variabilidad del tiempo de caminata, como en el tiempo promedio.

Finalmente, una línea futura de investigación tiene relación con el desarrollo en la ciudad de Santiago de investigaciones similares a las realizadas por autores como Feng (2014) y El-Geneidy et al. (2011), entre otros, quienes analizaron el efecto en la VTV de factores como el número de semáforos o de paraderos presentes en una ruta, y el número de pasajeros abordando o bajando de los buses, entre otros.

GLOSARIO DE ABREVIACIONES

ABREVIACIÓN	DEFINICIÓN
VTV	Variabilidad del tiempo de viaje
TVP	Tiempo de viaje promedio
TV	Tiempo de viaje
OD	Origen-destino
AVL	Automated Vehicle Location (localización automática de vehículos)
APC	Automatic Passenger Counters (conteo automático de pasajeros)
BD1	Base de datos 1
BD2	Base de datos 2
BD3	Base de datos 3
BD4	Base de datos 4
UOCT	Unidad Operativa de Control de Tránsito
DTPM	Directorio de Transporte Público Metropolitano
SD	Desviación estándar
CV	Coficiente de variación
TBD	Trasbordo

BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Aty, Mohamed A., Ryuichi Kitamura y P. P. Jovanis (1995) Investigating Effect of Travel Time Variability on Route Choice Using Repeated-Measurement Stated Preference Data. **Transportation Research Record**, 1493, 39-45.
- Abkowitz, M. D. y I. Engelstein (1983) Factors affecting running time on transit routes. **Transportation Research Part A**, 17, 107-113.
- Al-Deek, H. M. y E. B. Emam (2006) Computing travel time reliability in transportation networks with multistates and dependent link failures. **Journal of computing in civil engineering**, 20, 317-327.
- Aron, M., N. Bhourri y Y. Guessous (2014) Estimating Travel Time Distribution for Reliability Analysis. **Transport Research Arena**
- Arriagada, J., A. Gschwender y M. Munizaga (2015). Modelación del fenómeno de apelotonamiento de buses usando datos masivos de posicionamiento y transacciones de pago. XVII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Concepción, Chile
- 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., M. Dix y A. D. May (1987) Travel time variability and its effect on time of day choice for the journey to work. **Planning and transport research and computation**
- Bates, J., J. Polak, P. Jones y A. Cook (2001) The valuation of reliability for personal travel. **Transportation Research Part E**, 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.**
- Börjesson, M., J. Eliasson y J. P. Franklin (2012) Valuations of travel time variability in scheduling versus mean-variance models. **Transportation Research Part B**, 46, 855-873.
- Byon, Y.-J., C. E. Cortés, F. J. Martinez, M. Munizaga 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.
- Davies, L. y U. Gather (1993) The identification of multiple outliers. **Journal of the American Statistical Association**, 88, 782-792.
- 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.
- Delgado, F., J. C. Munoz y R. Giesen (2012) How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance? **Transportation Research Part B: Methodological**, 46, 1202-1217.
- El-Geneidy, A. M., J. Horning y K. J. Krizek (2011) Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicular locator systems. **Journal of Advanced Transportation**, 45, 66-79.
- Eliasson, J. (2006) Forecasting travel time variability. **Proceedings of the European Transport Conference**
- Eliasson, J. (2007) The relationship between travel time variability and road congestion. **World Conference on Transport Research, Berkeley.**
- Feng, W. (2014) Analyses of Bus Travel Time Reliability and Transit Signal Priority at the Stop-To-Stop Segment Level.
- Grubbs, F. E. (1969) Procedures for detecting outlying observations in samples. **Technometrics**, 11, 1-21.
- Hampel, F. R. (1985) The breakdown points of the mean combined with some rejection rules. **Technometrics**, 27, 95-107.

