



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

¿DE QUÉ FACTORES DEPENDE LA EVOLUCIÓN DE LA REGULARIDAD DE LOS INTERVALOS DE UN SERVICIO DE BUSES? CASO TRANSANTIAGO

CONSTANZA VERÓNICA DANES DAETZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN CARLOS MUÑOZ ABOGABIR

Santiago de Chile, Octubre, 2016

© 2016, Constanza Danes D.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

¿DE QUÉ FACTORES DEPENDE LA EVOLUCIÓN DE LA REGULARIDAD DE LOS INTERVALOS DE UN SERVICIO DE BUSES? CASO TRANSANTIAGO

CONSTANZA VERÓNICA DANES DAETZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN CARLOS MUÑOZ ABOGABIR

FELIPE DELGADO BREINBAUER

CRISTIAN ANGELO GUEVARA

LUCIANO CHIANG SÁNCHEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Octubre, 2016

A todos los que creímos que este día
nunca llegaría.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer al profesor Juan Carlos Muñoz, por toda la paciencia, disponibilidad y apoyo durante el desarrollo de la investigación. Fue un periodo largo pero provechoso.

Agradezco también al profesor Angelo Guevara, integrante de la Comisión, por su disposición a ayudar y por su aporte a este trabajo.

Además quiero dar las gracias a todos los que pusieron su granito de arena para poder salir adelante: Christian Villalobos, César Nuñez, Elkin Reinel Ruiz y Maximiliano Riffo.

Doy gracias al Directorio de Transporte Público Metropolitano por facilitar la información utilizada en esta investigación, y a CONICYT por el financiamiento de la misma mediante el FONDECYT.

Por último, y no menos importante, a mi familia y amigos. Por siempre estar ahí cuando necesitaba motivación y por presionarme a dar lo mejor de mí siempre.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contenidos del estudio	7
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Metodología para el cálculo del coeficiente de variación	8
2.2. Regularidad de un sistema de transporte público	11
2.3. Medidas para mejorar la operación de un sistema de transporte público	17
3. GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	20
3.1. Descripción y definiciones del sistema	20
3.1.1. Indicadores de desempeño	26
3.1.2. Información observada.....	28
3.2. Generación de la variable dependiente.....	31
3.3. Generación de variables independientes	34
3.3.1. Detenciones por intersecciones y congestión	34
3.3.2. Infraestructura	36
3.3.3. Distancia entre paraderos	37
3.3.4. Operador	37
3.3.5. Zonas de prepago	38
3.3.6. Demanda	39
3.3.7. Frecuencia programada	40
3.3.8. Día de la semana	40
3.4. Análisis de la base de datos	41

3.4.1. Programación computacional.....	44
4. MODELACIÓN.....	46
4.1. Modelación del CV(h) de un paradero	46
4.2. Modelación de la diferencia entre los CV(h) de dos paraderos	48
4.2.1. Modelación del efecto en el paradero siguiente.....	49
4.2.2. Modelo del efecto en un paradero no consecutivo.....	50
5. ESTIMACIÓN DE MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
5.1. Modelo 0: coeficiente de variación	51
5.2. Modelo 1: diferencia con paradero anterior	55
5.3. Modelo 2: diferencia con paradero menos 15	59
5.4. Modelo 3: diferencia con paradero menos 25	63
5.5. Análisis de resultados.....	66
5.5.1. Efecto de cambios en el sistema	71
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
6.1. Conclusiones y recomendaciones prácticas	74
6.2. Conclusiones y recomendaciones metodológicas	80
BIBLIOGRAFIA.....	83
A N E X O S.....	87
ANEXO A: INFORME DE GESTIÓN	88
ANEXO B: SERVICIO OBJETIVO.....	92
ANEXO C: DEPURACIÓN DE SERVICIOS	93
ANEXO D: GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS	97
ANEXO E: CORRECCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN.....	102
ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	103

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1: Parámetros para la selección de recorridos.....	43
Tabla 5-1: Resultados modelo 0.....	54
Tabla 5-2: Test de autocorrelación modelo 0.....	54
Tabla 5-3: Resultados modelo 1.....	56
Tabla 5-4: Test de autocorrelación modelo 1.....	56
Tabla 5-5: Resultados modelo 2.....	61
Tabla 5-6: Test de autocorrelación modelo 2.....	61
Tabla 5-7: Resultados modelo 3.....	64
Tabla 5-8: Test de autocorrelación modelo 3.....	64
Tabla 5-9: Resumen de resultados	68
Tabla F-1: Análisis datos modelo 0	103
Tabla F-2: Análisis datos modelo 1	103
Tabla F-3: Matriz de correlación modelo 1.....	104
Tabla F-4: Análisis datos modelo 2	104
Tabla F-5: Matriz correlación modelo 2	105
Tabla F-6: Análisis datos modelo 3	105
Tabla F-7: Matriz correlación modelo 3	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Composición del tiempo promedio de viaje en Latinoamérica.....	1
Figura 1-2: Tiempo promedio de espera en Latinoamérica	4
Figura 1-3: Distribución del tiempo de espera y variabilidad individual en Santiago.....	4
Figura 2-1: Varianza del intervalo a lo largo de la ruta	11
Figura 2-2: Proporción del tiempo de espera como función de la distancia recorrida.....	17
Figura 3-1: Operadores Transantiago.....	21
Figura 3-2: Mapa con vías exclusivas (rojo), corredores segregados (verde) y pista solo bus (naranja).....	22
Figura 3-3: Participación por Unidad de Negocio	23
Figura 3-4: Mapa Zonas Pagas.....	24
Figura 3-5: Porcentaje de evasión en el pago del pasaje en bus 2007-2014.....	25
Figura 3-6: Índice cumplimiento regularidad (trimestral oct-dic 2012)	27
Figura 3-7: Evolución del CV(h) entre dos paraderos consecutivos	33
Figura 3-8: Evolución de la irregularidad respecto a la distancia recorrida desde el origen del servicio	39
Figura 3-9: Trayectoria servicio C17I (12-oct-2012).....	42
Figura 3-10: Trayectoria servicio D07cI (18-oct-2012).....	43
Figura 5-1: Distribución CV Modelo 0.....	52
Figura 5-2: Comparación variable dependiente	67
Figura A-1: Transacciones por Unidad de Negocio (2012).....	88

Figura A-2: Transacciones en buses por mes y usuario (2010-2012).....	88
Figura A-3: Índice cumplimiento frecuencia histórico	89
Figura A-4: Índice cumplimiento regularidad histórico.....	89
Figura A-5: Indicador ICF (trimestral oct–dic 2012).....	90
Figura A-6: Porcentajes cumplimiento frecuencia (oct–dic 2012)	90
Figura A-7: Porcentajes cumplimiento regularidad (oct–dic 2012).....	91
Figura A-8: Servicios por empresas 2012	91
Figura B-1: Trayectoria servicio C16I (18-oct-2012).....	92
Figura B-2: CV(h) servicio C16I (18-oct-2012)	92
Figura C-1: Depuración de servicios (paso 1).....	94
Figura C-2: Depuración de servicios (paso 2).....	95
Figura C-3: Depuración de servicios (paso 3).....	96
Figura C-4: Depuración de servicios (paso 4).....	96
Figura D-1: Trayectorias (distancia-tiempo).....	97
Figura D-2: Cálculo variable dependiente	98
Figura D-3: Cálculo velocidad promedio y su desviación estándar.....	99
Figura D-4: Cálculo tasas de demanda.....	99
Figura D-5: Resumen información por paradero	100
Figura D-6: Trayectorias y <i>dwell time</i>	101
Figura D-7: Asignación de factores incidentes en la variable dependiente	101
Figura E-1: Corrección de la autocorrelación	102

RESUMEN

El transporte público juega un rol fundamental en la vida de las personas, siendo un medio necesario para su movilización dentro de una ciudad. Normalmente al planificar un viaje, los usuarios consideran un tiempo promedio de acceso (caminata) y en vehículo (sobre el bus), pero el verdadero desafío está en estimar el tiempo de espera en el paradero. En Santiago de Chile el sistema de buses del transporte público (Transantiago) ofrece un servicio bastante irregular, en el que los pasajeros enfrentan un exceso de tiempo de espera mayor al 33% (OdT, 2014), impactando negativamente la confiabilidad del tiempo de viaje y la satisfacción del usuario. Esto conlleva además implicancias en la eficiencia operacional y políticas públicas. Este estudio pretende contribuir al entendimiento de los factores que afectan la regularidad de un sistema de transporte público, analizando el caso de Transantiago mediante la calibración de modelos econométricos. En cuanto a los resultados obtenidos, se observó que perturbaciones sufridas por un bus generan el mayor impacto en la regularidad del mismo servicio aguas abajo, lo que releva la importancia de un despacho regular. La variabilidad de la congestión y las detenciones no programadas, representadas por la velocidad promedio y su desviación estándar respectivamente, también mostraron una gran influencia. Las variables relacionadas a infraestructura especial, como corredores segregados y zonas pagas, mostraron un impacto positivo en la regularidad del sistema, aunque bajo nivel de significancia. Por ejemplo la implementación de un corredor y un consecuente aumento de la velocidad comercial de 8 km/hr a 20km/hr pueden significar una disminución del 56% del exceso del tiempo de espera a lo largo de un recorrido. Otros factores que empeoran la regularidad son una alta demanda de pasajeros, mayor distancia entre paraderos y mayor frecuencia. Estos resultados son consistentes con los encontrados en la literatura, y a partir de ellos se presentan recomendaciones para el diseño de los recorridos de un sistema de transporte público.

Palabras Claves: Regularidad, Intervalo, Transporte Público, Confiabilidad, Transantiago, Coeficiente de Variación

ABSTRACT

Public transport plays an important role in people's lives, being a necessary mean for people to commute within a city. Usually when the users plan their trip, the time spent walking and on the vehicle are taken into consideration, but the real challenge arise when estimating the time spent waiting at the bus stop. In Santiago, Chile, the bus system for public transport (Transantiago) offers a highly irregular service, in which passengers face an excessive waiting time superior to 33% (OdT, 2014), having a seriously negative impact on the systems reliability and user satisfaction. This also implies matters of operational efficiency and public policies. This study aims to help understand the different factors that take a role in affecting the proper functioning or regularity of a public transport system, analyzing the Transantiago case through the calibration of econometric models. As to the obtained results, it was observed that the disturbances suffered by a bus generate an even greater impact in its performance downstream, which reveals the importance of a steady and regular service. Congestion and unscheduled stops, represented by the average speed and its standard deviations respectively, have also shown great influence in the results. The variables related to special infrastructure, such as segregated corridors and prepaid zones, showed a positive impact on the systems regularity, though with very low level of significance. For example, implementing a segregated corridor with a subsequent raise in the commercial speed from 8 km/hr to 20 km/hr can reduce the increase of the waiting time along the route by 56%. Further factors that worsen the systems regularity are a high demand for the service, longer distances between scheduled stops and a high frequency. These results, from which recommendations are presented for the design of routes for a public transport system, are consistent with the ones found in other studies.

Keywords: Regularity, Headway, Public Transport, Reliability, Transantiago, Coefficient of Variation

1. INTRODUCCIÓN

El transporte público juega un rol fundamental en la ciudad, siendo una herramienta esencial para que las personas se puedan movilizar en ella. Sus alcances impactan en la mayoría de los aspectos cotidianos de quienes transitan diariamente por las calles, influyendo tanto en la calidad de vida de las personas como en la sustentabilidad de una ciudad. En Latinoamérica el tiempo promedio de viaje en punta mañana fluctúa entre los 45 y 90 minutos (ver Figura 1-1), lo que significa que dos horas diarias en promedio son utilizadas solo en movilización. Esto tiene gran implicancia en la productividad de un país, considerando la utilización eficiente del tiempo como un factor importante en ella, y por ende en el desarrollo político del mismo.

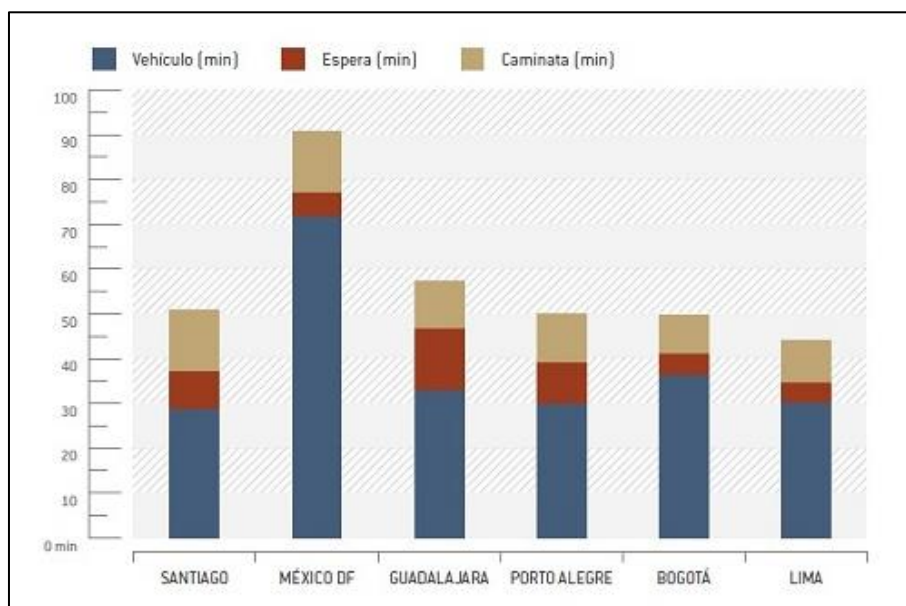


Figura 1-1: Composición del tiempo promedio de viaje en Latinoamérica
Fuente: Muñoz et al. (2016)

En la experiencia del usuario de transporte público influyen muchos factores, como los tiempos de viaje, espera y acceso, comodidad, confiabilidad, entre otros. Los sistemas modernos han puesto el foco en la velocidad, pues ésta no sólo afecta la rapidez de viaje, sino también impacta el tiempo de ciclo de los servicios, y con ello la frecuencia (determinante para el tiempo de espera) y capacidad (comodidad de los pasajeros). Un ejemplo de esto son los servicios BRT (*Bus Rapid Transit* en inglés), que ponen énfasis en la R de rápido para el diseño de este sistema.

Sin embargo, hoy se aboga por una segunda R: *Reliability* (confiabilidad en inglés) (Delgado et al., 2016). Si los intervalos entre buses son regulares no sólo se logra mayor confiabilidad en los tiempos de viaje, sino que se reduce el tiempo de espera promedio, se aumenta el confort promedio y la confiabilidad en el nivel de confort (el confort ofrecido es más homogéneo, lo que no sucede cuando un bus viene a capacidad y el siguiente viene vacío). Daskalakis y Stathopoulos (2008) concluyen que la percepción del tiempo de espera promedio y su varianza determinan la evaluación de la confiabilidad de un servicio, y por lo tanto afecta directamente en la satisfacción del usuario respecto al modo de viaje. Así, los sistemas de buses que aspiran a proveer un nivel de servicio como metro deben focalizarse también en la regularidad de los intervalos.

La regularidad es especialmente importante en los sistemas que operan sin horarios preestablecidos. Existe evidencia que en estos casos la irregularidad de los intervalos crece a medida que se avanza en el recorrido (Johnson et al., 2015), y se ha trabajado en

desarrollar sistemas que mejoren la regularidad de los sistemas de transporte público. No obstante, los factores que influyen en la evolución de la regularidad de los intervalos ha sido un tema muy poco abordado hasta el momento.

Esta tesis pretende contribuir al conocimiento sobre los factores que influyen en la evolución de la regularidad de los intervalos entre buses de un sistema de transporte público. El objetivo de esta investigación consiste en desarrollar un modelo regresivo que explique la relación entre la variabilidad de los intervalos de buses (regularidad) y los factores que la afectan, y de esta forma generar un sustento que oriente posibles recomendaciones de mejoras a la regularidad del servicio ofrecido.

Para estudiar la regularidad de un sistema tomaremos el ejemplo de Transantiago, actual sistema de transporte público de Santiago, el cual cuenta con muy pocos servicios con horarios de pasadas, por lo que la regularidad de los intervalos entre buses consecutivos es de gran interés. Esta regularidad afecta el tiempo de espera de los pasajeros, el cual es presentado por Muñoz et al. (2016). Podemos ver que el tiempo de espera en Santiago no solo es alto, sino que la desviación estándar del tiempo promedio de espera es casi el doble para viajes de más de 25 kilómetros, por lo que es urgente analizar la fuente de esta variabilidad.

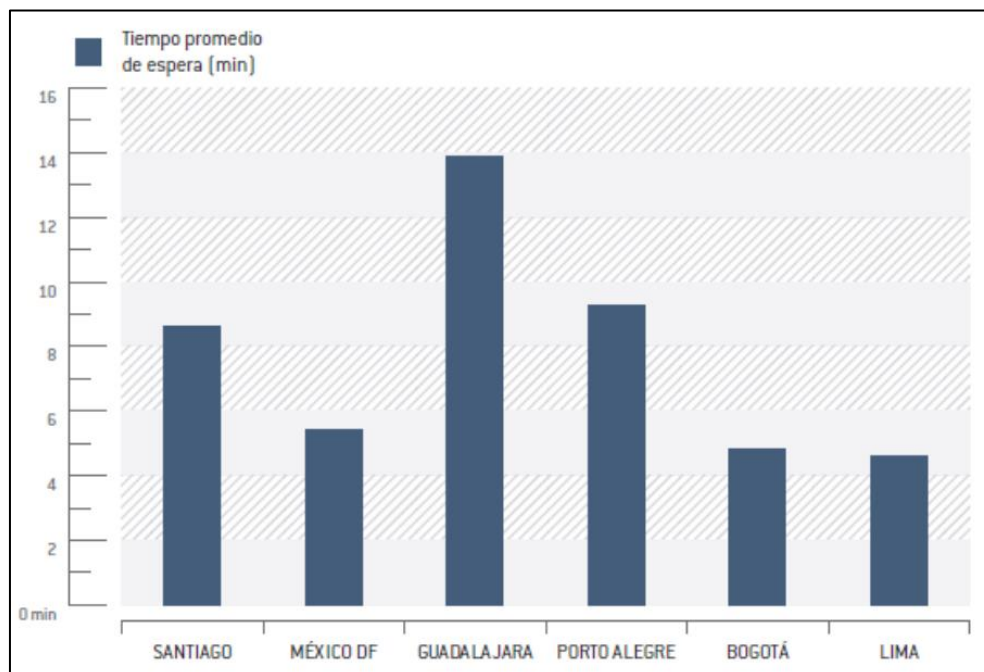


Figura 1-2: Tiempo promedio de espera en Latinoamérica
Fuente: Muñoz et al. (2016)

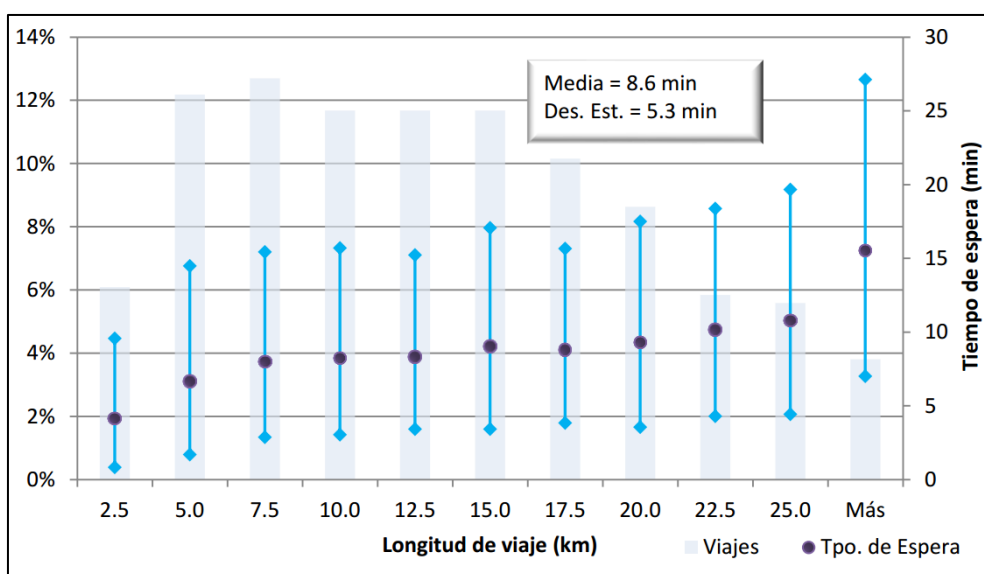


Figura 1-3: Distribución del tiempo de espera y variabilidad individual en Santiago
Fuente: Muñoz et al. (2016)

Desde los inicios de Transantiago los distintos gobiernos han tratado de mejorar la calidad del servicio ofrecido, pero la regularidad sigue sin mostrar mejoras sustanciales. A pesar de que se han incluido incentivos a la regularidad mediante indicadores de desempeño en los contratos con las empresas que operan los recorridos, el resultado no ha sido exitoso (Beltrán et al., 2013). Debido a que todos los buses de Transantiago cuentan con un GPS que emite una señal de posicionamiento cada 30 segundos, el sistema genera información de gran valor para el estudio que se realiza en esta tesis.

Para la realización del modelo regresivo fue necesario obtener información medible de los factores que afectan en la regularidad, la cual proviene de distintas fuentes y en distintos formatos.

En esta investigación se analizó una semana normal (sin marchas o manifestaciones que ocasionen cortes en las vías principales, problemas climáticos o cortes severos en el sistema de metro), para poder comparar el comportamiento del sistema entre los distintos días de la semana. Esto permite esperar un comportamiento similar de la evolución de la regularidad de los intervalos entre los distintos días de esta semana. Se consideraron únicamente los recorridos de Transantiago que no presenten interrupciones puntuales (cortes por ciclovías, ferias, etc.), y que no utilicen las autopistas. Se estudió sólo la hora punta mañana (de 6:30 a 8:30 am), ya que es una ventana de tiempo suficientemente amplia en que los operadores enfrentan distintos tipos de condiciones operacionales y en que la frecuencia exigida por Transantiago es constante. En este periodo se observa una densidad amplia de frecuencias entre distintos servicios, desde

un bus cada 2 minutos a un bus cada 15 minutos. Se investigaron distintos tipos de variables que podrían afectar la regularidad de un servicio, pero para efectos del modelo solo se consideraron las que sean medibles. Para determinar la regularidad de un servicio en un momento y lugar determinado se calculó el coeficiente de variación (CV) de los intervalos entre buses de un mismo servicio en un mismo paradero para un mismo día. Este coeficiente está directamente relacionado con el tiempo de espera promedio que sufren los usuarios de acuerdo a la ecuación presentada por Welding (1957), Holroyd and Scraggs (1966) y Osuna and Newell (1972). Por esta razón, el coeficiente de variación se utilizará como variable dependiente del modelo regresivo. El modelo regresivo a estimar es lineal, y se calibró mediante mínimos cuadrados ordinarios.