- Hollander, Y. (2006) Direct versus indirect models for the effects of unreliability. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 40, 699-711.
- Iglewicz, B. y D. C. Hoaglin (1993). How to detect and handle outliers, Asq Press.
- Katsikopoulos, K. V., Y. Duse-Anthony, D. L. Fisher y S. A. Duffy (2002) Risk attitude reversals in drivers' route choice when range of travel time information is provided. **Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society**, 44, 466-473.
- 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.
- Lagos, F. (2014) Modelamiento de incertidumbre en los tiempos de viaje.
- Lam, T. C. y K. A. Small (2001) The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment. **Transportation Research Part E**, 37, 231-251.
- 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. **Report available at <http://d2dtl5nnpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/TTI-2003-3.pdf>, accessed Dec 12th, 2014**
- Mahmassani, H. S., T. Hou y J. Dong (2012) Characterizing travel time variability in vehicular traffic networks: deriving a robust relation for reliability analysis. **Transportation Research Record**, 2315, 141-152.
- Manoj, K. y K. Senthamarai Kannan (2013) Comparison of methods for detecting outliers. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 4, 709-714.

- Martchouk, M., F. L. Mannering y L. Singh (2010) Travel time reliability in Indiana.
- May, A. D., P. W. Bonsall y N. W. Marler (1989) Travel time variability of a group of car commuters in North London. **Institute of Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 277**
- Mazloumi, E., G. Currie y G. Rose (2010) Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability. **Journal of Transportation Engineering**, 136, 623-631.
- Moghaddam, S. S., R. Noroozi, J. M. Casello y B. Hellinga (2011) Predicting the mean and variance of transit segments and route travel times. **Transportation Research Record**, 2217, 30-37.
- Munizaga, M., A. y C. Palma (2012) Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin–Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. **Transportation Research Part C**, 24, 9-18.
- Muñoz, J. C., M. Batarce y I. Torres (2013) Comparación del nivel de servicio del transporte público de seis ciudades latinoamericanas. **Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**
- Muñoz, J. C. y A. Gschwender (2008) Transantiago: A tale of two cities. **Research in Transportation Economics**, 22, 45-53.
- 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.
- Núñez, C. (2015) Cálculo de indicadores de calidad de servicio para el sistema de transporte público de Santiago a partir de datos pasivos.
- Osuna, E. E. y G. F. Newell (1972) Control strategies for an idealized bus system. **Transportation Science**, 6, 52-71.
- Peer, S., C. Koopmans y E. T. Verhoef (2012) Predicting travel time variability for cost-benefit analysis. **Transportation Research A**, 46, 79-90.
- Pu, W. (2011) Analytic relationships between travel time reliability measures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2254, 122-130.

- Rakha, H., I. El-Shawarby y M. Arafah (2010) Trip travel-time reliability: issues and proposed solutions. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 14, 232-250.
- Ross, S. M. (2005).Introductory statistics, Academic Press.
- Senna, L. A. D. S. (1994) The influence of travel time variability on the value of time. **Transportation**, 21, 203-228.
- Seo, S. (2002).A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets, Faculty of Graduate School of Public Health in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science by Songwon Seo BS, Kyunghee University
- Sincich, T. (1996).Business statistics by example, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Small, K. A. (1982) The scheduling of consumer activities: work trips. **The American Economic Review**467-479.
- Small, K. A. (1999).Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation, Transportation Research Board.
- 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.
- Strathman, J. G. y J. R. Hopper (1993) Empirical analysis of bus transit on-time performance. **Transportation Research Part A**, 27, 93-100.
- 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.
- Susilawati, S., M. A. P. Taylor y S. V. C. Somenahalli (2010) Travel time reliability measurement for selected corridors in the Adelaide Metropolitan Area. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, 8, 86-102.
- Tadikamalla, P. R. (1980) A look at the Burr and related distributions. **International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique**337-344.

- 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. A. Hensher y M. C. 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. y H. J. van Zuylen (2005) Monitoring and predicting freeway travel time reliability: using width and skew of day-to-day travel time distribution. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1917, 54-62.
- 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.

ANEXOS

ANEXO A: TABLAS

Lugar de subida	Ejes utilizados	Lugar de bajada
Avenida 4 Poniente esq. Nueva San Martín	Av. 4 Poniente / Av. Pajaritos	(M) Plaza de Maipú
Camino El Alba esq. Avenida La Plaza	Camino El Alba / Av. Apoquindo	(M) Los Dominicos
(M) Patronato	Av. Recoleta / San Antonio	(M) Santa Lucía
Est. Intermodal de La Florida	Av. Vicuña Mackenna	(M) Vicente Valdés
Est. Intermodal La Cisterna	Gran Avenida / Vicuña Mackenna	Vicuña Mackenna esq. J. Covarrubias
Est. Intermodal La Cisterna	Gran Avenida / Vicuña Mackenna	Vicuña Mackenna esq. Santa Josefina
(M) Las Mercedes	Av. Concha Y Toro	(M) Plaza de Puente Alto
(M) Los Dominicos	Camino El Alba / Camino Del Algarrobo	Camino del Algarrobo esq. Los Pintores
(M) Los Dominicos	Camino El Alba / San Carlos De Apoquindo	Sn. C. de Apoquindo esq. Cerro Abanico
Escuela de Ingeniería	Av. Blanco Encalada / Av. Grecia	(M) Irarrázaval
Plaza El Salto	El Salto / Av. Dorsal	(M) Dorsal
Santo Domingo esq. San Antonio	San Antonio	(M) Santa Lucía
(M) Santa Lucía	San Antonio / San Francisco	Av. Matta esq. San Francisco
(M) Santa Lucía	San Antonio / San Francisco	Santa Isabel esq. San Francisco
(M) Irarrázaval	Av. Grecia / Av. Matta	(M) Parque O'Higgins
(M) Irarrázaval	Av. Grecia / Av. Blanco Encalada	Escuela de Ingeniería
(M) Tobalaba	Av. Nueva Providencia / Av. Vitacura	Vitacura esq. Alonso de Córdova
(M) Tobalaba	Av. Nueva Providencia / Av. Vitacura	Vitacura esq. Navidad
(M) Tobalaba	Av. Nueva Providencia / Av. Vitacura	Plaza Lo Castillo
(M) Francisco Bilbao	Av. Bilbao	Av. Francisco Bilbao esq. Av. A. Vespucio
(M) Francisco Bilbao	Av. Bilbao	Av. Francisco Bilbao esq. Av. S. Elcano
(M) Francisco Bilbao	Av. Bilbao	Av. Francisco Bilbao esq. Emma Valderrama
Plaza Renca	Av. Sen. Jaime Guzmán / Sergio Valdovinos	(M) Blanqueado
Recoleta esq. Franciscana	Av. Recoleta / San Antonio	(M) Santa Lucía
(M) Blanqueado	Av. Las Rejas / Av. Sen. Jaime Guzmán	Plaza Renca
(M) Parque O'Higgins	Av. Matta / Av. Grecia	(M) Irarrázaval
Escuela de Ingeniería	Av. Blanco Encalada / Av. 5	Liceo A70

Lugar de subida	Ejes utilizados	Lugar de bajada
	De Abril	
Palacio Riesco	Rinconada El Salto / Av. Dorsal	(M) Dorsal
(M) Escuela Militar	Av. Vespucio / Av. Pdte. Kennedy	Mall Parque Arauco
(M) Escuela Militar	Av. Vespucio	Av. Américo Vespucio esq. Av. Pdte. Kennedy
(M) Los Quillayes	María Elena / Diego Portales	Diego Portales esq. La Alauda
(M) Francisco Bilbao	Av. Bilbao	Av. Francisco Bilbao esq. Jorge Matte Gormaz
Estación Mapocho	Ismael Valdés Vergara / Av. Independencia	Av. Independencia esq. Santos Dumont
Estación Mapocho	Ismael Valdés Vergara / Av. Independencia	Hospitales
Estación Mapocho	Ismael Valdés Vergara / Av. La Paz	Avenida La Paz esq. Juárez Larga
Estación Mapocho	Ismael Valdés Vergara / Av. La Paz	Terminal Lastra
Estación Mapocho	Ismael Valdés Vergara / Echeverría	Echeverría esq. Av. Independencia
(M) Pedro de Valdivia	Av. Pedro De Valdivia	Av. Pedro de Valdivia esq. Av. Irrazábal
(M) Pedro de Valdivia	Av. Pedro De Valdivia	Av. Pedro de Valdivia esq. Pocuro
(M) Pedro de Valdivia	Av. Pedro De Valdivia	Av. Pedro de Valdivia esq. Dr. P. Lautaro Ferrer
(M) Pedro de Valdivia	Av. Pedro De Valdivia	Municipalidad de Providencia
(M) Pedro de Valdivia	Av. Pedro De Valdivia	Plaza Pedro de Valdivia