A partir de un análisis bibliográfico y visitas a terreno se determinaron los factores que podrían generar una mayor influencia en la regularidad de un servicio. Las variables consideradas son: detenciones por intersecciones y/o congestión, tipo de infraestructura en el corredor de buses, distancia entre paraderos, empresa operadora, niveles de demanda, presencia de zona paga, día de la semana y frecuencia programada.

Una vez obtenida la relación entre la evolución de la regularidad de un servicio y los factores que la afectan, y luego de analizar los resultados obtenidos, el resultado del modelo permitirá orientar decisiones que debieran generar mejoras en la regularidad de un servicio de buses. Así se derivarán recomendaciones para el diseño de futuros recorridos.

Un gran desafío para esta investigación es la recolección de la información necesaria, ya que existen diversas fuentes, cada una con distinta metodología para el cálculo y la estimación de la información final. Una vez lograda la consolidación de la información se debe depurar rigurosamente la base de datos generada, ya que puede haber errores de especificación o medición.

1.1. Contenidos del estudio

A continuación se presentan los distintos capítulos de esta investigación. En el capítulo 2 se expone la revisión bibliográfica que sustenta este estudio, presentando la metodología utilizada para la definición de la variable a explicar, y presentando otras investigaciones relacionadas con la regularidad de un sistema de transporte público y que ofrezcan recomendaciones para mejorar su operación. En el capítulo 3 se describe la información utilizada para calibrar los modelos econométricos que permitirán alcanzar los objetivos de esta tesis, mientras que en el capítulo 4 se presenta la formulación de los modelos econométricos que serán calibrados. Los resultados de estos modelos son analizados en el capítulo 5, para finalmente exponer en el capítulo 6 las conclusiones de esta tesis y las recomendaciones para el diseño de futuros servicios de buses.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo tiene como objetivo realizar una revisión de las contribuciones disponibles en la literatura relacionadas con los diferentes tópicos atinentes a esta investigación. Primero se expone el cálculo utilizado para medir el tiempo promedio de espera en un servicio de transporte público. Este indicador compone la base de la variable dependiente que usaremos en nuestro estudio econométrico. Luego se describe la experiencia internacional y nacional reportada en la literatura acerca de la regularidad del transporte público. Finalmente se exponen recomendaciones hechas para Transantiago a partir de otros estudios similares a éste.

2.1. Metodología para el cálculo del coeficiente de variación

La regularidad de intervalos con que los buses de un servicio sin horario visitan una parada afecta el tiempo de espera de los pasajeros que esperan allí. Asumiendo que la llegada de pasajeros a la parada distribuye uniformemente en un periodo suficientemente largo y que los buses no presentan problemas de capacidad y que la llegada de los buses a los paraderos es perfectamente regular (todos los intervalos son idénticos), entonces el tiempo de espera esperado corresponde a la mitad del intervalo entre buses consecutivos. Sin embargo, si la llegada de los buses es irregular, es decir, existe variabilidad entre los intervalos entre buses consecutivos, la esperanza del tiempo de espera crece, pues los usuarios tienen más posibilidad de llegar al paradero durante los intervalos largos que durante los cortos. En este caso la esperanza del tiempo de espera de un usuario se puede expresar como la suma del tiempo de espera mínimo (si todos los intervalos entre buses

fuesen perfectamente regulares) y del denominado exceso de tiempo de espera que surge debido a la irregularidad de los intervalos. Se puede mostrar que la esperanza del tiempo de espera corresponde a

$$E(W) = \frac{1}{2}E(h) + \frac{1}{2}\frac{V(h)}{E(h)} = \frac{E(h)}{2}\left(1 + \frac{V(h)}{E(h)^2}\right) = \frac{E(h)}{2}(1 + CV(h)^2) \quad (2-1)$$

donde $E(W)$ es la esperanza del tiempo de espera, $E(h)$ ¹ es el promedio de los intervalos entre buses consecutivos, $V(h)$ es la varianza de la distribución de los intervalos y $CV(h)$ es el coeficiente de variación de los intervalos. Como se aprecia el primer término de (2-1) corresponde a la mitad del intervalo promedio mientras el segundo (llamado “exceso de tiempo de espera”) depende de la varianza de los intervalos. Welding (1957), Holroyd and Scraggs (1966) y Osuna and Newell (1972) presentaron esta ecuación para demostrar que el tiempo de espera esperado aumenta cuando la llegada de buses es irregular.

Distintos servicios tendrán distintos $E(h)$ y $V(h)$ dependiendo del paradero y el periodo de operación en que se mida. Si en el periodo de operación se ofrece una frecuencia promedio estable, es razonable esperar una correlación negativa entre intervalos consecutivos, es decir, que luego de un intervalo pequeño es más probable que siga uno grande. Adicionalmente, si el periodo analizado es demasiado pequeño se puede obtener una visión distorsionada de la variabilidad de los intervalos. Por ejemplo, si en un

¹ Se utiliza la letra h por la palabra *headway*, que significa intervalo en inglés

periodo pequeño solo se observa el paso de buses apilados (efecto denominado *bus bunching*), la varianza medida de sus intervalos $V(h)$ podría ser cercana a cero ignorando que a continuación del pelotón de buses seguramente seguirá un intervalo significativamente largo. Si bien es posible capturar la variabilidad de los intervalos a través de $V(h)$, como fue presentado por Lee et al. (2012) en la Figura 2-1, este valor por sí solo no refleja la magnitud del problema, pues una misma varianza sería mucho más grande en un contexto de alta frecuencia que de baja frecuencia. Por este motivo, si se pretende medir el impacto de la irregularidad en el tiempo de espera con un único indicador que permita comparar servicios de alta y baja frecuencia, parece más adecuado usar el coeficiente de variación de los intervalos ($CV(h)$), esto es

$$CV(h) = \frac{\sqrt{V(h)}}{E(h)} = \frac{DE(h)}{E(h)} \quad (2-2)$$

donde $DE(h)$ es la desviación estándar de la distribución de los intervalos entre buses consecutivos.

Tal como se muestra en la ecuación (2-1), el cuadrado del coeficiente de variación representa el factor de crecimiento del tiempo de espera producto de la irregularidad de los intervalos. Así, un modelo que pueda explicar el coeficiente de variación de los intervalos (o el cuadrado de éste) es de gran interés pues está directamente relacionado con el exceso de tiempo de espera experimentado por los usuarios.

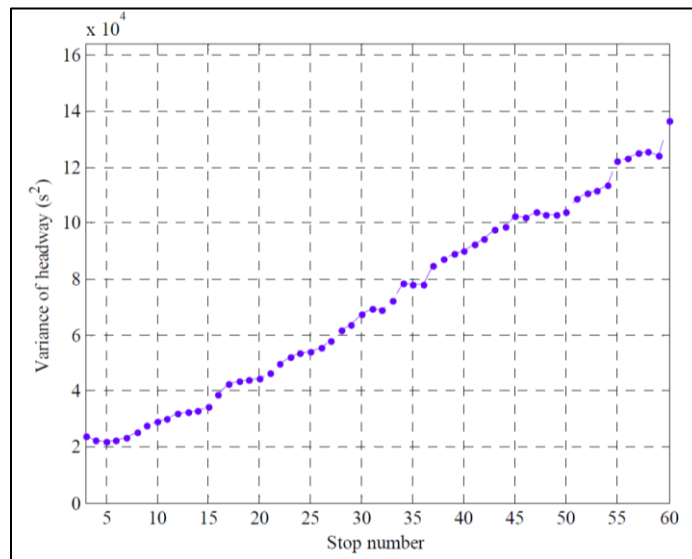


Figura 2-1: Varianza del intervalo a lo largo de la ruta
Fuente: Lee et al. (2012)

2.2. Regularidad de un sistema de transporte público

Dada la importancia de la confiabilidad de los servicios de transporte público, se han realizado varios estudios sobre este atributo en diferentes ciudades. La confiabilidad de un servicio puede referirse a la adherencia a un horario (puntualidad), o a la regularidad de sus intervalos, y en la literatura se proponen distintas mediciones para describir diferentes aspectos del servicio.

Bates (1986) presentó un análisis sobre el término puntualidad en el contexto de servicios operando bajo un horario definido. A partir de encuestas realizadas a 146 operadores de buses de Estados Unidos dedujo que no existe una clara definición de lo que se entiende por puntualidad, aunque la mayoría coincide en aceptar un rango de un minuto adelantado hasta cinco minutos de atraso como puntual.

Strathman y Hopper (1993) realizaron una evaluación empírica de las variables que afectan la puntualidad de los servicios del sistema de transporte en Portland, Oregon, mediante un modelo logit multinomial. Los autores definieron la confiabilidad del sistema mediante la puntualidad de los buses, los cuales podían llegar antes, a tiempo o después del horario establecido. A partir de los resultados del modelo concluyeron que los factores más relevantes que influyen en la puntualidad de un sistema son: si se trata del periodo punta, intervalos de despacho, el número de pasajeros subiendo y bajando, distancia recorrida desde el origen y los conductores con jornada parcial.

Una lista exhaustiva de indicadores de desempeño relacionados con la regularidad es presentada en el manual de capacidad de tránsito y calidad de servicio utilizado principalmente en Estados Unidos (*Transit Capacity and Quality of Service Manual*, TCQSM, en inglés) (Kittelsohn et al., 2003). Entre ellas se presentan mediciones para el nivel de servicio asociadas a la puntualidad y a la adherencia de los intervalos. Posteriormente, Camus et al. (2005) discuten las ventajas y limitaciones de la metodología presentada en TCQSM para estimar los niveles de servicio definidos por la confiabilidad de un servicio. Explican que a pesar de ser un método simple y fácil de usar, puede llevar a estimaciones erróneas debido a tres razones: (i) no considera la magnitud de la demora sino sólo el número de viajes que están atrasados, (ii) no captura el efecto sobre el usuario de un bus que partió antes del horario definido, y (iii) introduce un rango fijo de tolerancia para considerar que un bus está a tiempo. A raíz de esto proponen un nuevo índice de servicio llamado índice de demora ponderada (*weighted*

delay index en inglés), que considera la magnitud del atraso y su probabilidad de ocurrencia.

Otros estudios se enfocaron en la regularidad de los intervalos del servicio. Sterman y Schofer (1976) decidieron medir la regularidad de un bus como el inverso de la desviación estándar del tiempo de viaje entre dos puntos, ya que este indicador entrega una descripción general de la distribución de los tiempos. Decidieron utilizar el inverso porque buscaban un indicador que estuviera correlacionado positivamente con la calidad del servicio ofrecido por el bus. Así si el servicio ofrece una baja calidad el indicador será bajo, y viceversa.

En muchos estudios se analiza más de un indicador de regularidad para poder obtener mayor información sobre la operación de los servicios. Por ejemplo Abkowitz y Engelstein (1983) consideraron dos medidas de la regularidad: el tiempo medio de viaje en segmentos individuales y la desviación del tiempo de viaje a lo largo de la ruta (recorrido de un servicio) respecto al primer segmento de esa ruta. Estas medidas fueron seleccionadas por representar importantes características del tiempo de viaje y regularidad en la ruta respectivamente. Por otro lado, Strathman et al. (1999) definieron cuatro indicadores de regularidad. Los denominados “ratio de intervalo” y “ratio de tiempo de viaje” indican la proporción (como porcentaje) entre el valor observado y el valor programado. Para analizar la puntualidad se analizó el tiempo de atraso como la diferencia entre la hora programada y la hora real de llegada. El valor del exceso de tiempo de espera de los usuarios fue tomado de Hounsell y McLeod (1998).

Según algunos de estos estudios, los factores que más influyen en la confiabilidad del servicio son: largo del recorrido (Stermán y Schofer, 1976; Abkowitz y Engelstein, 1983, 1984), presencia de intersecciones señalizadas (Stermán y Schofer, 1976; Abkowitz y Engelstein, 1983, 1984; Strathman et al., 1999), volumen de tráfico vehicular (Stermán y Schofer, 1976), subida y bajada de pasajeros (Stermán y Schofer, 1976; Abkowitz y Engelstein, 1983, 1984; Strathman y Hopper, 1993), sentido del recorrido (ida o regreso) (Strathman et al., 1999) y periodo del día (Strathman et al., 1999).

Chen et al. (2009), en un estudio sobre la confiabilidad del transporte público de Beijing, proponen tres índices de desempeño que se describen a continuación. El índice de puntualidad basado en rutas (PIR en inglés) se define como la probabilidad de que un bus llegue al terminal dentro de un periodo determinado. El índice de desviación basado en paradas (DIS en inglés) se define como la probabilidad de que la desviación del intervalo entre dos buses sucesivos cualquiera se mantenga dentro de un rango determinado. El índice de uniformidad basado en paradas (EIS en inglés) describe cuán similares son los intervalos entre buses en cada paradero a partir del coeficiente de variación. Ellos estimaron los tres indicadores de confiabilidad a través de una encuesta, mostraron cómo se relacionan en términos de lo que miden, y analizaron sobre ellos el efecto del largo de la ruta, intervalo promedio, distancia desde el paradero al terminal de origen y el uso de vías exclusivas. De acuerdo a este estudio, un servicio se vuelve menos confiable (para los tres indicadores) a medida que el largo de la ruta aumenta. Lo

mismo sucede al aumentar la distancia entre el paradero y el terminal de origen, donde para distancias mayores a 30 kilómetros el servicio se vuelve irregular. El uso de vías exclusivas mostró efectivamente una mejora en la regularidad del servicio.

Moreira-Matias et al. (2012) determina a partir de datos de *Automatic Vehicle Location* (AVL) para la ciudad de Porto que algunos factores que afectan el apelotonamiento de buses son la desviación respecto al intervalo programado al inicio de la ruta (despacho irregular), el número de pasajeros que suben y bajan a un bus, y la frecuencia programada de los buses. Luego Man y Wenquan (2013) utilizaron datos AVL de la ciudad de Yichun para realizar modelos de simulación estocástica. De acuerdo a este estudio los factores claves que afectan la regularidad de los intervalos son las condiciones de tráfico, demanda de pasajeros y programación de los intervalos.

En un estudio más reciente, Arriagada et al. (2015) analizaron el efecto del apelotonamiento de buses en Transantiago, sistema de transporte público en Santiago. Para la medición del apelotonamiento de buses utilizaron dos indicadores, un indicador discreto que indica si dos buses están demasiado cerca uno del otro o no, y un indicador continuo basado en la variabilidad de los intervalos observados. De acuerdo a la calibración de modelos econométricos para dos servicios particulares, los factores que incrementan el apelotonamiento de buses son (importancia descendente) el largo de la ruta, frecuencia programada alta, el despacho irregular de buses, flota no homogénea, alta demanda y variabilidad, desviación de buses respecto a su recorrido normal, semáforos, mayor distancia entre paraderos, vías con vehículos estacionados. Por otro

lado, los factores que contribuyen a disminuir el apelotonamiento son (importancia descendente) presencia de vía exclusiva, presencia de corredor segregado, comportamiento homogéneo entre buses consecutivos (detenerse o no en cierto paradero), y la coordinación de semáforos.

Finalmente, Johnson et al. (2015) muestran que la irregularidad aumenta a medida que aumenta la distancia recorrida. Este aumento es más pronunciado cuando los conductores reciben un salario fijo en comparación con el caso en que los conductores reciben compensación por pasajero transportado, como se puede ver en la Figura 2-2. Este fenómeno ocurre porque, al intentar maximizar sus propias ganancias, los conductores que reciben salario de acuerdo al número de pasajeros transportados intentan mantener un intervalo lo más regular posible, ya que al acercarse al siguiente bus aguas abajo la demanda acumulada en el paradero es menor, mientras que si se acerca al bus que los precede aguas arriba éste último lo podría adelantar y tomar toda la demanda acumulada en el siguiente paradero.

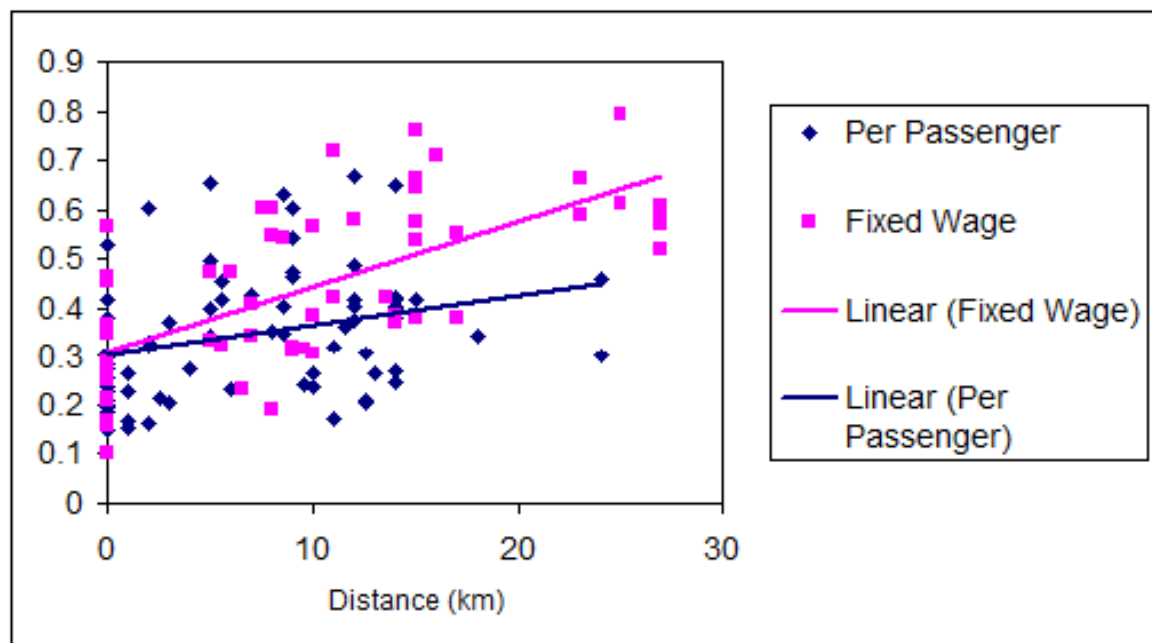


Figura 2-2: Proporción del tiempo de espera como función de la distancia recorrida
Fuente: Johnson et al. (2015)

2.3. Medidas para mejorar la operación de un sistema de transporte público

Una de las características más importantes de la operación de un servicio de transporte público es su velocidad comercial (Chen et al., 2003), que corresponde a la velocidad media de viaje entre dos puntos incluyendo todas sus detenciones. Ésta influye directamente en el tiempo de viaje al interior del bus, y por ende tiene directa relación con la variabilidad de los intervalos entre dos buses consecutivos. La importancia de la variabilidad de la regularidad de un servicio viene dada por la percepción de los usuarios, quienes 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) incluso más que por

disminuir el tiempo promedio de viaje (Asensio y Matas, 2008). Por esta razón es necesario entender bien qué causa esta variabilidad en los tiempos de viaje.

Algunos estudios (Cohen, 1984 y Gibson et al., 1989) han demostrado que las variables que tienen mayor relación con la velocidad comercial son la frecuencia y duración de las detenciones, y se sabe que los paraderos y semáforos definen la capacidad de un sistema de transporte público (Vuchic, 2005). A su vez, Fernández (1999) aborda los esquemas de prioridad al transporte público y su influencia en el tiempo total de viaje (o movilidad). Sus recomendaciones apuntan a la aplicación de medidas de prioridad a recorridos ya existentes. Él define tres conjuntos: prioridad en arcos, prioridad en intersecciones y prioridad en paraderos. Para los primeros dos propone medidas como proteger a los buses de los autos (corredores, pistas sólo bus, etc.) y dar prioridad a los buses en intersecciones. Respecto a la prioridad en paraderos, menciona acelerar el tiempo que toma cobrar la tarifa (zonas pagas, pases estacionales, etc.), mejorar el diseño de los vehículos (ancho de puerta, número de puertas, etc.), optimizar espaciamiento y localización de paraderos, y mejorar su diseño. En el 2007, Valencia y Fernández presentaron un modelo de simulación macroscópica que emula la operación de un corredor de transporte público de superficie que permite evaluar estrategias de operación y diseño físico de corredores. Se consideraron todas las fuentes de demora que afectan a los vehículos, tales como el tiempo de recorrido en arcos, demoras en semáforos y demoras en paraderos. Luego, los mismos autores, Valencia y Fernández (2011), presentan distintas recomendaciones sobre el espaciamiento entre paraderos en presencia de corredores de buses. El enfoque utilizado se basa en la minimización de los

costos sociales de usuarios y operadores, los cuales dependen del espaciamiento entre paraderos, y cuyo impacto se refleja en el tiempo de caminata a paraderos, tiempo de espera del pasajero y costo de operación por detención en el bus.

A partir de estos estudios vemos que algunos de los factores que afectan la velocidad comercial de un servicio son la presencia de esquemas de prioridad (corredor, zona paga, etc.), detenciones (semáforos, intersecciones, número de paradas, etc.), diseño del recorrido (localización y espaciamiento de paraderos), demanda de subida y bajada en los paraderos y diseño de buses. Dado que una alta variabilidad en la velocidad comercial de los buses puede generar una alta variabilidad en los intervalos de llegada de los buses a los paraderos, consideraremos estos mismos factores como punto de partida para analizar la variabilidad de los intervalos de los servicios de un transporte público. Mediante visitas a terreno y entrevistas se analizará la incorporación de otros factores que sean relevantes en la operación de Transantiago (por ejemplo, demanda de pasajeros).

3. GENERACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se explica la generación de la base de datos utilizada en esta investigación. Primero se presentan las características del sistema de transporte público estudiado, destacando aquellos atributos y características que podrán ser relevantes para explicar la irregularidad de los intervalos. A continuación se detalla la información recolectada en terreno para representar estas características que luego nutrirán los modelos econométricos. Finalmente, en base a esta información, se presentan las distintas variables que se usarán como inputs para los modelos que se presentarán en el capítulo 4 de esta tesis (tanto variables independientes como dependientes).