Tabla 19: Lugares de inicio y fin de viajes en tráfico mixto y ejes utilizados

PAR OD	PRIMER MODO	ORIGEN	PRIMER PARADERO	¿HAY CAMINATA?
11-12	Bus	Las Condes / Las Tranqueras	Las Tranqueras / Las Condes	No
1-2	Bus	La Dehesa / El Rodeo	La Dehesa / El Rodeo	No
12-11	Bus	Jose Manuel Borgoño / Los Adobes	Los Adobes / Rinconada	Sí
13-18	Bus	Rinconada / Las Naciones	Rinconada / Las Naciones	No
14-15	Bus	Independencia / Olivos	Independencia / Rivera	Si
15-14	Bus	Agustinas / Santa Lucia	Monjitas / Mac Iver	Sí
16-17	Bus	Bandera / Moneda	Univ. de Chile	Sí
17-16	Bus	Central / A. Vespucio	Central / Castro	Sí
19-22	Bus	Rojas Magallanes / La Araucania	Rojas Magallanes / Manque	Sí
2-1	Bus	San Jose de la Estrella / Ramon Freire	San Jose de la Estrella / Ramon Freire	No
22-19	Bus	Diego Portales / Santa Cecilia	Diego Portales / Santa Cecilia	No
23-3	Bus	San Jose de La Estrella / Julio Cesar	San Jose de La Estrella / Julio Cesar	No
24-21	Bus	Santa Amalia / Colombia	Santa Amalia / Colombia	No
25-28	Bus	O'Higgins / Lo Marcoleta	O'Higgins / Lo Ovalle	Sí
25-3	Bus	O'Higgins / Lo Marcoleta	O'Higgins / Lo Ovalle	Sí
25-51	Bus	O'Higgins / Lo Marcoleta	O'Higgins / Las Torres	Sí
26-3	Bus	La Estrella / Laguna Sur	La Estrella / Laguna Sur	No
27-3	Bus	Reina de Chile / Marques de Montepio	Reina de Chile / Lircay	Sí
28-25	Bus	Independencia / Hipodromo	Independencia / Hipodromo	No
29-3	Bus	Las Naciones / Portales	Las Naciones / Portales	No
31-32	Bus	Luis Infante Cerda / Las Rejas Sur	Las Rejas Sur / Mailef	Sí
32-31	Bus	Independencia / Santos Dummont	Independencia / Santos Dummont	No
3-25	Bus	Agustinas / Bandera	Santo Domingo / Puente	Sí
32-58	Bus	Independencia / Santos Dummont	Independencia / Santos Dummont	No