3.1. Descripción y definiciones del sistema²

Transantiago integra física y tarifariamente la totalidad de los buses de transporte público urbano, operados por 7 empresas concesionarias (Figura 3-1), y también al Metro de Santiago. Cada operador es identificado por un color y tiene asignados ciertos recorridos. En el ANEXO A: INFORME DE GESTIÓN se presentan indicadores gruesos asociados a la operación de estos siete operadores durante el 2012.

A diciembre del 2012 el sistema cubría un área cercana a los 680 km², abarcando las 32 comunas de la Provincia de Santiago más las comunas de San Bernardo y Puente Alto

² La información entregada en esta sección corresponde a las características de Transantiago en el 2012.

(Gran Santiago). Se estima que en estas 34 comunas la población alcanza los 6,2 millones de habitantes.

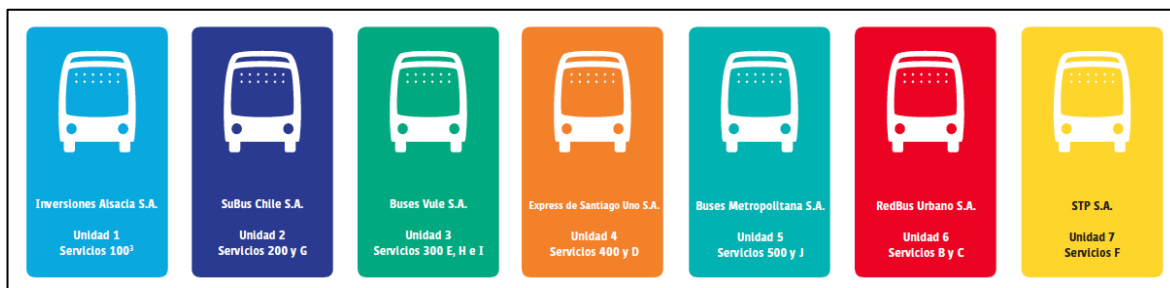


Figura 3-1: Operadores Transantiago

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

El eje estructurante del Sistema de Transporte Público es el Metro, con sus 5 líneas y 108 estaciones. Para este estudio se consideró solo el sistema de buses, ya que el sistema de metro posee otra naturaleza y ofrece un servicio considerablemente regular. Por esto, a partir de ahora al mencionar a Transantiago se estará haciendo referencia exclusivamente al servicio ofrecido por los buses del transporte público.

Para utilizar el transporte público de Santiago los usuarios deben disponer de un medio de acceso, llamado tarjeta bip!. Se considera como un medio de acceso y no de pago, ya que la tarjeta contiene cuotas de transporte, las cuales son descontadas, si corresponde, cada vez que el usuario realiza una validación al viajar.

Transantiago ofrecía 374 servicios con 6.298 buses en operación durante el 2012, lo que corresponde a 642.964 plazas. Con ello cubría 2.766 kilómetros de red vial, donde se distribuyen 11.165 paradas. Además el sistema cuenta con infraestructura vial exclusiva

para el transporte público (Figura 3-2), lo que al 2012 se descomponía en: (i) las vías segregadas (62 kms.), que separan la calzada para el transporte público del espacio utilizado por los automóviles; (ii) las vías exclusivas (31 kms.), que corresponden a un conjunto de calles que, en ciertos períodos del día, pueden ser usadas únicamente para la circulación de vehículos de transporte público (buses, taxis y taxis colectivos); y (iii) las pistas sólo bus (119 kms.), las que son pistas demarcadas para uso exclusivo de buses de transporte público urbano.



Figura 3-2: Mapa con vías exclusivas (rojo), corredores segregados (verde) y pista solo bus (naranja)

Fuente: Directorio de Transporte Público Metropolitano

El sistema de Transporte Público de Santiago (incluido metro) atendió mensualmente a cerca de 4,8 millones de personas durante el 2012, de los cuales entre 850 mil (día domingo) y poco menos de 2 millones (día laboral) viajan diariamente. Estos valores fueron estimados a partir del número de tarjeta bip! usadas³. Del total de transacciones, un 61% se realizó en buses y el resto en Metro (Figura 3-3). El promedio de transacciones diarias en el sistema de buses fue 2.838.356, mientras que en un día laboral esta cifra alcanzó un 12% más (3.184.289 transacciones).

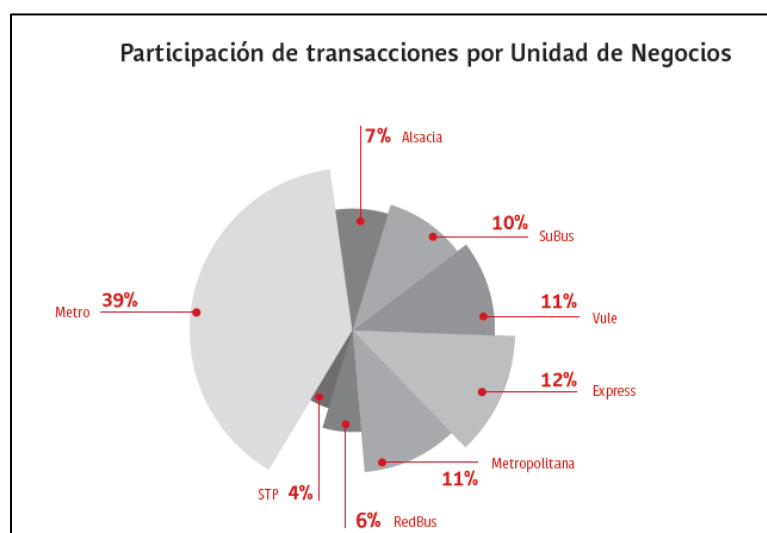


Figura 3-3: Participación por Unidad de Negocio

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

Para agilizar la subida de los pasajeros a los buses se instalaron 129 zonas pagas en paradas con alta afluencia de pasajeros (Figura 3-4). Estas son paradas en las cuales existe un área de espera delimitada, en cuyos accesos se instalan validadores para que los pasajeros validen la tarjeta bip! antes de abordar el bus.

³ Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

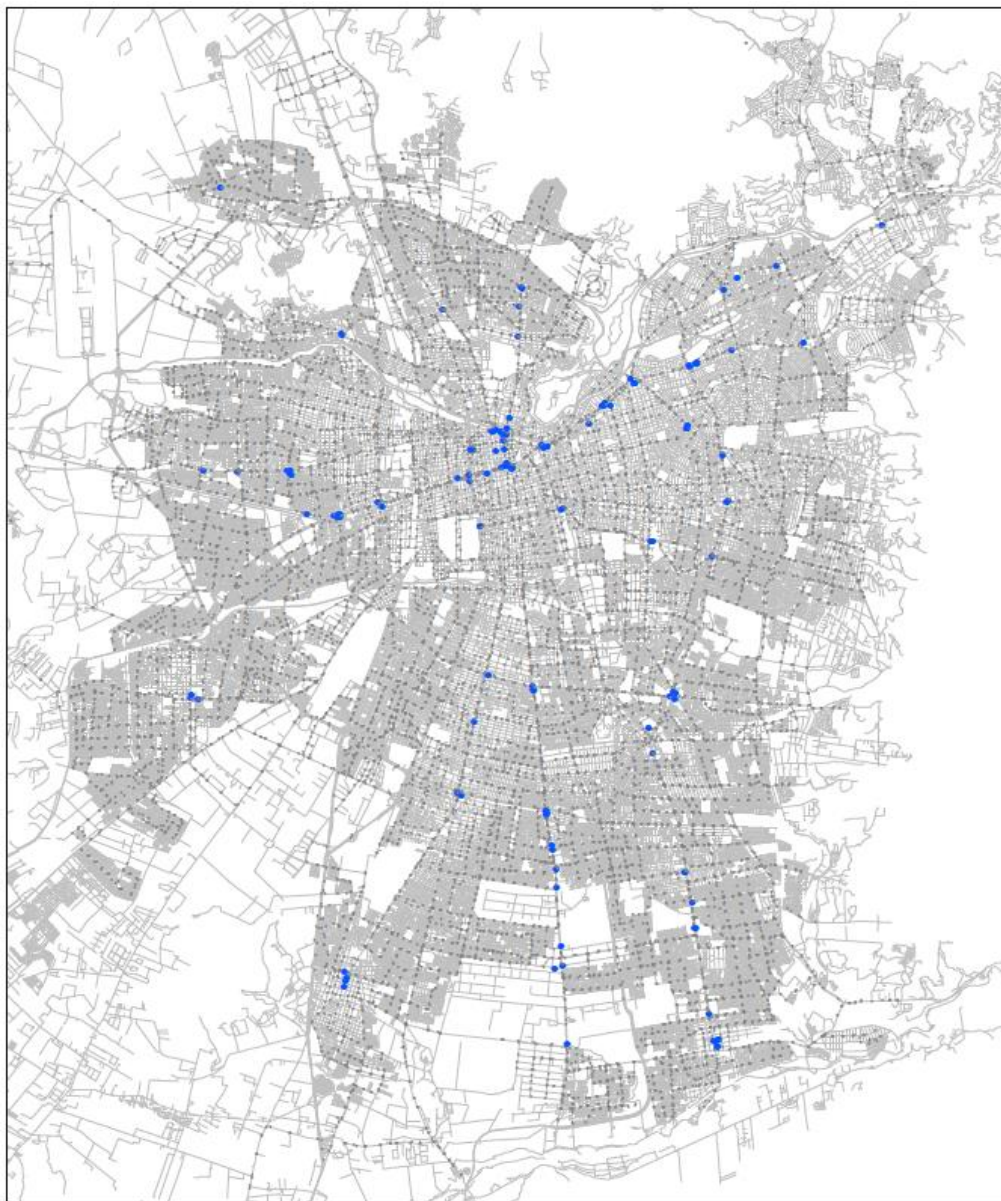


Figura 3-4: Mapa Zonas Pagas
Fuente: DTPM

Al inicio de Transantiago, la baja calidad del servicio y la falta de control por parte de la autoridad provocaron altos niveles de evasión, situación que se mantuvo con los años.

Desde el 2007, la evasión ha aumentado desde un 12% a un 25% aproximadamente, tal como se observa en la Figura 3-5, valor que se ha mantenido hasta el 2016.

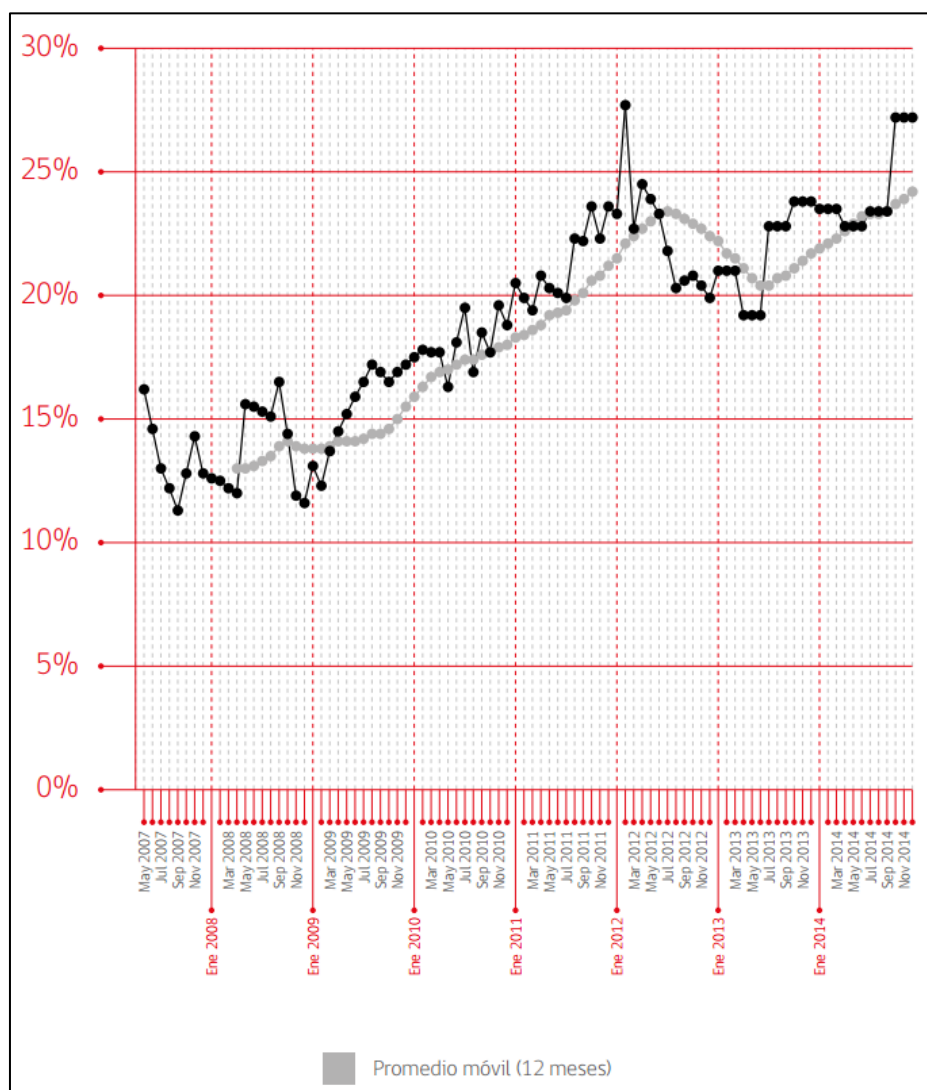


Figura 3-5: Porcentaje de evasión en el pago del pasaje en bus 2007-2014
Fuente: Programa Nacional de Fiscalización, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

3.1.1. Indicadores de desempeño

Los contratos con las empresas operadoras de los buses incluyen indicadores que pretenden reflejar el nivel de cumplimiento del servicio exigido, incentivando una operación que mejore el nivel de servicio ofrecido al usuario. Estos indicadores miden la frecuencia, la regularidad, la calidad de atención al usuario, la capacidad de transporte, la calidad de los vehículos, entre otros. Si la empresa no cumple con los umbrales mínimos de servicio puede sufrir descuentos en su remuneración y/o multas, siendo castigada en mayor medida si los incumplimientos son reiterados o sistemáticos.

Los índices relacionados con el desempeño de la operación de buses son el Índice de Cumplimiento de Frecuencia (ICF) y el Índice de Cumplimiento de Regularidad (ICR). Ellos se calculan sobre la base del total de expediciones realizadas, y se miden en tres puntos de la ruta, utilizando la información de los GPS de los buses.

El objetivo del ICF es asegurar una frecuencia de buses en circulación mínima respecto a la planificada. Para evitar que los tiempos de espera de los pasajeros se vean aumentados por falta de buses en el sistema, el nivel mínimo aceptable establecido en los contratos es de un 90%. Este indicador mide la cantidad de buses que efectivamente salen desde los puntos de inicio de los recorridos (terminales y cabezales), y lo compara con el número de buses planificados en los Planes de Operación (DTPM, 2012).

El ICR busca prevenir que se produzcan intervalos excesivos entre buses de un mismo

recorrido, aumentando significativamente el tiempo de espera de los usuarios, siendo el nivel mínimo aceptable determinado en los contratos un 80%. Este indicador mide la variabilidad de los intervalos entre buses en el punto de inicio de cada servicio, y su desviación respecto a los intervalos programados mediante el coeficiente de variación (CV) de los intervalos observados (DTPM, 2012). El CV es transformado en un índice entre 0 y 1, el cual toma el valor máximo 1 cuando el CV es menor a 0,4 (variabilidad aceptable), y cuando el CV excede 0,4 el indicador decrece linealmente hasta llegar a 0 (Beltrán et al., 2013). En octubre del 2012 el ICR promedio del sistema fue un 82,1% (ANEXO A: INFORME DE GESTIÓN). Para el segundo trimestre del 2016 este valor se ha mantenido (DTPM, 2016). Los valores para cada empresa operadora durante el 2012 se muestran en la Figura 3-6.

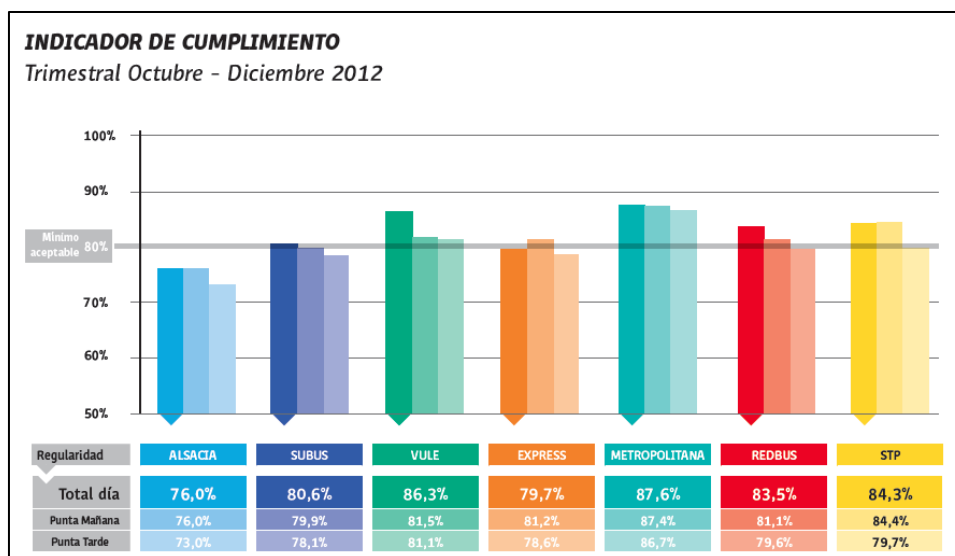


Figura 3-6: Índice cumplimiento regularidad (trimestral oct-dic 2012)
Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

Al ser el ICF más fácil de controlar operacionalmente, y al presentar ambos indicadores multas de magnitudes similares, es esperable que los operadores enfoquen la operación al cumplimiento del ICF dejando de lado el ICR. Por esto es de gran interés estudiar las variables que influyen en la regularidad de un servicio para diseñar medidas que apunten a mejorar este indicador.

3.1.2. Información observada

Para complementar la bibliografía revisada y la información pública de Transantiago, realicé visitas a tres puntos de origen de servicios: Escuela Militar y El Huinanal, puntos de despacho de Redbus, y Lourdes, punto de despacho de Vule. Pude entrevistar administrativos, despachadores y conductores, quienes además de contarnos sobre su gestión y operación en el despacho, identificaron atributos de los servicios o de las condiciones de operación que afectan la regularidad de los buses. También visitamos las oficinas de Alsacia, Express, y de Vule, por lo que pudimos hablar con administrativos sobre la operación y gestión de su flota.

Un factor en común destacado por los entrevistados como fuente de irregularidad en los intervalos, y el más mencionado de distintas formas, fue la alta variabilidad en los niveles de congestión en Santiago. Los despachadores mencionaron distintas situaciones que son desfavorables para la regularidad de los servicios, como por ejemplo la salida de clases de un colegio, vías con alto flujo y congestión, ventas nocturnas, fechas especiales como Navidad, localización de cabeceras en zonas de alta congestión y sin espacio para estacionar entre una expedición y otra. Otro factor importante que genera

apelotonamiento de buses son los semáforos, especialmente cuando éstos están ubicados al comienzo de la ruta, donde aunque se realice un despacho regular los buses se apelotonan en el semáforo a la salida del terminal. Otro punto importante es que la congestión puede afectar directamente en la disponibilidad de buses en las cabeceras para despachar buses, ya que algunos no alcanzan a realizar todo el recorrido (ida y vuelta) en el tiempo necesario debido a la alta variabilidad en la congestión. Esto puede no estar considerado en los programas de operación al asumir velocidades promedio, mientras que en la realidad la variabilidad de velocidades puede ser alta cuando los niveles de congestión varían en el tiempo y espacio. Un claro ejemplo de esta situación es durante los horarios de salida de los colegios.

Otro tipo de congestión es la que se presenta en los paraderos, ya que a veces más de 20 servicios distintos comparten un paradero. Esto genera una alta congestión de buses, principalmente en periodos de alta demanda, en los que los buses deben esperar a que se desocupe el paradero para poder buscar o dejar pasajeros.

Un factor importante, y que fue mencionado por los propios conductores, es la diferencia entre ellos mismos. Dado que el salario es fijo y no por pasajero transportado, algunos conductores procuran mantener poca distancia con el bus que lo antecede para tener menos trabajo (llevar menos pasajeros, discutir menos con ellos, etc.). Este bus o conductor sería conocido como “el mochila”. Otra conductora mencionó que a algunos conductores les gusta manejar más lento, sin razón aparente. En otro caso se mencionó el hecho de que algunos conductores realizan el tramo restante del recorrido más de

prisa cuando están cercanos al horario de fin de turno. Por último, para cumplir con los indicadores de desempeño de la empresa, a veces es necesario que los buses retrasen su llegada a puntos de control, lo que en ocasiones fuerza a los conductores a manejar más lento.

Si analizamos el trabajo de los operadores en despachar y gestionar los buses a lo largo de los recorridos, podremos ver muchos factores que influyen en que la regularidad del sistema sea deficiente. En el despacho, por ejemplo, se genera una alta variabilidad por distintas razones, como falta de buses, mal funcionamiento del bus, conductor no disponible al momento de salir, etc. Según algunos administrativos es muy difícil regular el despacho de un servicio de muy alta frecuencia. Por ejemplo para un servicio de 30 buses/hora se debe despachar un bus cada 2 minutos, por lo que es muy fácil que los buses se apelotonen, ya sea en la salida del terminal como durante el trayecto.

Para gestionar el número de despachos a realizar y en qué momento, las empresas utilizan un software que optimiza su gestión en función de maximizar las utilidades (buscando minimizar las penalidades del contrato). Esto procura una gestión acorde con un servicio regular y de calidad en situaciones óptimas de operación. Pero cuando ocurren desviaciones (como atrasos), las empresas buscarán el beneficio propio, lo que muchas veces significa despachar dos buses al mismo tiempo para evitar multas, incumpliendo con el índice de regularidad pero cumpliendo el de frecuencia, lo que afecta negativamente la regularidad del servicio.

Todo eso ilustra distintos factores que afectan a la regularidad de un servicio a pesar de los esfuerzos de los operadores por ofrecer el mejor servicio posible. Por ejemplo, existen esquemas de incentivos para los operadores y despachadores acorde a su desempeño en el trabajo, a los buses se les realizan las mantenciones requeridas, a los operadores los entrenamientos necesarios, y hay empresas que mantienen una asignación flexible de bus-servicio para poder realizar cambios en caso de imprevistos (bus en panne, problemas de tráfico, etc.).

3.2. Generación de la variable dependiente

El alcance de este estudio comprende la operación de todos los servicios de buses pertenecientes a Transantiago durante un periodo de tiempo limitado. Con esta información se calibrarán modelos que permitan explicar la irregularidad de los intervalos en función de las características de cada uno.