PAR OD	PRIMER MODO	ORIGEN	PRIMER PARADERO	¿HAY CAMINATA?
3-27	Bus	Agustinas / Bandera	Agustinas / Mac Iver	Sí
3-29	Bus	Agustinas / Bandera	Alameda / Ahumada	Sí
34-39	Bus	Estoril / Las Condes	Estoril / Las Condes	No
3-61	Bus	Agustinas / Bandera	Agustinas / Bandera	No
3-64	Bus	Agustinas / Bandera	Arturo Prat / Alameda	Sí
36-46	Bus	Maule / Portugal	Maule / V. Mackenna	Sí
36-54	Bus	Maule / Portugal	Maule / V. Mackenna	Sí
39-34	Bus	1° Transversal / 4 Alamos	A. Llona / R. Ayala	Sí
42-47	Bus	Cerro 18 / Los Quincheros	Cerro 18 / Los Quincheros	No
4-3	Bus	Gabriela / Ejercito Libertador	Gabriela / Ejercito Libertador	No
46-36	Bus	Quilin / Ramon Cruz	Quilin / El Libano	Sí
47-42	Bus	Padre Hurtado / Vitacura	Padre Hurtado / Vitacura	No
49-50	Bus	Padre Hurtado / Camino El Alba	Padre Hurtado / Camino El Alba	No
51-25	Bus	Santa Maria / Del Arzobispo	E. Yañez / Providencia	Sí
52-53	Bus	Carlos Peña Otaegui / Vital Apoquindo	Carlos Peña Otaegui / Vital Apoquindo	No
53-52	Bus	Padre Hurtado / Pdte. Kennedy	Padre Hurtado / Mardoñal	Sí
53-9	Bus	Padre Hurtado / Pdte. Kennedy	Padre Hurtado / Mardoñal	Sí
54-36	Bus	Quilin / El Libano	Quilin / El Libano	No
5-6	Bus	Luis Matte / Nonato Coo	Luis Matte / Nonato Coo	No
56-57	Bus	Av. Central / Pajaritos	Centenario / Pajaritos	Sí
56-65	Bus	Av. Central / Pajaritos	Av. Central / Pajaritos	No
57-56	Bus	Vicente Reyes / Portales	A. Llona / R. Ayala	Sí
58-32	Bus	Manuel Rodriguez / Arturo Prat	Manuel Rodriguez / Arturo Prat	No
59-60	Bus	Merced / San Antonio	San Antonio / Mac Iver	No
60-59	Bus	Tte. Cruz / J.J. Perez	Tte. Cruz / J.J. Perez	No
61-3	Bus	Huechuraba / Granada	Veracruz / Independencia	Sí

PAR OD	PRIMER MODO	ORIGEN	PRIMER PARADERO	¿HAY CAMINATA?
62-63	Bus	Benito Rebolledo / Marathon	Benito Rebolledo / Exequiel Fernandez	Sí
63-62	Bus	Eduardo Castillo Velasco / Exequiel Fernandez	Eduardo Castillo Velasco / Pedro de Valdivia	Sí
64-3	Bus	Irrrazaval / Brown Norte	Irrrazaval / J. Washinton	Sí
6-5	Bus	Camino Las Flores / Camino La Fuente	Camino Las Flores / Otoñal	Sí
65-56	Bus	Vicente Reyes / 4 Alamos	Pajaritos / Ricardo Ayala	Sí
7-10	Bus	Rojas Magallanes / Tobalaba	Rojas Magallanes / Tobalaba	No
8-9	Bus	Tobalaba / Departamental	Tobalaba / Departamental	No
9-53	Bus	La Quebrada / Vital Apoquindo	Carlos Peña Otaegui / Vital Apoquindo	Sí
9-8	Bus	La Quebrada / Vital Apoquindo	La Quebrada / Vital Apoquindo	No
10-7	Metro	Plaza Italia	Baquedano	Sí
3-4	Metro	Agustinas / Bandera	Plaza de Armas	Sí
18-13	Metro	El Golf / Apoquindo	El Golf	Sí
3-23	Metro	Agustinas / Bandera	Moneda	Sí
21-24	Metro	Capitan Prat / San Juan	San Joaquin	Sí
50-49	Metro	Agustinas / Ricardo Cumming	Republica	Sí
3-26	Metro	Agustinas / Bandera	Moneda	Sí