Los buses de Transantiago están equipados con un sistema de posicionamiento georeferencial (GPS) que puede usarse para gestionar la frecuencia y regularidad de los distintos servicios. Cada bus emite señales de su posición cada 30 segundos, lo que permite visualizar la posición y desplazamientos de los buses. Dado que los GPS poseen margen de error, esta información debe ser procesada para asignar cada señal al punto más cercano de ese servicio en su ruta. En un proyecto FONDEF realizado por la Pontificia Universidad Católica de Chile se recolectó información de todos los servicios de Transantiago en octubre del 2012 para configurar una base de datos del instante de

pasada de cada bus por cada paradero. La información consiste en observaciones de todos los servicios de Transantiago, durante el horario punta mañana (6:30 a.m. – 8:30 a.m.) para los siguientes días de octubre: viernes 12, miércoles 17, jueves 18, viernes 19, martes 23, miércoles 24, y jueves 25. Se seleccionaron estos días por tres razones: (i) no hubo cortes en vías (avenidas, calles) principales de alto tráfico, (ii) no hubo cambios bruscos e imprevistos de las condiciones climáticas, y (iii) no hubo cortes en las líneas de metro.

Las rutas fueron divididas en segmentos (o *links*), delimitados por las paradas que cada bus debe hacer. Cada observación de la base de datos contiene una estimación del instante en el cual un bus pasó una parada correspondiente a su ruta. Como no tenemos información del tiempo de permanencia (*dwell time*) de un bus en un paradero, el instante de pasada fue interpretado para efectos de este estudio como el instante en el que el bus se detuvo en el paradero programado.

La modelación entonces asume que las observaciones corresponden a los instantes en los cuales los buses pasan por sus distintos paraderos, sin conocimiento del tiempo de detención en ellos. Bajo ese supuesto buscamos identificar qué factores influyen en la evolución del coeficiente de variación de los intervalos de los buses de la siguiente manera: el coeficiente de variación de los intervalos del servicio s en el paradero n en la fecha f dependerá de su correspondiente coeficiente de variación de los intervalos en un paradero anterior $n - p$ y cualquier perturbación que puede ocurrir desde su detención en el paradero $n - p$, hasta su detención en el paradero n (Figura 3-7). De esta manera se

consideran los factores que influyen en los tiempos de detención en los paraderos intermedios y los factores que afectan el recorrido del bus desde el paradero $n - p$ al n .

La estimación del instante de parada de un bus por un paradero tiene bastante error. Por una parte los datos son observados a partir de GPS, luego es necesario asociar esta posición a un punto a lo largo de la ruta del servicio y finalmente se debe estimar el instante de inicio de la detención de un bus en un paradero. Para evitar que este error tenga gran relevancia en la estimación de los tiempos de viaje entre las paradas parece una buena idea alejar las observaciones de los paraderos considerados para conseguir modelos econométricos con mayor poder explicativo. Esto es, un modelo con $p = 1$ deberá dar un modelo con menor poder predictor que uno con un p mayor.

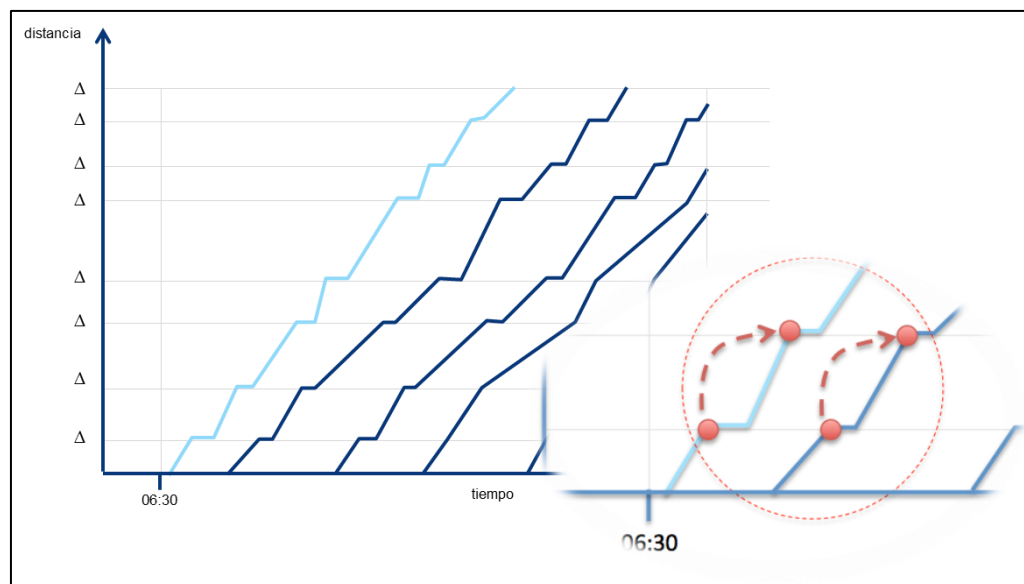


Figura 3-7: Evolución del CV(h) entre dos paraderos consecutivos
Fuente: Elaboración propia

A partir de la estimación de instante de pasada de cada bus por cada parada se estimaron tanto la variable dependiente como la velocidad comercial del bus (variable independiente). Ésta última fue calculada como la distancia entre dos paradas pertenecientes a la misma ruta dividida por el tiempo que le llevó al bus recorrerlo. Es importante reconocer que esta velocidad por lo tanto incorpora los tiempos de detención en las paradas.

3.3. Generación de variables independientes

A continuación se describen y analizan los factores considerados en este proceso de modelación, explicando la razón de su potencial inclusión al modelo, la unidad de medida, y el resultado esperado. Finalmente se explican las características principales de la implementación computacional de los modelos. La información para la mayoría de las variables fue obtenida del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), explicándose el origen en caso que sea distinto.

3.3.1. Detenciones por intersecciones y congestión

Las detenciones en intersecciones semaforizadas, donde el bus debe disminuir su velocidad y/o detenerse por un tiempo que varía de bus en bus, generan variabilidad en el tiempo de viaje de los pasajeros (Cohen 1984 y Gibson et al., 1989) y, por ende, la regularidad del servicio. Esto también afecta directamente la velocidad comercial del bus, que incluye los tiempos en que se detuvo. Lamentablemente no se cuenta con el número de semáforos en cada tramo de la red de buses, pero como una alternativa a esta

información se opta por usar la desviación de la velocidad comercial de los buses que pasan por cada tramo. Se asumo que este indicador captura este fenómeno y otros atributos que podrían ocasionar esta variabilidad. La desviación estándar de la velocidad está medida en metros por segundo, y se espera que a mayor desviación mayor sea la irregularidad del servicio.

El dinamismo de la congestión fue el factor más mencionado por parte de los conductores y funcionarios de las empresas de transporte como fuente de la irregularidad de buses. Es interesante destacar que la baja velocidad por sí sola no debería ser causa de irregularidad en los intervalos. Si todos los buses deben circular a baja velocidad un determinado tramo o estar detenidos por exactamente la misma cantidad de minutos en un lugar, su irregularidad antes y después del tramo será la misma. Es la variabilidad de estas condiciones la que podría afectar la irregularidad. Así, la hipótesis es que a bajas velocidades este efecto de variabilidad aumenta, ya que en general los buses comienzan o terminan el recorrido en zonas menos congestionadas de la periferia de la ciudad. Se utilizará la velocidad comercial de los buses para poder capturar los niveles de congestión en las distintas rutas. La velocidad comercial corresponde a la velocidad media de viaje entre dos puntos incluyendo todas sus detenciones, por lo que ésta será alta en flujo libre y mientras más cortas sean las detenciones, y disminuirá mientras mayor sea la congestión o más largas las detenciones. Fernández (1996) demuestra que la velocidad comercial de un bus en un corredor segregado puede alcanzar los 30 km/hr (desde los 20 km/hr) si la frecuencia de detenciones fuera igual al metro (1,0 a 1,3 det/km), tal como se observa en los servicios expresos de Av. Santa Rosa actualmente.

Asimismo, la velocidad en tramos de tráfico mixto puede ser inferior a los 8 km/hr en presencia de alta congestión (Schneider, 2013). La velocidad promedio se mide en metros por segundo, y se espera que a mayor velocidad menor sea la irregularidad.

3.3.2. Infraestructura

Se espera que un factor altamente influyente sea el tipo de infraestructura por el que circula un servicio. Debido a que al utilizar corredores segregados de transporte público los buses evitan enfrentarse a la congestión habitual de los ejes en que circulan por la ciudad, el corredor debiera ofrecer una condición de flujo libre para los buses. Así, en este corredor debiese ocurrir que la velocidad comercial sea más alta y la variabilidad de la velocidad sea menor. Este efecto debería estar capturando en las variables antes mencionadas. De este modo, esta variable capturaría otros efectos adicionales en la irregularidad producto de circular en corredor segregado. En el caso de la utilización de corredores segregados, se espera que la irregularidad de intervalos crezca a un ritmo más bajo que si no lo utilizara. Para representar el uso de corredor segregado en un tramo se utiliza una variable *dummy* asociada a cada paradero, donde 1 significa que el paradero está en un corredor, 0 si no. Dado el importante efecto que se asocia a los corredores segregados en la menor regularidad de los intervalos, se espera que la presencia de corredor tenga un efecto positivo en la regularidad de los servicios.

3.3.3. Distancia entre paraderos

Interesa determinar cómo se propaga la irregularidad de los intervalos a lo largo de una ruta de un servicio. La fuente de esta irregularidad se encuentra en la variabilidad de la velocidad de operación que se genera en el trayecto entre paradas, pero también en los tiempos de detención. Así una variable explicativa debiera ser el número de paradas. A mayor número de paradas (para una ruta de distancia dada) debería haber un mayor crecimiento de la irregularidad. O, dicho de otra forma, a mayor distancia entre paradas debería haber menor crecimiento de la irregularidad por unidad de distancia, pero mayor crecimiento de la irregularidad entre paradas. Esto porque aumenta la probabilidad de que el bus se enfrente a eventos que afecten su operación, y por ende su regularidad. Así, el impacto de esta variable dependerá de la forma en que se represente la variable independiente. Esta variable está medida en metros.

3.3.4. Operador

A partir de las visitas a las distintas empresas operadores de buses, específicamente a los terminales y cabezales de despacho, se pudo observar que no existe un protocolo común de despacho para todas las empresas. El Directorio de Transporte Público Metropolitano entrega un horario de despachos, exige un número de plazas circulando, etc., pero cómo esto se lleva a cabo depende de cada operador. Esto en parte se debe a la diferencia en recursos disponibles e inversiones tecnológicas realizadas por parte de cada operador y por su gestión en recursos humanos y cultura empresarial.

El DTPM mide la regularidad de cada servicio en tres puntos de su recorrido. El primero y el último cerca de los cabezales, y el segundo en un punto intermedio. En cada punto se calculan los minutos de incidencia como aquellos en que los intervalos exceden más de un 50% el intervalo promedio. La Figura 3-8 presenta para cada una de las siete empresas operadoras de Transantiago el promedio de los minutos de incidencia entre todos los servicios en la posición promedio de estos tres puntos de control. La figura ha sido tomada de un trabajo realizado por DICTUC y presentado por García (2016). Vemos que todos los operadores muestran una relación bastante lineal entre la variabilidad y la distancia recorrida desde el origen, con una pendiente similar, lo que indica que la principal diferencia entre la regularidad de los servicios de los distintos operadores es por la regularidad del despacho de los buses (García, 2016). Así, un elemento que interesa agregar entre las variables explicativas del modelo es la empresa operadora a cargo del servicio. Dado que en el modelo explicativo de esta tesis no se busca explicar la regularidad sino su evolución a lo largo de la ruta, este gráfico sugiere que habrá poca diferencia entre las distintas empresas. El único operador que parece tener un aumento de la regularidad mayor a los demás es Redbus, porque su pendiente de crecimiento es un poco mayor.

3.3.5. Zonas de prepago

Dado que una de las fuentes de irregularidad son los tiempos de subida y bajada de pasajeros en la parada, la existencia de una zona de prepago puede acelerar el proceso de subida de pasajeros, ya que éstos pagan su pasaje antes de ingresar al bus. Por esto se

espera que la presencia de una zona paga, representada con una variable *dummy*, influya positivamente en la regularidad de los servicios.

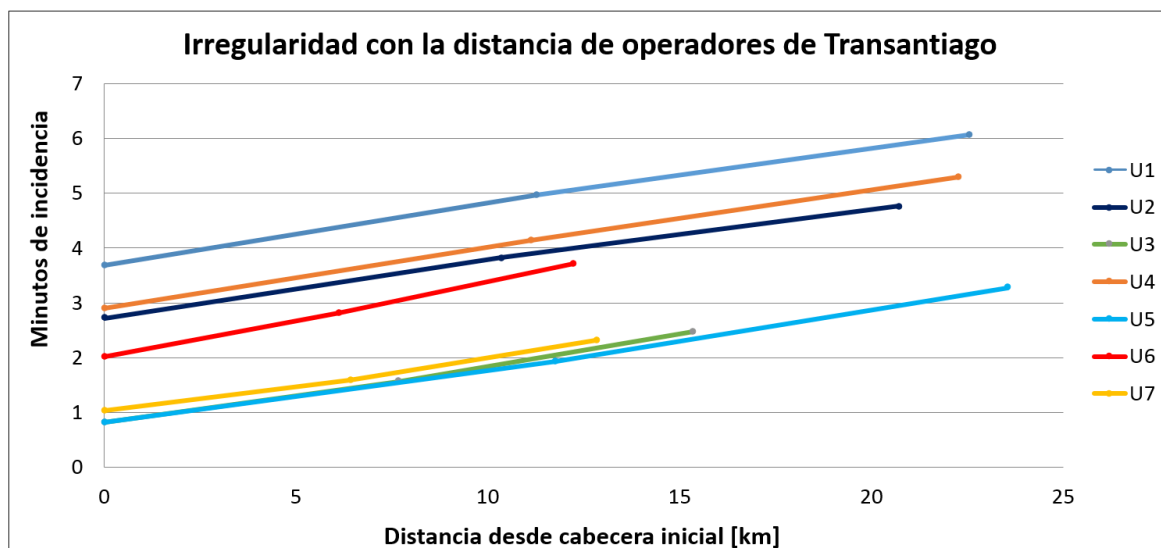


Figura 3-8: Evolución de la irregularidad respecto a la distancia recorrida desde el origen del servicio
Fuente: García (2016)

3.3.6. Demanda

Los buses de un mismo servicio enfrentan en cada paradero una demanda diferente, ya sea de pasajeros que suben o que bajan al bus. Este proceso de subida y bajada afecta los tiempos de detención. Mientras mayor sea el número de transacciones, mayor será la detención, y seguramente mayor será su variabilidad, lo que aumentaría la irregularidad del servicio. La información sobre la tasa de subida y bajada correspondiente a cada paradero se estima a partir de la matriz origen-destino desarrollada por Munizaga y Palma (2012), la cual incluye un factor de expansión que corrige problemas como la evasión, y es medida en pasajeros por segundo. Dado que al subir los usuarios deben

validar su tarjeta bip!, se considerará la tasa de subida de pasajeros como la principal fuente de irregularidad, y solo se considerará la diferencia entre la tasa de subida y la de bajada en el caso que esta última sea mayor. Esta demanda será considerada solo en paraderos que no tengan zona paga, ya que la variable *dummy* distorsionará el efecto que la tasa de demanda tiene sobre la regularidad. Se espera que la irregularidad aumente con el aumento de la demanda.

3.3.7. Frecuencia programada

Para capturar el efecto que pueda generar la frecuencia de un servicio en su regularidad, se incluye el intervalo teórico (inverso de la frecuencia teórica). Es posible que el programar un despacho más frecuente la regularidad empeore por un apelotonamiento de buses.

3.3.8. Día de la semana

El comportamiento humano es difícil de predecir, pero es esperable que los usuarios tengan un peor comportamiento (caminar más lento, no tener cargada la tarjeta bip! obstaculizando a los otros pasajeros que desean subir al tratar de bajar, etc.) hacia el final de la semana (día viernes), ya que, por ejemplo, pueden estar más cansados después de una semana de trabajo.

3.4. Análisis de la base de datos

La base de datos generada cuenta con más de 126 mil observaciones (parada-bus-fecha). Éstas se componen por la información de más de 540 servicios-sentido, en una red con más de 9.100 paraderos, durante 7 fechas.

Al analizar los recorridos de algunos servicios vemos grandes diferencias entre unos y otros. Por ejemplo, el largo de los recorridos varía entre los 2,5 kms. aproximadamente hasta los 40 kms., y la frecuencia varía entre 2 y 26 buses por hora.

Si analizamos el comportamiento de la trayectoria de los distintos recorridos, vemos comportamientos muy distintos. Como en esta investigación queremos enfocarnos en la regularidad del sistema y en cómo las perturbaciones en ésta se propagan, es razonable pensar que el fenómeno podría ser muy diferente en el caso de servicios de muy alta y muy baja frecuencia. En esta tesis se opta por considerar solo servicios con alta frecuencia. Así mismo se decidió eliminar de la muestra los servicios con un recorrido demasiado corto. El análisis realizado se presenta a continuación. Adicionalmente ocurre con bastante frecuencia que los buses son despachados de un modo muy irregular y los conductores ajustan su posición en un primer tramo del servicio. Por este motivo se opta por eliminar observaciones del primer tercio del recorrido.

A modo de ilustración la Figura 3-9 muestra en un diagrama tiempo-espacio la información disponible para el recorrido el servicio C17 de ida, el cual tiene una

frecuencia teórica de 2 buses por hora. Este caso ilustra lo que se observa solamente en los recorridos cortos de baja frecuencia, en que hay suficiente holgura para ofrecer una regularidad razonable y evitar el apilotonamiento de buses. Algo similar ocurre con recorridos muy cortos como el D07c de ida que se muestra en la Figura 3-10. En ella se puede observar (i) como algunos buses se juntan en el recorrido (*bus bunching*) y luego logran separarse, regularizando el servicio, y (ii) lo poco que se desregulariza un servicio en un recorrido tan corto. Esto es muy diferente en casos de servicios con frecuencia y largo de recorrido mayores, como se puede apreciar en el recorrido presentado en el ANEXO B: SERVICIO OBJETIVO.

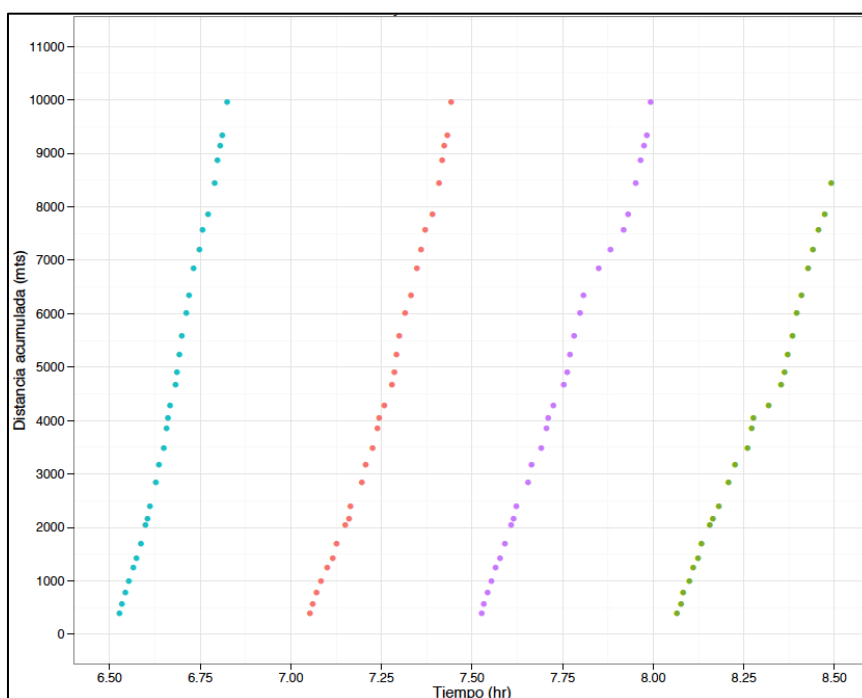


Figura 3-9: Trayectoria servicio C17I (12-oct-2012)

Fuente: Elaboración propia

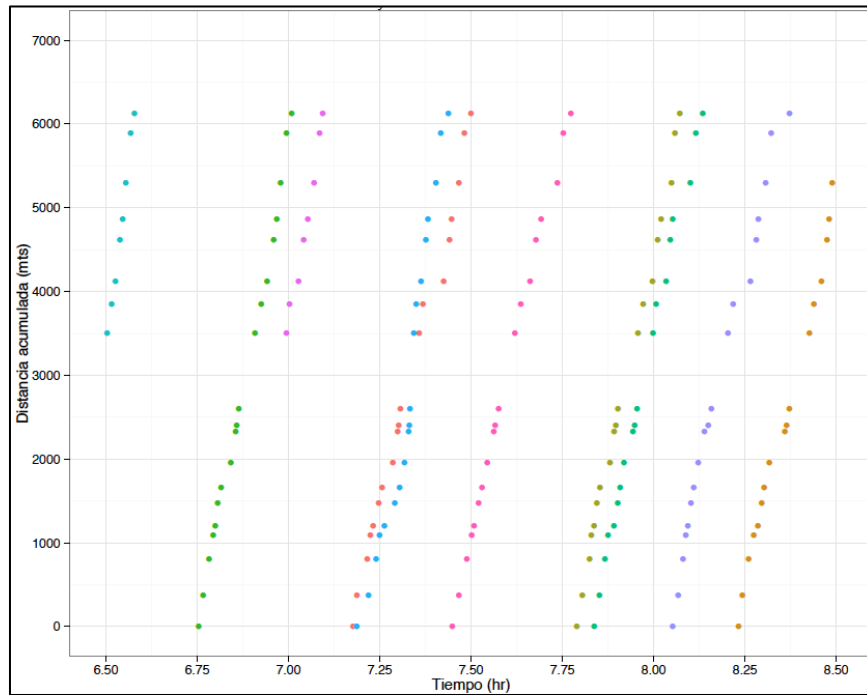


Figura 3-10: Trayectoria servicio D07cI (18-oct-2012)
Fuente: Elaboración propia

En base a este análisis los recorridos óptimos para nuestro análisis cuentan con las características presentadas en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Parámetros para la selección de recorridos

<i>Parámetro</i>	<i>Cota mínima</i>	<i>Cota máxima</i>	<i>Unidad de medida</i>
Frecuencia	8	-	Buses/hora
Largo recorrido	8.000	24.000	Metros

Finalmente, como queremos analizar el recorrido completo de cada bus, para tener observaciones comparables será importante contar con recorridos no tan largos tal que el número de buses (observaciones) que realicen el recorrido completo entre las 6.30 am y

las 8.30 am sea mayor a uno por lo menos. De esta manera la regularidad de un recorrido en nuestro modelo no dependerá de un solo bus. El procedimiento se explica en el ANEXO C: DEPURACIÓN DE SERVICIOS.