Tabla 20: Pares OD con y sin caminata de acceso, base de datos BD2: TERMÓMETRO

PAR OD	Nº ETAPAS	Nº TBD	MODO	ID PAR OD-TBD	PUNTO INICIO CAMINATA TBD	PUNTO FIN CAMINATA TBD	¿TIENE CAMINATA?
10-7	3	2	Metro	10-7-1	Vicente Valdes	Vicente Valdes	Sí
10-7	3	2	Bus	10-7-2	Trinidad	Santa Amalia / Vicuña Mackenna	Sí
11-12	3	2	Metro	11-12-1	Escuela Militar	Escuela Militar	No
11-12	3	2	Bus	11-12-2	Las Rejas	Las Rejas	No
1-2	4	3	Bus	1-2-1	Las Condes / San Francisco	Las Condes / San Francisco	No
1-2	4	3	Metro	1-2-2	Apoquindo / Tobalaba	Tobalaba	Sí
1-2	4	3	Bus	1-2-3	Trinidad	San Jose De La Estrella / Vicuña Mackenna	Sí
12-11	3	2	Metro	12-11-1	Las Rejas	Las Rejas	No
12-11	3	2	Bus	12-11-2	Escuela Militar	Escuela Militar	No
13-18	2	1	Metro	13-18-1	Las Rejas / Alameda	Las Rejas	Sí
14-15	2	1	Bus	14-15-1	Mapocho	Bandera / Gral. Mackenna	Sí
15-14	2	1	Bus	15-14-1	Mapocho	Cal Y Canto	Sí
16-17	2	1	Bus	16-17-1	San Alberto Hurtado	San Alberto Hurtado	No
17-16	2	1	Bus	17-16-1	San Alberto Hurtado	San Alberto Hurtado	No
18-13	2	1	Bus	18-13-1	Las Rejas	Las Rejas / Alameda	Sí
19-22	2	1	Bus	19-22-1	Peru / Rojas Magallanes	Peru / Rojas Magallanes	No
2-1	4	3	Metro	2-1-1	San Jose De La Estrella / Vicuña Mackenna	Trinidad	Sí
2-1	4	3	Bus	2-1-2	Tobalaba	Apoquindo / Tobalaba	Sí
2-1	4	3	Bus	2-1-3	Las Condes / San Francisco	Las Condes / San Francisco	No
21-24	2	1	Bus	21-24-1	Vicente Valdes	Vicente Valdes	Sí
22-19	2	1	Bus	22-19-1	Peru / Rojas Magallanes	Peru / Rojas Magallanes	No
23-3	2	1	Metro	23-3-1	G. Alderete / Vicuña Mackenna	Vicente Valdes	Sí
24-21	2	1	Metro	24-21-1	Vicente	Vicente	Sí

PAR OD	Nº ETAPAS	Nº TBD	MODO	ID PAR OD-TBD	PUNTO INICIO CAMINATA TBD	PUNTO FIN CAMINATA TBD	¿TIENE CAMINATA?
					Valdes	Valdes	
25-28	2	1	Bus	25-28-1	Independencia / Card. Caro	Independencia / Card. Caro	No
25-3	2	1	Bus	25-3-1	Del Surco / Matta	Del Surco / Matta	No
25-51	2	1	Bus	25-51-1	Corvalan / Alameda	Corvalan / Alameda	No
26-3	2	1	Metro	26-3-1	Gral. Bonilla	Pajaritos	Sí
27-3	2	1	Bus	27-3-1	Recoleta / Lircay	Recoleta / Einstein	Sí
28-25	2	1	Bus	28-25-1	Independencia / Card. Caro	Independencia / Card. Caro	No
31-32	2	1	Bus	31-32-1	Jaime Guzman	Santa Maria / Plaza	Sí
3-23	2	1	Bus	3-23-1	Vicente Valdes	Don Pepe / Vicuña Mackenna	Sí
32-31	2	1	Bus	32-31-1	Plaza Renca	Jaime Guzman	Sí
3-25	2	1	Bus	3-25-1	Del Surco / Matta	Del Surco / Matta	No
3-26	2	1	Bus	3-26-1	Pajaritos	Felix Bonilla	Sí
3-27	2	1	Bus	3-27-1	Recoleta / Lircay	Recoleta / Einstein	Sí
3-4	3	2	Metro	3-4-1	Vicente Valdes	Vicente Valdes	Sí
3-4	3	2	Bus	3-4-2	Sotero Del Rio	Sotero Del Rio	No
34-39	2	1	Bus	34-39-1	Noruega / Apoquindo	Noruega / Apoquindo	No
36-46	2	1	Bus	36-46-1	Agricola/Vicuña Mackenna	Agricola/Vicuña Mackenna	No
36-54	2	1	Bus	36-54-1	Esc. Agricola / Vicuña Mackenna	Esc. Agricola / Vicuña Mackenna	No
39-34	2	1	Bus	39-34-1	Apoquindo / Dell Orto	Apoquindo / Dell Orto	No
42-47	2	1	Bus	42-47-1	Padre Hurtado / Las Condes	Padre Hurtado / Oxford	Sí
4-3	3	2	Metro	4-3-1	Sotero Del Rio	Sotero Del Rio	No
4-3	3	2	Metro	4-3-2	Vicente Valdes	Vicente Valdes	Sí
46-36	2	1	Bus	46-36-1	Agricola/Vicuña Mackenna	Agricola/Vicuña Mackenna	No
47-42	2	1	Bus	47-42-1	Las Condes / Padre Hurtado	Las Condes / Padre Hurtado	No