3.4.1. Programación computacional

La metodología descrita fue implementada en 4 etapas principales: (i) depuración de la información, (ii) cálculo de la variable dependiente, (iii) asignación de las variables independientes y (iv) generación de resultados.

La primera etapa consistió en la depuración de la información obtenida, lo que considera instantes de pasada de buses por los paraderos, información sobre las rutas, buses, demanda, etc. Esta información se encontraba en archivos de Microsoft Excel principalmente y archivos .csv. Luego, utilizando R se calculó la variable dependiente y se asignó las variables independientes a cada observación, para así generar nuestra base de datos final. El cálculo de estas variables se explica en el ANEXO D: GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS. Esta base de datos se utilizó en los distintos modelos presentados en el capítulo 4. Estos análisis fueron realizados principalmente en R, y parcialmente en Microsoft Excel.

El programa principal utilizado fue R, por ser un software gratuito diseñado para el análisis estadístico y gráfico. Además gracias a la posibilidad de cargar diferentes bibliotecas o paquetes con finalidades específicas, es un programa amigable para el

usuario. Entre las características específicas necesarias para esta investigación se encuentran el manejo de bases de datos, análisis de datos y test estadísticos, estimación de modelos lineales, entre otros.

4. MODELACIÓN

Dada las características del sistema modelado, y basándonos en la hipótesis de que una perturbación en la regularidad de un recorrido no sólo se propaga aguas abajo sino que aumenta su magnitud, incluiremos el efecto del coeficiente de variación de los intervalos de un paradero aguas arriba del paradero analizado como una variable que debiera tener un poder explicativo alto.

4.1. Modelación del CV(h) de un paradero

En un primer intento por entender los factores que afectan la regularidad de un servicio se diseñó un modelo donde la variable dependiente es el CV de los intervalos de un servicio en cierto paradero. El modelo refleja cómo ciertas características de la ruta influyen sobre la variación en la regularidad de un servicio, incluyendo el CV de los intervalos del mismo servicio en un paradero aguas arriba del analizado. Es importante destacar que para poder tener una mejor idea de la magnitud del impacto de las distintas variables sobre la variable dependiente, la unidad utilizada para medir el CV es porcentaje y no un valor decimal.

El modelo calibrado se presenta en la ecuación⁴ (4-1), donde cada observación es calculada para cada conjunto servicio-paradero-fecha.

⁴ Se omite el subíndice correspondiente al servicio-fecha para una mejor comprensión.

$$\begin{aligned}
CV_n = & \beta_1 + \beta_2 * LS + \beta_3 * VPROM + \beta_4 * VSD + \beta_5 * DCo + \beta_6 * HPROM \quad (4-1) \\
& + \beta_7 * SNP + \beta_8 * EBNP + \beta_9 * DZP + \beta_{10} * DU_2 + \beta_{11} \\
& * DU_3 + \beta_{12} * DU_4 + \beta_{13} * DU_5 + \beta_{14} * DU_6 + \beta_{15} * DU_7 \\
& + \beta_{16} * DD_3 + \beta_{17} * DD_4 + \beta_{18} * DD_5 + \beta_{19} * CV_{n-p}
\end{aligned}$$

Donde:

CV_i : coeficiente de variación del intervalo entre buses que pasan por el paradero i (%)

β_i : coeficientes de las variables

LS : distancia entre los paraderos n y $n-p$ (mts)

$VPROM$: velocidad promedio de los buses que viajan entre los paraderos n y $n-p$ (mts/seg)

VSD : desviación estándar de la velocidad de los buses que viajan entre los paraderos n y $n-p$ (mts/seg)

DCo : porcentaje de paraderos en corredor segregado entre los paraderos n y $n-p$, sin considerar el paradero n

$HPROM$: intervalo promedio teórico entre buses consecutivo que pasan entre los paraderos n y $n-p$ durante el periodo de observación (seg)

SNP : tasa promedio de subidas de pasajeros entre los paraderos $n-1$ y $n-p$ (pax/seg)

$EBNP$: en caso de que el número de bajadas sea mayor al de subidas, diferencia entre el número de subidas menos bajadas, por lo que es un número negativo (pax/seg)

DZP : porcentaje de zonas pagas entre los paraderos n y $n-p$, sin considerar el paradero p

DU_i : variable *dummy* que indica si el servicio pertenece a la unidad de negocio i ($i \in \{1:$

Inversiones Alsacia S.A., 2: Subus Chile S.A., 3: Buses Vule S.A., 4: Express de

Santiago Uno S.A. (base), 5: Buses Metropolitana S.A., 6: Redbus Urbano S.A., 7: STP S.A.})

DD_j : variable *dummy* que indica si la observación ocurre en el día j ($j \in \{2$: martes (base), 3: miércoles, 4: jueves, 5: viernes})

Dado que estamos incluyendo una variable rezagada en el modelo (el CV de los intervalos de un paradero aguas arriba será variable dependiente e independiente en dos observaciones distintas), la presencia de autocorrelación podría sesgar los coeficientes estimados, invalidando nuestro modelo. Es por esto que se consideraron observaciones compartan el mínimo de información posible, pero controlando la no pérdida de información (por ejemplo al eliminar todas las observaciones con zonas pagas). El detalle de esto se encuentra en el ANEXO E: CORRECCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN.

4.2. Modelación de la diferencia entre los CV(h) de dos paraderos

Para analizar el real efecto de las características de la ruta en la regularidad de un servicio, modelaremos de forma lineal la diferencia entre los coeficientes de variación (en %) de los intervalos de dos paraderos para un mismo servicio-fecha, desde ahora llamado CV. Esto permite que la variable dependiente se independice de las condiciones específicas de regularidad y sólo se estudie cómo esta regularidad evoluciona aguas abajo. Este modelo considerará el efecto de las mismas características de la ruta que el modelo presentado en la sección 4.1.

El modelo que se busca calibrar se presenta en la ecuación (4-2), donde cada observación es calculada para cada conjunto servicio-paradero-fecha.

$$\begin{aligned}
 (CV_n - CV_{n-p}) & \quad (4-2) \\
 &= \beta_1 + \beta_2 * LS + \beta_3 * VPROM + \beta_4 * VSD + \beta_5 * DCo + \beta_6 \\
 &\quad * HPROM + \beta_7 * SNP + \beta_8 * EBNP + \beta_9 * DZP + \beta_{10} * DU_2 \\
 &\quad + \beta_{11} * DU_3 + \beta_{12} * DU_4 + \beta_{13} * DU_5 + \beta_{14} * DU_6 + \beta_{15} \\
 &\quad * DU_7 + \beta_{16} * DD_3 + \beta_{17} * DD_4 + \beta_{18} * DD_5
 \end{aligned}$$

La descripción de cada variable y la corrección de la autocorrelación se presentan en la sección anterior (4.1).

A continuación se presentan características específicas de la modelación considerando dos casos: la variación de la regularidad de un servicio cualquiera entre paraderos consecutivos, y la misma variación entre paraderos más alejados.

4.2.1. Modelación del efecto en el paradero siguiente

La diferencia de los CV de los intervalos de un servicio entre dos paraderos consecutivos puede ser afectada por muchos factores. En este caso consideraremos los factores ya mencionados, donde es importante indicar que: la variable *DZP* corresponde a una variable *dummy* indicando si el paradero $n-1$ es zona paga, y que la variable *DCo*

corresponde a una variable *dummy* indicando si el paradero $n-1$ se encuentra en un corredor segregado.

4.2.2. Modelo del efecto en un paradero no consecutivo

Al estar más alejado los paraderos, se espera poder detectar efectos más fuertes y estadísticamente significantes que en el caso $p = 1$. De alguna manera se está reduciendo el impacto de la condición de borde de las observaciones producto de errores de medición. Esto a pesar de que el número de observaciones de la muestra disminuye.

En este caso, las variables DZP y DCo corresponden al porcentaje de paraderos entre n y $n-p$ que es zona paga y/o se encuentra en un corredor respectivamente, para cada recorrido.

Para estudiar este modelo se presentan dos casos que dependen de la relación entre el paradero n y el paradero $n-p$, donde $n-p$ está aguas arriba de n . El primer caso es tal que $p = 15$, y en el segundo $p = 25$. Con esto buscamos mostrar cómo las variables que afectan la regularidad de intervalos entre dos paraderos son distintas a medida que éstos se alejan. Como en estos casos cada observación válida tiene la información de todas las variables entre cada par de paraderos consecutivos comprendidos entre n y $n-p$, el número de observaciones que alimentan el modelo econométrico disminuye considerablemente.

5. ESTIMACIÓN DE MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar la magnitud de la influencia de la regularidad de un paradero aguas arriba sobre la regularidad de un paradero aguas abajo, se modelará el CV de los intervalos de un paradero en función de distintas características de la ruta entre el paradero anterior y el observado, incluyendo además el efecto del CV de los intervalos del paradero anterior como variable independiente. Luego, tal como explicamos en el capítulo cuatro, se generarán modelos econométricos que busquen explicar la diferencia del coeficiente de variación entre un paradero base con tres paraderos distintos: con el anterior, con el paradero $p = 15$, y con el paradero $p = 25$. A medida que los paraderos están más distantes el número de factores estadísticamente significativos en la irregularidad de los intervalos puede variar o disminuir por la reducción del impacto de la condición de borde de las observaciones producto de errores de medición.

5.1. Modelo 0: coeficiente de variación

El modelo del CV de los intervalos de un paradero p cualquiera incluye el CV de los intervalos del paradero anterior como variable independiente. Además considera las variables que podrían afectar su comportamiento desde que se detuvo en el paradero $n-1$ hasta que se detiene en el paradero n .

En la Figura 5-1 podemos ver la distribución del CV de nuestra base de datos. Se observa que la mediana y el promedio del coeficiente de variación rondan el 70%, lo que se traduce en un $CV(h)^2$ del 49%. Este valor es cercano al presentado por el

Observatorio de Transantiago (OdT, 2014), donde el exceso de tiempo de espera es un 33,9% para el horario punta mañana y un 42,8% para el horario punta tarde. Este exceso de tiempo de espera calculado como la diferencia entre el tiempo de espera observado y el tiempo de espera programado como porcentaje en relación al tiempo programado, lo que es igual al $CV(h)^2$ presentado en la ecuación (2-1) por cien. En comparación, el sistema de Londres presenta un exceso del tiempo de espera del 23%, lo que sugiere que existe una gran oportunidad de mejora (Transport for London, 2014).

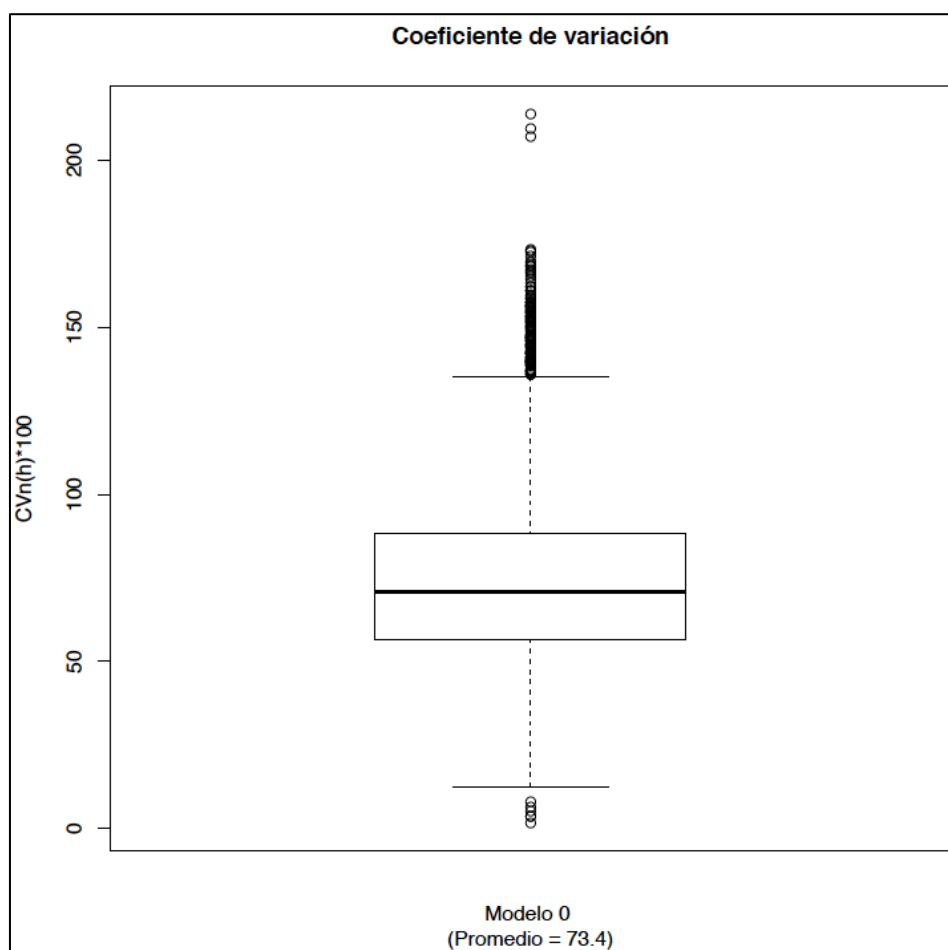


Figura 5-1: Distribución CV Modelo 0
Fuente: Elaboración propia

Primero se modeló la regresión presentada en el capítulo cuatro, incluyendo todas las variables ahí definidas. En este modelo el efecto de una posible zona paga o de la presencia de corredor segregado se recoge con variables *dummy* que indican la presencia o no de estos.

Luego para definir el modelo final se realizó el método *stepwise backward*, donde se eliminan variables poco significativas según los siguientes criterios: (i) que al ser eliminadas mejora el ajuste del modelo, y (ii) que presentan signo opuesto al racional. El modelo final es presentado en la Tabla 5-1. El detalle de los resultados se muestran en el ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Lo que más llama la atención es el alto valor del R^2 (98%). Como se puede observar en los resultados presentados en la Tabla 5-1, la mayor parte de la variabilidad en un paradero es explicada por la variabilidad en el paradero anterior, a lo que se le puede atribuir el alto R^2 . Esto se desprende de la alta significancia (valor t) de la variable CV_{n-p} , además de su alta contribución promedio. Es interesante observar además que el valor de su coeficiente es prácticamente igual a 1 (0,988) lo que indica que el CV resulta del valor del paradero anterior con ligeras modificaciones. Este efecto parece bastante obvio, por lo que es de mayor interés entender a qué se debe el aumento o disminución del CV de los intervalos entre dos paraderos y qué factores influyen en la evolución de esta variabilidad. Este análisis se presenta en las siguientes secciones.

Tabla 5-1: Resultados modelo 0

<i>Variable</i>	<i>Valor coeficiente</i>	<i>Media de variable</i>	<i>Contribución promedio</i> (valor coeficiente * media de variable)	<i>Valor t</i>
Intercepto	1,772	-	-	6,958
<i>LS</i>	0,001	337,400	0,478	8,086
<i>VPROM</i>	-0,109	6,787	-0,740	-5,813
<i>VSD</i>	0,237	2,185	0,518	5,734
<i>DCo</i>	-0,453	0,033	-0,015	-2,206
<i>HPROM</i>	-0,001	411,200	-0,503	-3,847
<i>SNP</i>	5,180	0,002	0,009	0,445
<i>EBNP</i>	-8,287	-0,002	0,017	-2,430
<i>DU₃</i>	0,327	0,165	0,054	3,264
<i>DU₆</i>	0,151	0,235	0,035	1,680
<i>DD₃</i>	-0,121	0,278	-0,034	-1,052
<i>DD₄</i>	-0,135	0,287	-0,039	-1,179
<i>DD₅</i>	-0,088	0,288	-0,025	-0,767
<i>CV_{n-p}</i>	0,988	72,760	71,851	648,621
Número Observaciones = 7.897				
R² ajustado = 98,3%				
F = 32,610				
Valor p = < 2,2e-16				
Error estándar = 3,17				

Tabla 5-2: Test de autocorrelación modelo 0

<i>Test de autocorrelación Breusch-Godfrey</i>
LM test = 3,636
Valor p = 0,057

En la Tabla 5-1 vemos que el modelo presenta un valor p significativamente menor a 0,05, por lo que rechazamos la hipótesis nula en que los coeficientes de las variables son iguales a cero (o sea que el modelo no sería válido). Finalmente se demostró la ausencia de autocorrelación mediante el test de Breusch-Godfrey (resultados en Tabla 5-2). Dado que su valor p es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula en que los coeficientes de los errores son cero, por lo que los errores no están autocorrelacionados.

5.2. Modelo 1: diferencia con paradero anterior

El primer modelo de diferencias presenta la relación entre la regularidad de un servicio en un paradero n cualquiera y el anterior, considerando las variables que podrían afectar su comportamiento desde que se detuvo en el paradero $n-1$ hasta que se detiene en el paradero n .

Primero se modeló la regresión presentada en el capítulo cuatro cuya variable dependiente es la diferencia de los coeficientes de variación de los intervalos de dos paraderos, incluyendo todas las variables definidas ahí. En este modelo, al igual que en el anterior presentado, el efecto de una posible zona paga o de la presencia de corredor segregado se recoge con variables *dummy* que indican la presencia de estos.

Luego se utilizó el mismo método para afinar el modelo a las variables relevantes y explicativas (*stepwise backward*). El modelo final es presentado en la Tabla 5-3. El detalle de los resultados se muestran en el ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Lo primero que notamos es que la distancia entre paraderos afecta significativamente la regularidad de un servicio, donde mientras mayor es la distancia entre paraderos más irregular es el servicio para un mismo número de paraderos. Esto se puede deber a que al haber mayor distancia habría mayor espacio para que ocurran incidentes o interrupciones en los servicios, aumentando la irregularidad. Otros efectos no medidos en el modelo

pueden estar relacionados con el comportamiento de los conductores, como el caso “mochila” mencionado en la sección 3.1.2, donde un conductor se “pega” al de adelante para trabajar menos, y una gran distancia entre paraderos (para un número de paraderos dado) puede favorecer este comportamiento.

Tabla 5-3: Resultados modelo 1

<i>Variable</i>	<i>Valor coeficiente</i>	<i>Media de variable</i>	<i>Contribución promedio</i> (valor coeficiente * media de variable)	<i>Valor t</i>
Intercepto	0,391	-	-	1,943
<i>LS</i>	0,001	337,400	0,486	8,136
<i>VPROM</i>	-0,108	6,787	-0,733	-5,728
<i>VSD</i>	0,236	2,185	0,515	5,664
<i>DCo</i>	-0,467	0,033	-0,016	-2,266
<i>HPROM</i>	-0,001	411,200	-0,209	-1,601
<i>SNP</i>	8,982	0,002	0,015	0,760
<i>EBNP</i>	-7,878	-0,002	0,017	-2,299
<i>DU₃</i>	0,404	0,165	0,067	3,810
<i>DU₆</i>	0,271	0,235	0,064	2,832
<i>DU₇</i>	0,121	0,184	0,022	1,153
Número Observaciones = 7.897				
<i>R</i>² ajustado = 1,5%				
F = 13,01				
Valor p = < 2,2e-16				
Error estándar = 3,183				

Tabla 5-4: Test de autocorrelación modelo 1

<i>Test de autocorrelación Breusch-Godfrey</i>
LM test = 2,592
Valor p = 0,107

Las detenciones en intersecciones y la congestión, representadas por la desviación estándar y el promedio de la velocidad respectivamente, tienen gran influencia en la evolución de la regularidad de un servicio. Vemos que mientras menor sea la congestión,

o sea mayor sea la velocidad promedio, la regularidad tiende a evolucionar positivamente. Por otro lado mientras mayores sea la desviación estándar de la velocidad, más aumentará la variabilidad de los intervalos entre paraderos consecutivos, generando una mayor irregularidad. La magnitud de ambos efectos es considerable.

Respecto a la presencia de infraestructura especial, el modelo corrobora la que la presencia de corredor mejora la regularidad de los servicios, aunque marginalmente. En este caso la presencia de zonas pagas mostró el efecto contrario, por lo que fue eliminada del modelo. Esto se puede deber a error de medición u otros efectos de condición de borde por tomar dos paraderos consecutivos.

Como era de esperar, a mayor demanda mayor es la irregularidad. Esto tiene directa relación con el tiempo de detención del bus en el paradero, donde una mayor demanda se convierte en una fuente importante de diferencia en tiempos de detención entre buses en un mismo paradero. Un bus precedido por un intervalo largo (lo que genera una alta acumulación de pasajeros) estará mucho tiempo detenido mientras que un bus precedido por un intervalo corto estará poco tiempo. Así, si hay mucha demanda este efecto se acentúa. Además, una mayor demanda podría generar más congestión en las puertas al momento de abordar y bajar. En este caso una tasa de bajadas mayor a la tasa de subidas presenta una significancia y contribución promedio considerablemente mayor a la tasa de subidas propiamente tal.

Otra variable que presenta alta significancia estadística e impacto positivo sobre la regularidad de un servicio es la frecuencia teórica, representada en el modelo con el intervalo o *headway* teórico. Como era de esperarse ante un mayor intervalo programado, que implica una menor frecuencia, la regularidad evoluciona de mejor manera que si la frecuencia es alta. Esto se podría deber a que una menor frecuencia le da suficiente espacio a los buses para mantenerse separados, evitando el ya mencionado apelotonamiento de buses.

Por otro lado vemos que algunas unidades de negocio presentan una diferencia significativa y negativa respecto a las unidades que quedaron en la base. Esto indica que Buses Vule S.A., Redbus Urbano S.A., y STP S.A. presentan un aumento más pronunciado de la irregularidad de intervalos entre paradas consecutivas, siendo el primero de ellos aquel en que es más claro. Este resultado parece completamente inconsistente con la información publicada por el DTPM en que se identifica a algunas de estas empresas como la de mejor regularidad, tal como se muestra en la Figura 3-6. Esta discrepancia puede tener tres explicaciones. Por una parte el nivel de regularidad en el despacho varía mucho. Tal como ilustra la figura, las empresas con alto ICR se diferencian por realizar una mejor labor en la regularidad de los despachos. También es posible que empresas logren aumentar su ICR por medio de sobre-ofertar buses en los servicios, lo que en nuestra metodología no se detecta. Otra razón posible es que cuando yo lo hago pésimo en el despacho, es difícil empeorar más. Si despacho puros buses juntos, es difícil que la irregularidad aumente y por lo tanto el coeficiente de variación de los intervalos de la empresa indicaría que sus servicios no empeoran.

A pesar de que el modelo presenta un bajo R cuadrado (1,5%) tenemos un valor p significativamente menor a 0,05, por lo que rechazamos la hipótesis nula en que los coeficientes de las variables son iguales a cero (o sea que el modelo hubiera sido no válido). Esto se debe principalmente a que a pesar de tener un R cuadrado bajo, el número de observaciones es alto, lo que robustece el modelo. Finalmente se demostró la ausencia de autocorrelación mediante el test de Breusch-Godfrey (resultados en Tabla 5-4). Dado que su valor p es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula en que los coeficientes de los errores son cero, por lo que los errores no están autocorrelacionados. A pesar del bajo R cuadrado, el modelo permite obtener conclusiones que parecen de alto valor y que por lo tanto amerita ser incluido en la tesis.

5.3. Modelo 2: diferencia con paradero menos 15

Este modelo y el siguiente presentan la relación entre la regularidad de un servicio en un paradero n cualquiera y el $n-p$ para un mismo servicio en cierta fecha, considerando las variables que afectan su comportamiento desde que se detuvo en el paradero $n-p$ hasta que se detiene en el paradero n . Dado esto, las variables deben mostrar información agregada que considere todos los paraderos entre n y $n-p$. El cálculo de estas variables se explica en el ANEXO D: GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS. Un cambio importante es que en este modelo las variables que capturan el efecto de la zona paga y de la presencia de corredor indican el porcentaje de paraderos entre n y $n-p$ (sin considerar este último) que son zona paga y/o se encuentran en corredor respectivamente.

Al igual que en el modelo anterior, primero se modeló la regresión completa presentada en el capítulo cuatro, considerando $p = 15$ e incluyendo todas las variables definidas ahí.

Luego se utilizó el mismo método para afinar el modelo a las variables relevantes y explicativas (*stepwise backward*). El modelo final es presentado en la Tabla 5-5. El detalle de los resultados se muestran en el ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Lo primero que salta a la vista es que el R cuadrado del modelo es muy superior al de la sección previa (11% versus 2%). Esto ocurre a pesar de que se cuenta con un número significativamente menor de observaciones. Esto se debe a que al considerar un distanciamiento mayor entre paraderos el modelo puede detectar efectos que son demasiado sutiles para el caso de paradas consecutivas. Asimismo, los errores de medición de los instantes en que el bus visita cada parada pierden importancia en comparación al tiempo de viaje entre ambas paradas.

La variable con mayor impacto en el modelo es la variable *VPROM*, y es a la vez de alta significancia estadística. Esto corrobora que si la velocidad es baja la irregularidad aumenta. A continuación aparece la desviación estándar de la velocidad. Esta variable representa todos los elementos que hacen que la velocidad en un trayecto varíe entre buses de un mismo servicio (como por ejemplo la detención en intersecciones

semaforizadas y con paradas). La variable presenta una suficiente significancia estadística para permanecer en el modelo.

Tabla 5-5: Resultados modelo 2

<i>Variable</i>	<i>Valor coeficiente</i>	<i>Media de variable</i>	<i>Contribución promedio</i> (valor coeficiente * media de variable)	<i>Valor t</i>
Intercepto	12,158	-	-	1,617
<i>VPROM</i>	-3,139	6,958	-21,841	-2,441
<i>VSD</i>	3,142	2,309	7,255	1,407
<i>DCo</i>	-18,693	0,011	-0,215	-1,877
<i>SNP</i>	1.192,133	0,002	2,722	2,046
<i>DZP</i>	-62,746	0,012	-0,774	-1,624
<i>DU₂</i>	10,887	0,157	1,706	3,352
<i>DU₃</i>	14,689	0,125	1,842	4,444
<i>DU₄</i>	4,586	0,194	0,892	1,517
<i>DU₅</i>	14,041	0,103	1,452	4,098
<i>DU₆</i>	11,725	0,260	3,051	3,969
<i>DU₇</i>	14,070	0,066	0,926	3,776
<i>DD₅</i>	3,248	0,282	0,916	2,014
Número Observaciones = 319				
<i>R</i>² ajustado = 11,31%				
F = 4,379				
Valor p = 1,88e-06				
Error estándar = 12,9				

Tabla 5-6: Test de autocorrelación modelo 2

<i>Test de autocorrelación Breusch-Godfrey</i>
LM test = 0,003
Valor p = 0,960

En temas de infraestructura vemos que el modelo corrobora que la presencia de zona paga y/o corredor segregado tienen un impacto positivo en la regularidad del sistema. Este impacto podría potenciar el efecto de aumentar la velocidad de operación y reducir su desviación estándar.

Al igual que el modelo anterior, a mayor demanda mayor es la irregularidad. En este caso la tasa de subida de pasajeros presenta una magnitud y significancia considerable, mientras que una tasa de baja de pasajeros mayor a la tasa de subida no presenta gran significancia, por lo que fue eliminada del modelo.

Por otro lado, todas las unidades de negocio presentaron una diferencia significativa y negativa respecto Inversiones Alsacia S.A.. Este caso muestra que Redbus Urbano S.A., Buses Vule S.A., Subus S.A., Buses Metropolitana S.A. y STP S.A. presentan un aumento más pronunciado en la irregularidad que Alsacia, siendo Buses Vule S.A. el líder y presentando Express de Santiago Uno S.A. una diferencia despreciable.

Una diferencia importante con el modelo 1 es la significancia estadística de la variable DD_5 . Esto muestra que existiría una diferencia significativa entre el día viernes y los otros 3 días de la semana considerados en el modelo, presentando el viernes un aumento de la irregularidad. Los otros días no presentaron una significancia estadística considerable, por lo que fueron eliminadas del modelo.

Es importante mencionar que la distancia entre paraderos no forma parte de las variables explicativas que permanecieron en el modelo por su bajo nivel de significancia.

En este caso el modelo presenta un valor p significativamente menor a 0,05, por lo que rechazamos la hipótesis nula en que los coeficientes de las variables son iguales a cero (o sea que el modelo no sería válido). Finalmente se demostró la ausencia de

autocorrelación mediante el test de Breusch-Godfrey (resultados en Tabla 5-6). Dado que su valor p es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula en que los coeficientes de los errores son cero, por lo que los errores no están autocorrelacionados.

5.4. Modelo 3: diferencia con paradero menos 25

En este caso se utilizó la misma metodología del modelo anterior, considerando $p = 25$. Al igual que en los modelos anteriores, primero se modeló la regresión presentada en el capítulo cuatro, incluyendo todas las variables definidas ahí. Luego se utilizó el mismo método (*stepwise backward*) para afinar el modelo a las variables relevantes y explicativas. El modelo final es presentado en la Tabla 5-7. El detalle de los resultados se muestran en el ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Lo primero que llama la atención, al igual que en el modelo anterior, es el considerable aumento del R cuadrado (17% versus 11%). Esto se debe a las mismas razones mencionadas con anterioridad: (i) al considerar un distanciamiento mayor entre paraderos el modelo puede detectar efectos que son demasiado sutiles para el caso de paradas consecutivas y (ii) los errores de medición de los instantes en que el bus visita cada parada pierden importancia en comparación al tiempo de viaje entre ambas paradas.

A partir de los resultados vemos que la variable *VPRM* presenta alta significancia estadística y el mayor impacto promedio sobre la regularidad. Mientras mayor es su valor, o sea mayor es la velocidad promedio, mejor es la regularidad del servicio. Es

importante mencionar que las variables *VSD* y *LS* fueron eliminadas del modelo por presentar signo contrario al esperado. La presencia de estas variables indicaba que mientras más alejados estuvieran los paraderos y mayor fuera la desviación estándar de la velocidad de los buses la regularidad mejoraba, lo que no tiene sentido con la realidad.

Tabla 5-7: Resultados modelo 3

<i>Variable</i>	<i>Valor coeficiente</i>	<i>Media de variable</i>	<i>Contribución promedio</i> (valor coeficiente * media de variable)	<i>Valor t</i>
Intercepto	30,074	-	-	2,053
<i>VPROM</i>	-3,569	6,842	-24,419	-1,780
<i>DCo</i>	-101,835	0,002	-0,187	-0,379
<i>SNP</i>	2.430,899	0,003	7,728	2,312
<i>DZP</i>	-105,685	0,021	-2,172	-0,916
<i>DU₅</i>	8,818	0,193	1,699	1,533
<i>DU₆</i>	11,799	0,266	3,140	2,090
<i>DD₅</i>	6,541	0,257	1,680	1,892
Número Observaciones = 109				
R^2 ajustado = 17,4%				
F = 4,248				
Valor p = 3,79E-04				
Error estándar = 15,4				

Tabla 5-8: Test de autocorrelación modelo 3

<i>Test de autocorrelación Breusch-Godfrey</i>
LM test = 1,190
Valor p = 0,275

Vemos además que *SNP* es la variable más significativa, y presenta una magnitud considerable. En este caso mientras mayor sea tasa de subida de pasajeros a los buses en paraderos no zona paga, peor es la regularidad del servicio. Esto tiene directa relación con el tiempo de detención del bus en el paradero, donde una mayor demanda se

convierte en una fuente importante de diferencia en tiempos de detención entre buses en un mismo paradero. Un bus precedido por un intervalo largo (lo que genera una alta acumulación de pasajeros) estará mucho tiempo detenido mientras que un bus precedido por un intervalo corto estará poco tiempo. Así, si hay mucha demanda este efecto se acentúa. Además, una mayor demanda podría generar más congestión en las puertas al momento de abordar y bajar. En este caso una tasa de bajadas mayor a la de subidas no presentó suficiente significancia estadística para permanecer en el modelo.

En temas de infraestructura vemos que el modelo corrobora que la presencia de corredor segregado y/o zona paga tiene un impacto positivo en la regularidad del sistema. Esto podría deberse por potenciar el efecto de un aumento en la velocidad de operación y reducción de su desviación estándar. A pesar de la baja significancia estadística de las zonas pagas, se decidió mantener la variable en el modelo para mostrar su efecto.

Por otro lado el impacto del día viernes es el contrario, donde la regularidad de un servicio empeora por características específicas de ese día.

Por último vemos que Redbus Urbano S.A. y Buses Metropolitana S.A. presentan un aumento de la irregularidad bastante mayor que los otros operadores. Esto es coherente con lo observado por García (2016) y que se ilustra en la Figura 3-8 de esta tesis. Las otras variables que representaban días u operadores fueron eliminadas del modelo por su baja significancia.

Este modelo presenta un R cuadrado del 17%, lo que es considerablemente mayor al modelo anterior. En este caso también tenemos un valor p significativamente menor a 0,05, por lo que rechazamos la hipótesis nula en que los coeficientes de las variables son iguales a cero (o sea el modelo no es válido). Finalmente se demostró la ausencia de autocorrelación mediante el test de Breusch-Godfrey (resultados en Tabla 5-8). Dado que su valor p es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula en que los coeficientes de los errores son cero, por lo que los errores no están autocorrelacionados.

5.5. Análisis de resultados

En las secciones anteriores hemos presentado tres modelos que buscan explicar la evolución a lo largo del recorrido de la gran irregularidad que presenta Transantiago. Vemos en la Figura 5-2 que al observar la evolución promedio de la irregularidad entre dos paraderos, mientras más alejados están estos últimos mayor es la diferencia, lo que es bastante intuitivo. Además se puede observar que mientras más alejados están los paraderos, una mayor proporción de la distribución de nuestra variable dependiente se concentra en el cuadrante positivo. Esto ilustra el comportamiento esperado, donde la irregularidad aumenta a medida que el bus completa su recorrido. Este fenómeno es capturado de forma más clara por el modelo 3, posiblemente debido a que se está analizando una evolución global y no local como en el caso del modelo 1, donde se presentan mayores fluctuaciones (tanto positivas como negativas) en la irregularidad.

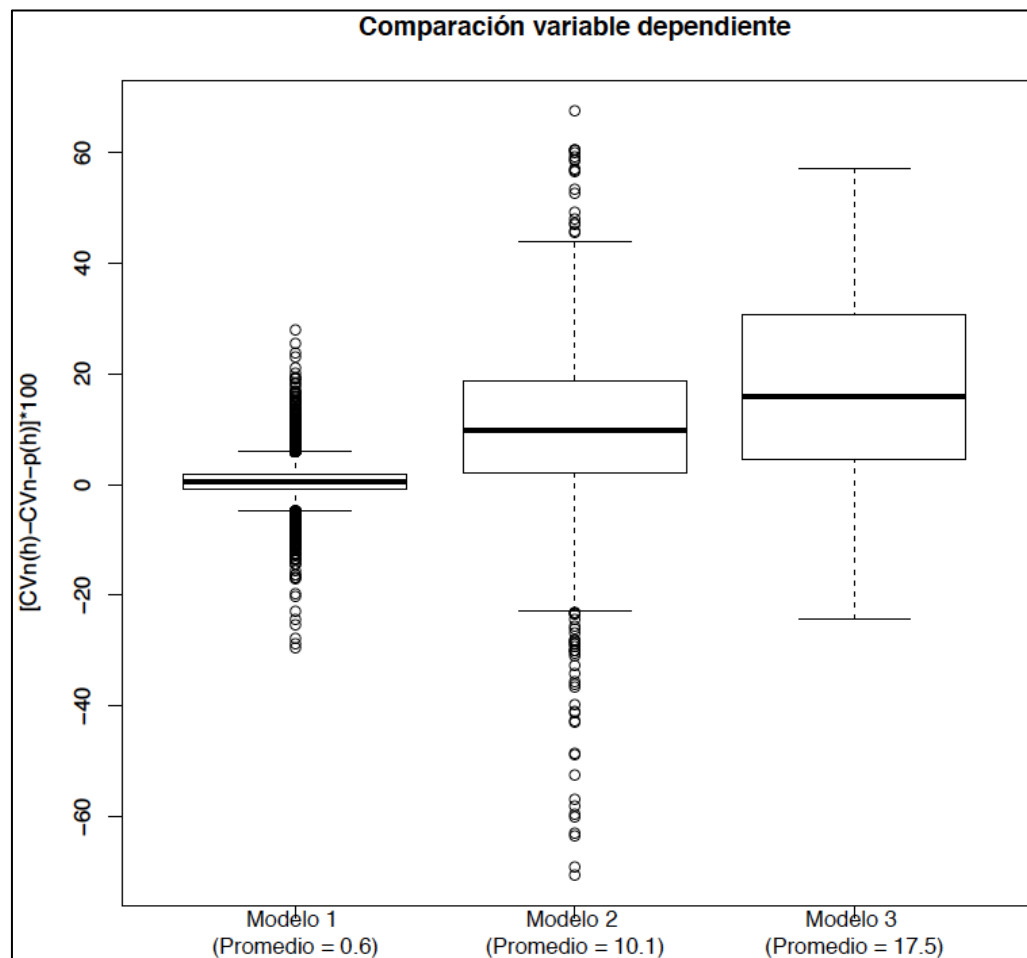


Figura 5-2: Comparación variable dependiente
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-9 se puede ver la comparación entre la contribución promedio de cada variable a cada modelo y su significancia dada por el valor t entre paréntesis.

El comportamiento que presenta la zona paga en el modelo no representa el real beneficio que esta infraestructura trae a los sistemas de transporte público. No solo presentó un signo contrario en el primer modelo, sino que además su significancia disminuye a medida que los paraderos observados son más distantes. Esto se puede

deber a la presencia de endogeneidad en el modelo. Es intuitivo pensar que las zonas pagas se instalan en puntos de mayor conflicto (por ejemplo mayor demanda, mayor desviación en las velocidades, etc.), por lo que la presencia de zona paga podría ser modelado en relación a estas variables. El incluir las variables antes mencionadas en un mismo modelo puede generar homogeneidad, lo que explicaría el signo incorrecto y su poca significancia. Esto puede ser corregido al modelar la probabilidad de que se construya una zona paga en función de las otras variables explicativas, y luego incluir en este modelo la estimación en vez del valor original.

Tabla 5-9: Resumen de resultados

<i>Contribución promedio (valor t)</i>	<i>Modelo 1</i>	<i>Modelo 2</i>	<i>Modelo 3</i>
Intercepto	(1,943)	(1,617)	(2,053)
<i>LS</i>	0,486(8,136)		
<i>VPROM</i>	-0,733(-5,728)	-21,841(-2,441)	-24,419(-1,78)
<i>VSD</i>	0,515(5,664)	7,255(1,407)	
<i>DCo</i>	-0,016(-2,266)	-0,215(-1,877)	-0,187(-0,379)
<i>HPROM</i>	-0,209(-1,601)		
<i>SNP</i>	0,015(0,76)	2,722(2,046)	7,728(2,312)
<i>EBNP</i>	0,017(-2,299)		
<i>DZP</i>		-0,774(-1,624)	-2,172(-0,916)
<i>DU₂</i>		1,706(3,352)	
<i>DU₃</i>	0,067(3,81)	1,842(4,444)	
<i>DU₄</i>		0,892(1,517)	
<i>DU₅</i>		1,452(4,098)	1,699(1,533)
<i>DU₆</i>	0,064(2,832)	3,051(3,969)	3,14(2,09)
<i>DU₇</i>	0,022(1,153)	0,926(3,776)	
<i>DD₅</i>		0,916(2,014)	1,68(1,892)
<i>R² ajustado</i>	1,5%	11,3%	17,4%

Otra variable importante es la congestión, capturada con el promedio de la velocidad de los buses operando. En los tres modelos presenta una significancia alta, por lo que su

contribución a la propagación de la irregularidad siempre es importante. Es posible concluir que mantener una alta velocidad promedio mejora considerablemente la regularidad de un servicio. Para aumentar la velocidad de un servicio se puede segregar el tráfico de los autos del flujo de buses, implementar zonas pagas, operar servicios expresos, otorgar prioridad en semáforos, etc.

Las paradas no programadas que sólo afectan a algunos buses también tienen gran influencia en la regularidad de un servicio, especialmente al comparar dos paraderos consecutivos. Esto es capturado en el modelo mediante la desviación estándar de la velocidad comercial, ya que al tener los buses que detenerse en momentos y por tiempos no programados (como detenerse en semáforos, ceda el paso, signo pare, etc.) va a generar diferencias en la velocidad comercial de los distintos buses, aumentando la desviación estándar.

Vemos que la demanda en paraderos sin zona paga es un factor que siempre influencia significativamente en la regularidad. Si analizamos la Tabla 5-9, vemos que en el modelo 1 una tasa de bajada mayor a la de subida impacta negativa y significativamente la regularidad de un servicio, mientras que en el modelo 2 y 3 no. Además en todos los modelos un aumento en la tasa de demanda aumenta la irregularidad del servicio (tener en cuenta que la variable *EBNP* es siempre negativa). Esto se debe principalmente a que una mayor demanda detiene el bus por mayor tiempo, lo que hace que el bus que lo antecede se le acerque y desregularice el servicio.

La distancia entre los paraderos observados pierde significancia a medida que analizamos paraderos más distantes. Cuando estamos en el modelo 1, al aumentar la distancia entre los paraderos la regularidad del servicio empeora, mientras que en el modelo 3 presentó el signo contrario, por lo que fue eliminada del modelo. Esto se puede deber a que a medida que consideramos un mayor número de paraderos, el aumento de la probabilidad de enfrentarse a un evento que afecte la variabilidad del servicio es capturado por otras variables, como la velocidad promedio de los buses, el tipo de infraestructura o el nivel de demanda.

El intervalo promedio teórico exigido por el DTPM influencia significativamente la regularidad solo en el primer modelo. En ese caso, a mayor intervalo promedio, lo que se traduce en una menor frecuencia, mejor es la regularidad del servicio. Esto tiene mucho sentido con el análisis de la sección 3.4, donde servicios con baja frecuencia no presentan problemas de irregularidad ni apelotonamiento de buses.

Vemos que al analizar el efecto entre dos paraderos, mientras más alejados estén, más significativo es el efecto del día viernes. Esto se puede deber a que el comportamiento del sistema en un día viernes afecta al recorrido completo, y su efecto se puede notar más significativamente al analizar una mayor proporción del recorrido, o sea analizar dos paraderos que estén más alejados.

El rendimiento relativo entre las distintas unidades de negocio se mantiene en los modelos 2 y 3, donde siempre lidera Redbus Urbano S.A. con la peor gestión de la

regularidad a lo largo del recorrido. A él lo siguen Buses Vule S.A. y Buses Metropolitana S.A. Esto es coherente con lo presentado por García (2016).

5.5.1. Efecto de cambios en el sistema

Es interesante utilizar este modelo para analizar los resultados esperables frente a cambio en el sistema, como un aumento de la demanda, implementación de corredor segregado, etc. Para esto analizaremos el efecto de distintos escenarios bajo los modelos 1 y 2, ya que el modelo 3 presenta una disminución significativa del número de observaciones.

Consideremos un escenario base para la operación de un servicio cualquiera:

- Velocidad comercial: 8 km/hr
- Desviación estándar de la velocidad: 5 km/hr
- Frecuencia: 9 buses/hr (intervalo promedio de 400 seg)
- Distancia entre paraderos: 300 mts
- Tasa de subida de pasajeros: 15 pax/hr
- Tasa de bajada de pasajeros: menor a la tasa de subida
- Tipo de infraestructura: tráfico mixto (sin presencia de corredor), sin zona paga
- Unidad de negocio: Buses Vule S.A.
- Día: miércoles

Para este servicio, sin importar en qué punto de la ruta nos encontremos, el CV de los intervalos de los buses de este servicio aumentará entre dos paraderos consecutivos en un 1,15% según el modelo 1, y entre el paradero $(n - 15)$ y el n en un 29%. Si se implementa una medida que logre aumentar la velocidad comercial de los buses a 20 km/hr, el nuevo CV según el modelo 1 aumentará en un 0,79%, y según el modelo 2 en

un 18,74%. Utilizando la ecuación (2-1), y considerando que el paradero ($n - 15$) presenta un $CV(h)^2$ igual a 34% (valor promedio presentado por OdT, 2014), la esperanza del tiempo de espera en el paradero ($n - 14$) disminuye aproximadamente de 271 segundos a 270 según el modelo 1, lo que multiplicado, por ejemplo, por 15 paraderos nos da una disminución de aproximadamente 13 segundos. Este beneficio está subestimado, ya que el mismo análisis realizado con la información del modelo 2 nos da un ahorro de 34 segundos.