PAR OD	Nº ETAPAS	Nº TBD	MODO	ID PAR OD-TBD	PUNTO INICIO CAMINATA TBD	PUNTO FIN CAMINATA TBD	¿TIENE CAMINATA?
49-50	2	1	Metro	49-50-1	Escuela Militar	Escuela Militar	No
50-49	2	1	Bus	50-49-1	Escuela Militar	Escuela Militar	No
51-25	2	1	Bus	51-25-1	I. Morales / Alameda	Vicuña Mackenna / Alameda	Sí
52-53	2	1	Bus	52-53-1	R Guadiana / Padre Hurtado	R Guadiana / Padre Hurtado	No
53-52	2	1	Bus	53-52-1	R Guadiana / Padre Hurtado	R Guadiana / Padre Hurtado	No
53-9	2	1	Bus	53-9-1	Padre Hurtado / R. Guadiana	Padre Hurtado / R. Guadiana	No
54-36	2	1	Bus	54-36-1	Vicuña Mackenna / Esc. Agricola	Vicuña Mackenna / Esc. Agricola	No
5-6	4	3	Metro	5-6-1	Las Mercedes	Las Mercedes	No
5-6	4	3	Metro	5-6-2	Tobalaba	Tobalaba	Sí
5-6	4	3	Bus	5-6-3	Escuela Militar	Escuela Militar	No
6-5	4	3	Metro	6-5-1	Escuela Militar	Escuela Militar	No
6-5	4	3	Metro	6-5-2	Tobalaba	Tobalaba	Sí
6-5	4	3	Bus	6-5-3	Las Mercedes	Las Mercedes	No
7-10	3	2	Metro	7-10-1	Santa Amalia / Vicuña Mackenna	Trinidad	Sí
7-10	3	2	Metro	7-10-2	Vicente Valdes	Vicente Valdes	Sí
8-9	3	2	Bus	8-9-1	Los Presidentes / Tobalaba	Los Presidentes / Tobalaba	No
8-9	3	2	Bus	8-9-2	Colon / A. Vespucio Padre	Colon / A. Vespucio Padre	No
9-53	2	1	Bus	9-53-1	Hurtado / R. Guadiana	Hurtado / R. Guadiana	No
9-8	3	2	Bus	9-8-1	Colon / A. Vespucio	Colon / A. Vespucio	No
9-8	3	2	Bus	9-8-2	Los Presidentes / Tobalaba	Los Presidentes / Tobalaba	No

Tabla 21: Pares OD con y sin caminata de trasbordo, base de datos BD2: TERMÓMETRO