Ahora, si se implementan medidas que logren aumentar la velocidad comercial a 30 km/hr, velocidad comercial que un bus puede alcanzar en corredor segregado si la frecuencia de detenciones fuera igual al metro (Fernández, 1996), el modelo 1 muestra un ahorro de 1,6 segundos entre paraderos consecutivos, mientras que el modelo 2 muestra un ahorro de 60 segundos. Estos ahorros son un poco menores respecto a un escenario donde la medida a implementar es la construcción de un corredor a lo largo del recorrido de este servicio, aumentando de la velocidad a 20 km/hr, donde los segundos ahorrados son 2 y 85 en los modelos 1 y 2 respectivamente, ilustrando los beneficios que trae un corredor sobre el aumento en velocidad.

Realizando el mismo análisis para la construcción de zonas pagas, si entre los paraderos ($n - p$) y n solo un 50% de los paraderos es transformado en zona paga, el ahorro en tiempo de espera es de 95 segundos (más de un 60% del exceso de tiempo de espera) según el modelo 2.

Estos resultados muestran un impacto significativo ante pequeñas medidas implementadas individualmente sobre un servicio. Si medidas de este tipo son implementadas a mayor escala, y considerando que varios servicios comparten infraestructura y el nivel de tráfico, el impacto puede ser enorme. Además es importante considerar que este impacto afecta a miles de usuarios diariamente, por lo que el beneficio social es aún mayor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El apelotonamiento de buses es conocido y vivido diariamente por los usuarios del Transantiago, fenómeno que afecta no sólo la satisfacción del usuario sino también la eficiencia operacional. Esta irregularidad es común en un sistema público, y encierra muchas interrogantes. Entre ellas están el cómo la medimos, qué variables influyen en ella, qué variables son más importantes, cómo mejorarla, etc. En esta investigación hemos propuesto medir la evolución de la regularidad del sistema de transporte público de Santiago, más conocido como Transantiago, en base a la diferencia entre los coeficientes de variación del intervalo entre buses consecutivos en distintos paraderos. Para eso se compone este indicador entre dos paraderos objetivos, y se analiza el comportamiento del sistema completo en base a las variables más importantes medibles para todo el sistema. A continuación se presentan conclusiones y recomendaciones prácticas al diseño de los recorridos de un sistema de transporte público, y conclusiones y recomendaciones metodológicas para estudios futuros.

6.1. Conclusiones y recomendaciones prácticas

Vemos que es posible estudiar la regularidad del sistema completo, utilizando información disponible en el Directorio de Transporte Público Metropolitano y en distintas instituciones educacionales. A pesar de ser muchas las variables que influyen la regularidad de un servicio, lo que representa un gran desafío, es posible considerar las más importantes para estudiar el comportamiento del sistema con resultados prometedores.

Para este estudio se analizaron dos situaciones: los factores que afectan la regularidad de un servicio en un lugar y tiempo determinado, y los factores que impactan en la evolución de la regularidad de un servicio. El primer modelo (modelo 0) presentó un R^2 de un 98%, donde la mayor parte de la variabilidad en un paradero es explicada por la variabilidad en el paradero anterior. Estos resultados muestran la importancia del despacho de los buses, lo que es consistente con lo presentado por García (2016) y Moreira-Matias et al. (2012).

El segundo tipo de modelo (modelos 1, 2 y 3), a pesar de presentar un R^2 bastante más bajo (17% en el mejor caso), sirve para identificar qué otros factores impactan en la variabilidad de los intervalos de los buses. Estos modelos ilustran la evolución de la regularidad de un servicio a lo largo de la ruta, independiente del punto en que se encuentre, por lo que un despacho regular de buses sigue siendo de vital importancia para que la evolución ocurra a partir del mejor escenario posible.

Los datos revelan que en términos de significancia y de impacto en la regularidad la velocidad juega un rol protagónico. Hemos visto que sin importar qué modelo estimemos, una mayor velocidad comercial promedio mejorará en forma importante la regularidad de un servicio. Por ejemplo entre 16 paraderos (modelo $n - 15$) un aumento de 8 km/hr a 20 km/hr puede disminuir el aumento o evolución de la esperanza del tiempo de espera en 34 segundos para los servicios que operen entre ellos. Este beneficio es capturado no solo por los operados gracias a una mayor eficiencia, sino también por

miles de usuarios que utilizan esos servicios. A su vez una mayor desviación estándar de las velocidades generará el efecto inverso, donde una mayor desviación se traduce en que los buses tendrán recorridos irregulares en términos de tiempo y espaciamiento entre buses, lo que puede darse por la presencia de intersecciones semaforizadas y otras detenciones no programadas. Este efecto se desvanece a medida que comparamos dos paraderos que se encuentran más alejados, caso en el que otras variables prevalecen por sobre la desviación estándar de la velocidad. Además vemos que la presencia de corredor segregado ayuda a la regularidad de Transantiago, a pesar de su baja significancia, efecto que pierde significancia pero que aumenta su magnitud al comparar dos paraderos más alejados. Esto posiblemente se debe a la pérdida de información al filtrar la base de datos para eliminar autocorrelación. De acuerdo al modelo 2, la implementación de un corredor con un consecuente aumento de la velocidad de 8 km/hr a 20 km/hr disminuye el aumento de la esperanza del tiempo de espera en 85 segundos (56% del exceso de tiempo de espera), lo que ilustra una mejora considerable del sistema. Estos resultados confirman los resultados presentados por otros autores, presentados en el capítulo 2, donde las intersecciones semaforizadas (Stermán y Schofer, 1976; Abkowitz y Engelstein, 1983, 1984; Arriagada et al., 2015), las condiciones de tráfico (Stermán y Schofer, 1976; Man y Wenquan, 2013) y el uso de vías exclusivas (Chen et al., 2009; Arriagada et al., 2015) son algunos de los principales factores que afectan la regularidad de un servicio.

Es por esto que se recomiendan las siguientes medidas para mejorar el servicio ofrecido por Transantiago: (i) controlar el efecto que genera la congestión vehicular sobre la

operación de un servicio y (ii) disminuir el tiempo que los buses deben estar detenidos en detenciones no programadas (por ejemplo intersecciones semaforizadas, señalética de ceda el paso, etc.). En el primer caso se puede utilizar dos enfoques, evitar vías congestionadas diseñando recorridos que minimicen el uso de vías con alto flujo vehicular, o generar la infraestructura necesaria para disminuir la congestión al menos de los buses de transporte público, como por ejemplo corredores segregados. En el segundo caso se podría reducir el tiempo de ciclo de los semáforos para que los buses estén detenidos menos tiempo.

Otro tipo de infraestructura que muestra impacto en la regularidad es la presencia de zonas pagas, donde la instalación de zonas pagas en 8 paraderos genera una disminución de 95 segundos en la evolución del CV. Como se explicó anteriormente, es posible que el efecto de la zona paga esté diluido por ser una variable endógena. Además es posible que el efecto de las zonas pagas sea capturado por otras variables de mayor envergadura, como la velocidad promedio de operación. Así, la construcción de zonas paga tiene un efecto positivo en la regularidad de los servicios de transporte público. Este fenómeno resultó no significativo en el estudio de Arriagada et al. (2015), lo que podría deberse también a la presencia de endogeneidad.

Respecto a la tasa de demanda en paraderos sin zona paga, vemos que su aumento influye negativamente en la regularidad, y bastante significativo si consideramos el efecto global. A mayor número de pasajeros mayor es el impacto en los tiempos de detención, lo que afecta la variabilidad de los tiempos de detención de los buses. Esto es

consistente con los resultados presentados por otros autores como Stermán y Schofer, (1976), Abkowitz y Engelstein, (1983, 1984), Strathman y Hopper (1993), Moreira-Matias et al. (2012), Man y Wenquan (2013) y Arriagada et al. (2015). Por lo tanto desde un punto de vista de la regularidad, es recomendable construir una mayor cantidad de zonas pagas, considerando paraderos específicos de alta demanda.

Por otro lado una mayor distancia entre paraderos tiene un impacto negativo en la evolución de la regularidad de los servicios entre esos paraderos, lo que confirma el resultado obtenido por Arriagada et al. (2015). Esto debido a que aumenta la probabilidad de enfrentar un evento que afecte negativamente en la regularidad, como accidentes de tránsito, intersecciones semaforizadas, etc. En Valencia et. Al (2011) se indica que dependiendo el escenario se propone utilizar un modelo de espaciamiento o una cota máxima de 700 metros, valor significativamente menor al máximo presentado en la **Tabla F-2**. En ese mismo estudio se presenta una metodología para estimar el espaciamiento óptimo entre paraderos.

Otro factor que aumenta la irregularidad localmente es un menor intervalo programado (alta frecuencia de buses), influencia que pierde significancia al comparar paraderos más alejados. Esto corrobora lo identificado por Moreira-Matias et al. (2012), Man y Wenquan (2013) y Arriagada et al. (2015), quienes mostraron que existe una relación positiva entre la frecuencia programada y el apelotonamiento de buses. Además Arriagada et al. (2015) identificó un aumento en la irregularidad de un servicio a medida que aumenta la distancia entre paraderos.

Respecto al desempeño de los operadores, vemos que el resultado, parece inconsistente con la información publicada por el DTPM (**Figura 3-6**). Esta discrepancia puede deberse a diferencias en la regularidad del despacho. Sin embargo nuestros resultados sí son consistentes con lo presentado por García (2016) en la Figura 3-8. Es importante mencionar que existen otros factores que afectan el desempeño de los servicios y que son ajenas a la operación, como la congestión de una vía, el número y tiempo de detención en intersecciones semaforizadas, la presencia de zona y/o corredor. Muchos operadores mencionaron que existen diferencias significativas en las características de los recorridos asignados a cada empresa. Por ejemplo un operador con recorridos que utilicen corredores segregados va a tener una ventaja sobre los que no al momento de querer gestionar la regularidad de sus servicios. Para evitar esto se recomienda rediseñar los índices de desempeño, considerando variables como la presencia de corredores y/o zonas pagas, niveles de congestión, etc., y que en lo posible sean medidos en más de tres puntos a lo largo del recorrido.

Existen otros efectos mencionados en la literatura que por el diseño de este estudio no fueron analizados. Por ejemplo, periodo del día (Strathman y Hopper, 1993; Strathman et al. 1999), características de la flota (Arriagada et al., 2015), características del conductor (Strathman y Hopper, 1993), y el comportamiento homogéneo entre buses consecutivos (Arriagada et al., 2015). La recolección de este tipo de información para un modelo de esta envergadura, que considera información de todo el sistema y no de un

subconjunto de servicios, sobrepasa los alcances de esta investigación, pero podría considerarse en el futuro.

6.2. Conclusiones y recomendaciones metodológicas

A pesar de haber logrado el objetivo de esta investigación, se podría haber utilizado un índice para medir la regularidad que sea más autoexplicativo. En un comienzo se modeló el exceso del tiempo de espera como variable dependiente, pero ésta no ajustaba un modelo razonable. Es por esto que finalmente se optó por el coeficiente de variación de los intervalos de los buses de cada servicio, valor que nos da una idea de la regularidad de un sistema considerando servicios de distintas frecuencias.

En términos de los factores que afectan la regularidad, es importante destacar el efecto de infraestructura especial, como zonas pagas y corredores segregados, sobre la regularidad de un servicio. Estas medidas ya han sido implementadas en Santiago, y acá podemos ver cómo afectan positivamente a la regularidad.

Para posibles estudios futuros que sigan esta línea de investigación se proponen las siguientes recomendaciones relacionadas con la metodología utilizada. Respecto a la información obtenida, tener información de más días y de más periodos durante el día enriquecería base de datos para por ejemplo analizar diferencias entre los horario punta, valle y normal, y permitiría obtener resultados más concluyentes respecto de algunos efectos cuya significancia estadística no resultó suficiente, por ejemplo diferencias entre

los días de la semana. Además se podría completar la información con detalle más específico para ciertos servicios específicos tipo, que sean seleccionados por representar a un subgrupo de los servicios, por ejemplo asilar el efecto sobre los servicios expresos. Así se podría realizar un modelo macro que analice todo el sistema y su regularidad, y otro modelo específico por tipo de servicio con información más detallada, como por ejemplo incluyendo el número de intersecciones semaforizadas entre los paraderos observados por las que un bus debe pasar. Estos puntos se salen del alcance de esta investigación, pero podrían enriquecer y complementar los resultados obtenidos.

Respecto a infraestructura especial para transporte público, es poca la información disponible en forma de base de datos, y recolectar la información para todo el sistema puede significar un costo muy elevado. Para analizar otro tipo de infraestructura que le dé prioridad al transporte público, como vías exclusivas y pista solo bus, sería de gran utilidad que se genere una base de datos que relacione paraderos o secciones de una ruta a este tipo de infraestructura. En relación a las zonas pagas, la posible presencia de endogeneidad puede estar subestimando su impacto positivo en la regularidad de un servicio, por lo que modelar la probabilidad de que un paradero sea zona paga para incluirlo en este estudio podría reforzar las recomendaciones de esta investigación.

Sería interesante también probar una metodología diferente, donde se analice la regularidad mediante redes neuronales u otro tipo de regresiones.

Finalmente la metodología utilizada en esta tesis para eliminar la presencia de autocorrelación en los modelos disminuyó considerablemente el tamaño de la muestra. La utilización de otra metodología para eliminar o corregir la presencia de autocorrelación, o una definición distinta de la variable dependiente (que no traslape información entre observaciones) podría ayudar a mantener el tamaño de la muestra original que era muy atractiva.

BIBLIOGRAFIA

Abkowitz, M., Engelstein, I., (1983). Factors affecting running time on transit routes. *Transportation Research Part A* 17A (2), 107–113.

Abkowitz, M., Engelstein, I., (1984). Methods for maintaining transit service regularity. *Journal of the Transportation Research Board* 961, 1-8.

Arriagada, J., Gschwender, A., y Munizaga, M., (2015). Modelación del fenómeno de apelotonamiento de buses usando datos masivos de posicionamiento y transacciones de pago. *Actas del XVII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 13-16 Octubre 2015, Santiago.

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., (1986). Definition of practices for bus on-time performance: preliminary study. *Transportation Research Circular 300*. TRB, National Research Council, Washington, DC.

Bates, J., J. Polak, P. Jones y A. Cook (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E*, 37, 191-229.

Beltrán, P., Gschwender, A., & Palma, C., (2013). The impact of compliance measures on the operation of a bus system: The case of Transantiago. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 79–89.

Camus, R., Longo, G., Macorini, C., (2005). Estimation of transit reliability level-of-service based on automatic vehicle location data. *Journal of the Transportation Research Board* 1927, 277–286.

Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., & Guo, J., (2009). Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(8), 722–734.

Chen, C., Skabardonis, A., & Varaiya, P. (2003). Travel-time reliability as a measure of service. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1855), 74-79.

Cohen, S. (1984). Indicateurs d'allure et de consommation d'un autobs en exploitation. Recherche Transport Sécurité, Janvier, 16-22.

Daskalakis, N., Stathopoulos, A., (2008). Users' perceptive evaluation of bus arrival time deviations in stochastic networks. Journal of Public Transportation, Vol. 11, No. 4.

Delgado, F., Muñoz, J. C., y Giesen, R. (2016). BRRT: adding an R for reliability. En J. C. Muñoz, L. Paget-Seekins, *Restructuring Public Transport Through Bus Rapid Transit: An International and Interdisciplinary Perspective* (pp. 317-336). UK: Policy Press.

Directorio de Transporte Público Metropolitano (2012). Informe de gestión 2012. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-29-20-33-57/informes-de-gestion>

Directorio de Transporte Público Metropolitano (2016). Ranking calidad de servicio de empresas concesionarias de Transantiago. Trimestre abril – junio 2016 - N°16. Recuperado de <http://transantiago.cl/dtpm/index.php/estudios>

Fernández, R. (1999). Medidas de prioridad al transporte público. Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago, 419-429.

García, D. (2016). Modelo mixto de diseño operacional para el inicio de un recorrido de buses. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Gibson, J., Baeza, I. y Willumsen, L.G. (1989). Bus stops, congestion and congested bus stops. Traffic Engineering and Control. Vol. 30(6), 291-196.

Hess D.B., Brown, J., y Shoup, D. (2003). Waiting for the bus. TRB Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Holroyd E.M. y Scraggs D.A. (1966). Waiting Time for Buses in Central London, Traffic Engineering and Control, 8:158-160.

Hounsell, N. y McLeod, F. (1998). AVL implementation application and benefits in the U.K. Paper presented the 77th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.D. January 11-15.

- Johnson, R. M., Reiley, D. H., & Muñoz, J. C. (2015). "The War For The Fare": How Driver Compensation Affects Bus System Performance. *Economic Inquiry*, 53(3), 1401-1419.
- Kittelson & Associates, KFH Group, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglass, Hunter-Zaworsk, K., (2003). Transit capacity and quality of service manual, In: Edition, n. (Ed.). TRB Transportation Research Board, Washington D.C., USA.
- 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.
- Lee, D. H., Sun, L., & Erath, A. (2012). Study of bus service reliability in Singapore using fare card data. In 12th Asia-Pacific ITS Forum & Exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia.
- 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.
- Man, Z. y Wenquan, L. (2013). Factors affecting headway regularity on bus routes. *Journal of Southeast University*, 29, 99-102.
- Moreira-Matias, L., Ferreira, C., Gama, J., Mendes-Moreira, J., & de Sousa, J. F. (2012). Bus bunching detection by mining sequences of headway deviations. In *Industrial Conference on Data Mining* (pp. 77-91). Springer Berlin Heidelberg.
- Munizaga, M., y Palma, C. (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., Batarce, M., y Torres, I. (2016). Comparación del Nivel de Servicio del Transporte Público de Seis Ciudades Latinoamericanas. *Ingeniería de Transporte*, 18(1).
- OdT (2014) Observatorio Transantiago: Primer Reporte Análisis Tiempo De Espera 2013. Recuperado de <http://obstransantiago.wix.com/obstransantiago>.
- Osuna E.E. and Newell G.G. (1972). Control strategies for an idealized public transportation system, *Transportation Science*, 6:52-72.
- TCRP Report 100, Transportation Research Board, National Research Council.

Schneider, C. (2013). Análisis de la influencia de distintos tipos de prioridad al transporte público y del ancho de vía a través de modelos lineales de tiempo de viaje utilizando datos del sistema de transporte público de Santiago. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Transporte, Universidad de Chile.

Sterman, B., & Schofer, J., (1976). Factors affecting reliability of urban bus services. *Transportation Engineering Journal* 102, 147–159.

Strathman, J., & Hopper, J., (1993). Empirical analysis of bus transit on-time performance. *Transportation Research Part A* 27A (2), 93–100.

Strathman, J., Dueker, K.J., & Kimpel, T., (1999). Automated bus dispatching, operations control, and service reliability baseline analysis. *Journal of the Transportation Research Board* 1666, 28–36.

Transport for London (2014). “London Buses Quality of Service Indicators – Route Results for London Buses Services” London, UK. Firth Quarter 2016/17 1st April 2016-24th June 2016”.

Valencia, A. y Fernández, R. (2007). Representación macroscópica de la operación segregada del transporte público de superficie. *Actas del XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 22-26 Octubre 2007, Santiago.

Valencia A. y Fernández, R. (2011). Influencia del espaciamiento de paraderos en la velocidad comercial en corredores de transporte público de superficie. *Actas del XV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 3-6 Octubre 2011, Santiago.

Vuchic, V. (2005). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. John Willey and Sons. New Jersey.

Welding, P.I. (1957). The Instability of a Close-Interval Service. *Operational Research Quarterly*, 8, 133-142.

ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE GESTIÓN

	Total Buses y Metro	U1: Alsacia (a)	U2: SuBus (b)	U3: Vule (c)	U4: Express (d)	U5: Metropolitana(e)	U6: RedBus(f)	U7: STP(g)	Metro
		Alsacia	SuBus	Vule	Express	Metropolitana	RedBus	STP	
Enero	129.053.365	9.319.340	12.237.731	14.047.455	17.252.900	15.422.593	7.390.093	4.725.931	48.657.322
Febrero	102.780.327	7.375.950	9.987.141	11.342.096	13.657.054	12.135.967	6.008.115	3.708.981	38.565.023
Marzo	146.572.876	10.289.712	14.191.504	15.702.732	18.900.591	17.526.064	8.523.562	5.324.474	56.114.237
Abril	141.388.345	9.795.104	13.762.504	15.358.260	17.672.867	16.635.527	8.058.012	5.118.910	54.987.161
Mayo	149.743.094	10.565.469	14.661.931	16.229.222	18.381.407	17.577.485	8.446.382	5.368.809	58.512.389
Junio	146.463.353	10.285.717	14.637.111	16.031.919	17.838.085	17.036.013	8.243.887	5.159.992	57.230.629
Julio	139.520.704	10.242.132	14.052.800	15.483.145	16.855.127	16.308.795	7.811.799	5.014.069	53.752.837
Agosto	152.612.722	11.038.542	15.904.227	16.827.639	18.163.068	17.402.769	8.535.858	5.354.246	59.386.373
Septiembre	131.132.414	9.561.876	15.458.151	14.901.401	15.649.577	13.210.409	7.403.393	4.703.218	50.244.389
Octubre	155.519.559	11.218.685	18.104.748	17.361.228	18.784.041	15.508.981	8.691.068	5.525.568	60.325.240
Noviembre	146.447.168	10.537.799	17.096.685	16.598.145	17.913.795	14.676.823	7.955.326	5.286.037	56.382.558
Diciembre	143.095.567	10.123.153	16.635.490	16.390.736	17.562.282	14.402.092	8.066.273	5.264.869	54.650.672
Total	1.684.329.494	120.353.479	176.730.023	186.273.978	208.630.794	187.843.518	95.133.768	60.555.104	648.808.830

Figura A-1: Transacciones por Unidad de Negocio (2012)

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

	Transacciones por tipo de usuario			Transacciones por tipo de tarifa			
	Adulto	Estudiante educación media o superior	Estudiante educación básica	Horario punta (1)	Horario valle (2)	Horario baja	Total
2010	921.884.617	221.097.221	44.373.395	334.067.362	724.233.102	129.054.769	1.187.355.233
2011	832.609.904	214.462.519	40.811.599	309.095.480	663.450.864	115.337.678	1.087.884.022
2012	789.678.265	209.641.224	36.201.175	297.751.547	623.887.589	113.881.528	1.035.520.664
ene-12	63.957.081	14.670.616	1.768.346	23.707.497	47.132.291	9.556.255	80.396.043
feb-12	56.937.988	7.210.579	66.737	19.315.258	37.289.548	7.610.498	64.215.304
mar-12	69.914.278	17.764.765	2.779.596	26.396.783	54.350.492	9.711.364	90.458.639
abr-12	63.610.719	19.172.887	3.617.578	24.906.572	52.135.623	9.358.989	86.401.184
may-12	66.067.333	21.164.441	3.998.931	26.965.332	54.352.877	9.912.496	91.230.705
jun-12	68.082.394	18.132.068	3.018.262	25.744.022	54.295.615	9.193.087	89.232.724
jul-12	66.404.215	16.241.457	3.122.195	24.182.671	52.570.018	9.015.178	85.767.867
ago-12	70.281.105	19.378.774	3.566.470	27.757.752	55.469.129	9.999.468	93.226.349
sep-12	60.553.699	17.130.029	3.204.297	21.224.275	51.383.147	8.280.603	80.888.025
oct-12	70.604.523	20.850.875	3.738.921	28.258.331	56.097.276	10.838.712	95.194.319
nov-12	66.567.638	19.813.398	3.683.574	26.069.019	53.438.677	10.556.914	90.064.610
dic-12	66.697.292	18.111.335	3.636.268	23.224.035	55.372.896	9.847.964	88.444.895

Figura A-2: Transacciones en buses por mes y usuario (2010-2012)

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

	2009	2010	2011	2012
Enero	78,3%	90,5%	93,7%	93,1%
Febrero	81,1%	91,0%	94,5%	92,9%
Marzo	82,6%	89,4%	95,4%	92,2%
Abril	85,0%	92,9%	94,5%	
Mayo	86,4%	92,8%	95,1%	
Junio	87,2%	93,2%	95,5%	93,7%
Julio	89,2%	94,8%	95,6%	95,0%
Agosto	87,8%	93,1%	95,5%	94,3%
Septiembre	88,2%	93,9%	94,8%	93,0%
Octubre	91,1%	94,5%	94,1%	94,1%
Noviembre	90,6%	94,4%	94,1%	94,5%
Diciembre	87,0%	94,6%	92,4%	95,0%

Figura A-3: Índice cumplimiento frecuencia histórico

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

	2009	2010	2011	2012
Enero	78,0%	84,7%	89,0%	89,8%
Febrero	78,5%	86,0%	89,7%	90,3%
Marzo	79,6%	81,8%	87,6%	0,0%
Abril	80,7%	82,9%	87,7%	
Mayo	82,8%	83,2%	87,3%	
Junio	83,6%	84,1%	87,5%	84,5%
Julio	85,4%	85,9%	88,3%	83,4%
Agosto	84,2%	84,9%	88,2%	82,5%
Septiembre	83,5%	86,2%	88,6%	81,6%
Octubre	83,5%	88,3%	88,5%	82,1%
Noviembre	82,9%	88,6%	88,7%	82,3%
Diciembre	81,1%	88,8%	88,0%	83,2%

Figura A-4: Índice cumplimiento regularidad histórico

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

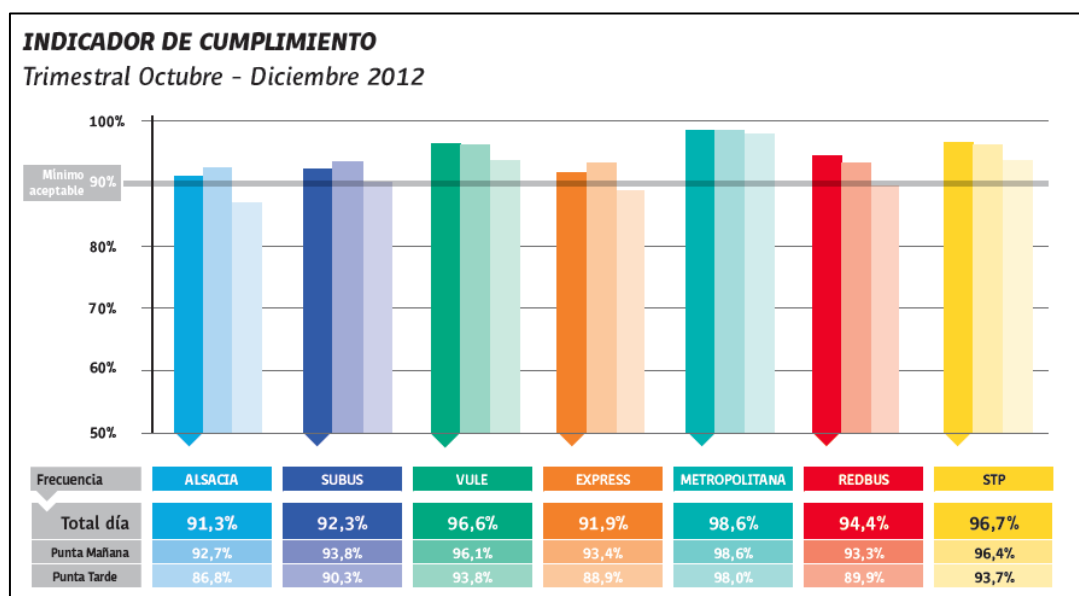


Figura A-5: Indicador ICF (trimestral oct–dic 2012)

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

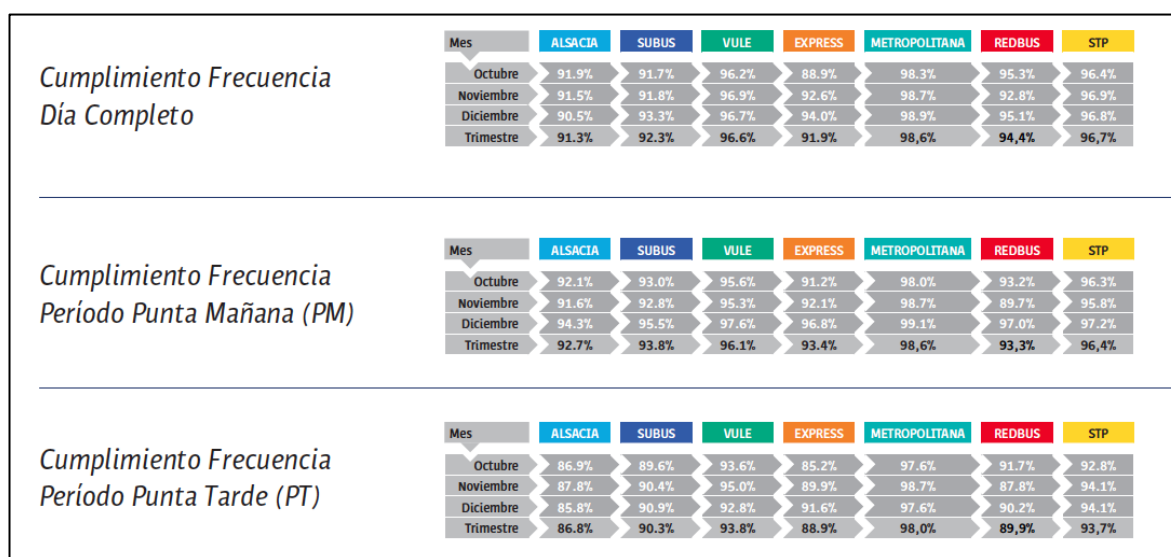


Figura A-6: Porcentajes cumplimiento frecuencia (oct–dic 2012)

Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

Cumplimiento Regularidad Día Completo		Mes	ALSACIA	SUBUS	VULE	EXPRESS	METROPOLITANA	REDBUS	STP
		Octubre	76.3%	79.8%	86.4%	77.6%	87.1%	83.9%	83.3%
		Noviembre	75.8%	79.7%	86.3%	79.2%	87.7%	83.0%	84.7%
		Diciembre	75.8%	82.2%	86.2%	82.2%	87.9%	83.7%	84.8%
		Trimestre	76.0%	80.6%	86.3%	79.7%	87.6%	83.5%	84.3%

Cumplimiento Regularidad Período Punta Mañana (PM)		Mes	ALSACIA	SUBUS	VULE	EXPRESS	METROPOLITANA	REDBUS	STP
		Octubre	75.1%	77.9%	80.8%	78.6%	86.4%	80.9%	83.2%
		Noviembre	75.0%	78.8%	80.4%	79.2%	87.0%	78.6%	83.6%
		Diciembre	77.9%	83.0%	83.1%	85.6%	88.7%	83.9%	86.2%
		Trimestre	76.0%	79.9%	81.5%	81.2%	87.4%	81.1%	84.4%

Cumplimiento Regularidad Período Punta Tarde (PT)		Mes	ALSACIA	SUBUS	VULE	EXPRESS	METROPOLITANA	REDBUS	STP
		Octubre	72.8%	76.9%	81.1%	76.2%	86.6%	80.1%	78.3%
		Noviembre	73.2%	77.5%	80.7%	78.3%	86.9%	78.8%	80.1%
		Diciembre	73.1%	79.9%	81.3%	81.4%	86.7%	80.0%	80.7%
		Trimestre	73.0%	78.1%	81.1%	78.6%	86.7%	79.6%	79.7%

Figura A-7: Porcentajes cumplimiento regularidad (oct–dic 2012)
Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

Alsacia		SUBUS				Vule					Express				Metropolitana			Redbus			STP	
101	119	201	228	217e	G15	301	E05	H05c	I05c	I21	401	428	428e	D17	501	514c	J14n	B01	B20	C10e	F01	F18
102	120	202	229	218e	G16	302	E06	H06	I06	I22	401n	429	431v	D18	502	515n	J14c	B02	B21	C11	F01c	F19
103	121	203	201c	219e	G17	303	E07	H07	I07	I23	402	435	413v		503	J01	J15c	B03	B22	C11c	F02	F20
104	122	204	201e	221e	G18	307	E08	H08	I08		403	404c	D01		504	J01c	J16	B04	B23	C12	F03	F21
105	125	205	201ec	222e	G19	308	E09	H09	I08c		404	405c	D02		505	J02	J17	B04v	B24	C13	F03c	F22
106	126	206	202c	224c	G22	314	E10	H11c	I09		405	406c	D03		506	J03	J18	B05	B25	C14	F05	F23
107	408	207	203e	G01	G17	301c	E11	H12	I09c		406	413c	D05		507	J04	J18c	B06	B26	C15	F06	F24
108	410	208	204e	G02	G18	301c2	E12	H13	I09e		407	425c	D06		508	J04c	J19	B07	B27	C16	F07	F25
109	101c	209	205c	G03	G19	301e	E13	H14	I09v		409	426c	D07		509	J05	J19c	B08	B28	C17	F08	F25e
109n	107c	210	205e	G04	G22	302e	E14	H15	I09n		411	427c	D07c		510	J06		B09	C01	C18	F09	F26
110	110c	211	206e	G05		303e	E15	H17	I10		412	428c	D08		511	J07		B10	C01c	C19	F10	
111	113e	212	207c	G07		307e	E15c	H18	I11		418	429c	D08c		513	J07c		B11	C02	C20	F11	
112	117c	213	207e	G08		312e	E16	I01	I12		419	431c	D09		514	J07e		B12	C02c	C21n	F12	
112n		216	208c	G08v		313e	E17	I02	I13		421	408e	D10		502c	J08		B13	C03	C22	F12c	
113		223	209e	G09		315e	E18	I03	I14		422	410e	D11		503c	J08c		B14	C04	C23	F13	
114		224	211c	G10		E01	H01	I03c	I15		423	414e	D12		503v	J10		B15	C05		F13c	
115		224N	211e	G11		E02	H02	I04	I16		424	415e	D13		506e	J11		B16	C06		F14	
116		225	214e	G12		E03	H03	I04c	I17		425	416e	D14		506v	J12		B17	C07		F15	
117		226	213	G13		E03v	H04	I04e	I18		426	417e	D15		507c	J13		B18	C08		F16	
118		227	213e	G14		E04	H05	I05	I20		427	420e	D16		510c	J13c		B19	C09		F17	

Figura A-8: Servicios por empresas 2012
Fuente: Informe de gestión 2012, Directorio de Transporte Público Metropolitano

ANEXO B: SERVICIO OBJETIVO

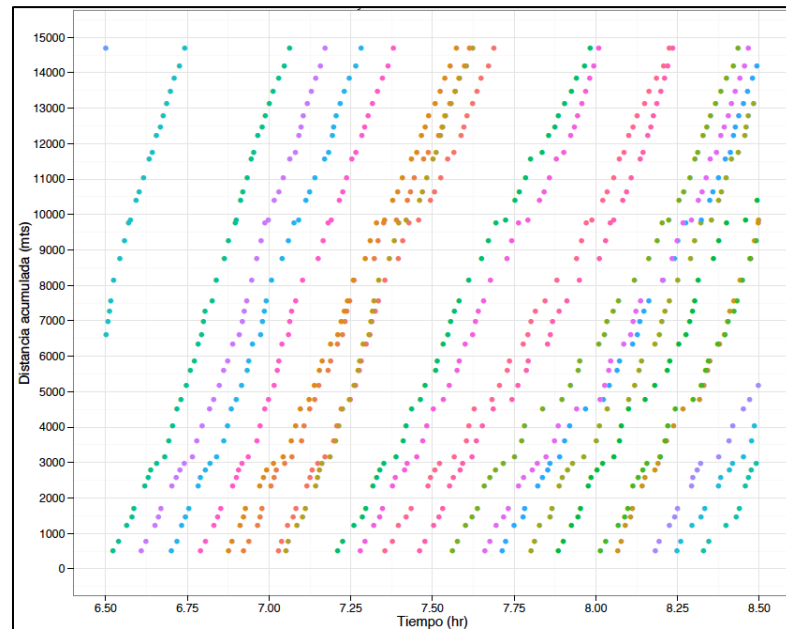


Figura B-1: Trayectoria servicio C16I (18-oct-2012)
Fuente: Elaboración propia

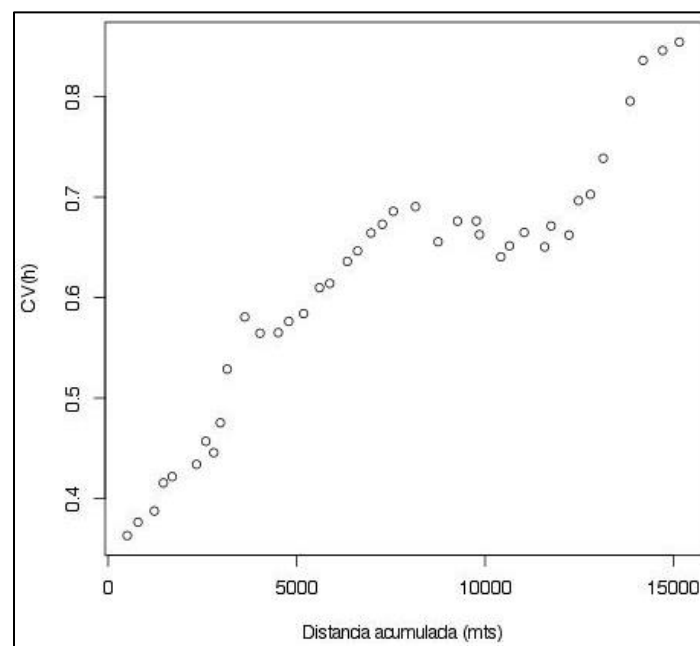


Figura B-2: CV(h) servicio C16I (18-oct-2012)
Fuente: Elaboración propia

ANEXO C: DEPURACIÓN DE SERVICIOS

Para analizar la evolución de los intervalos a lo largo de un recorrido, es necesario contar con intervalos que sean comparables entre un paradero y otro. Por eso es importante considerar la evolución de un mismo intervalo a lo largo de la ruta, pudiendo este ser formado por distintos pares de buses a lo largo de la ruta. Distintos porque puede ocurrir un cambio de buses que forman un intervalo cuando ocurre un adelantamiento.

En las siguientes figuras se muestra la metodología utilizada para filtrar los viajes de los buses para obtener intervalos comparables. Esta metodología está limitada por la información disponibles (pasadas de buses a lo largo del recorrido entre las 6.30 am y las 8.30 am).

Primero es necesario identificar las distintas expediciones. Esto es, identificar cada viaje que realiza un bus, como se muestra en la Figura C-1.

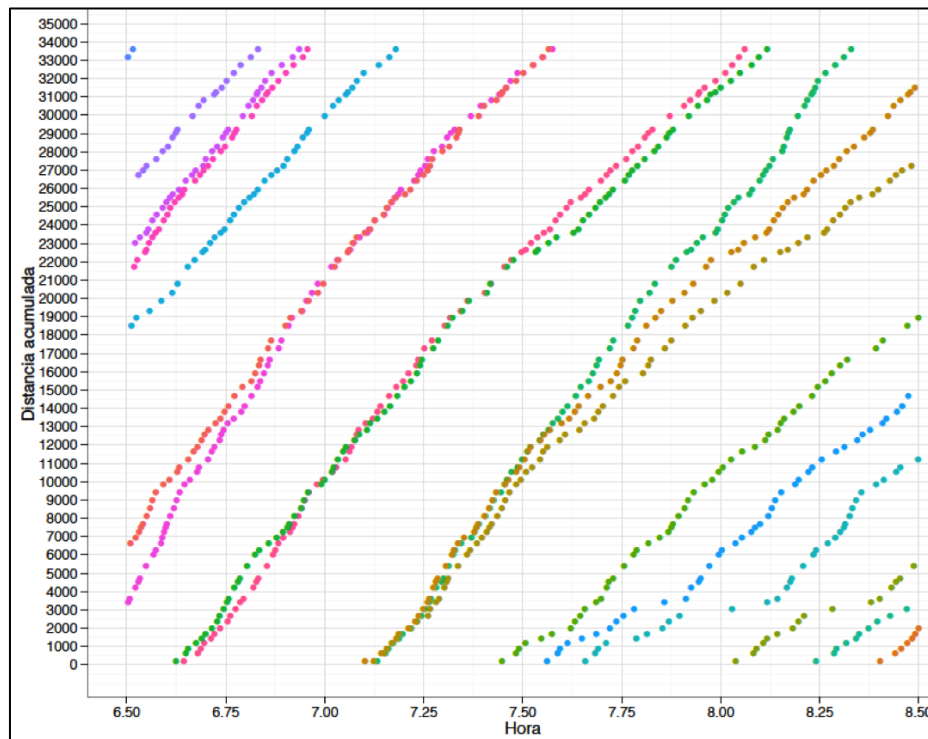


Figura C-1: Depuración de servicios (paso 1)

Fuente: Elaboración propia

Luego eliminamos las expediciones (y sus intervalos) que comenzaron antes de las 6.30 am, ya que se pierde información de los primeros paraderos (Figura C-2). Es importante destacar que si un bus comenzó su viaje luego de las 6.30, pero adelantó a un bus que lo comenzó antes, los intervalos generados por ese par de buses son eliminados también de la base de datos. Esto se realiza identificando el primer bus que comienza el recorrido a partir de las 6.30, y los buses que comienzan el recorrido después de él (observando solo el primer paradero). Así al analizar los siguientes paraderos aguas abajo, es fácil identificar los intervalos generados por buses que no fueron identificados en el primer paraderos, eliminándolos de la base de datos.

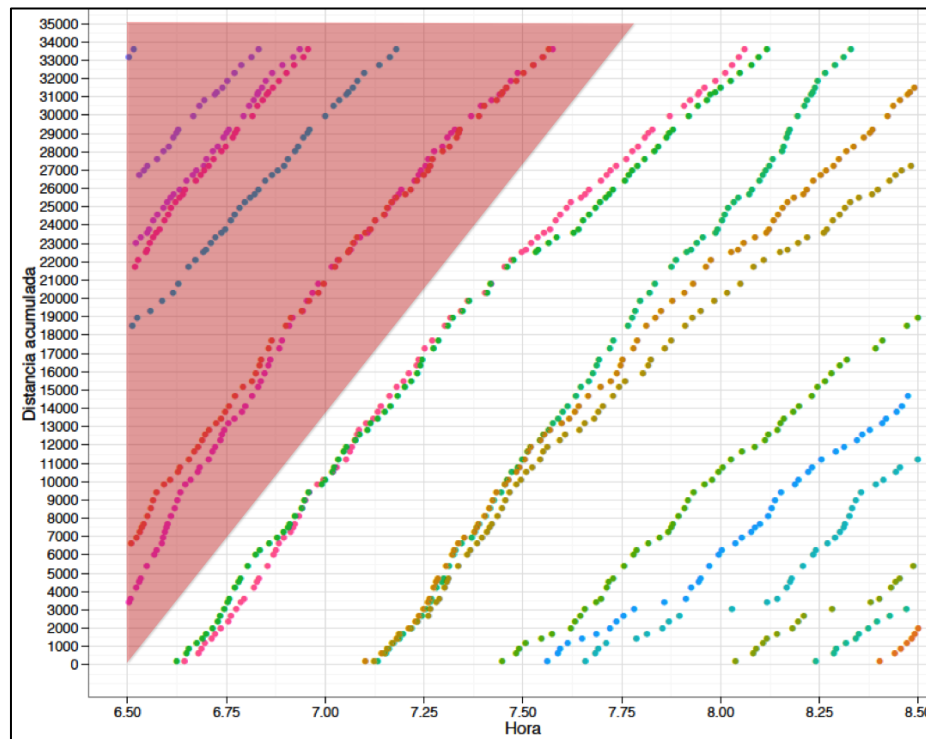


Figura C-2: Depuración de servicios (paso 2)

Fuente: Elaboración propia

Después identificamos las expediciones que completaron el recorrido después de las 8.30 am, ya que en este caso se pierde la información de pasada por los últimos paraderos. Dado que pueden ocurrir adelantamientos, si un bus, que comenzó y terminó su recorrido dentro del periodo de tiempo estudiado, adelanta a un bus que termina el recorrido después de las 8.30 am, la expedición de ese bus también debe ser eliminada, ya que esto altera el orden de llegada de los buses (

Figura C-3). Esto a su vez altera los buses involucrados en los intervalos observados, dificultando su posterior análisis. Con esto obtenemos el segundo grupo de expediciones a eliminar de la muestra. En la

Figura C-4 se ilustra como al final de este proceso quedamos con un grupo de buses que generan intervalos comparables. Como se ve en el ejemplo, es posible terminar solo con un intervalo para cierto servicio-fecha, por lo que se consideraron observaciones servicio-fecha que mantuvieran al menos tres intervalos a lo largo del recorrido.

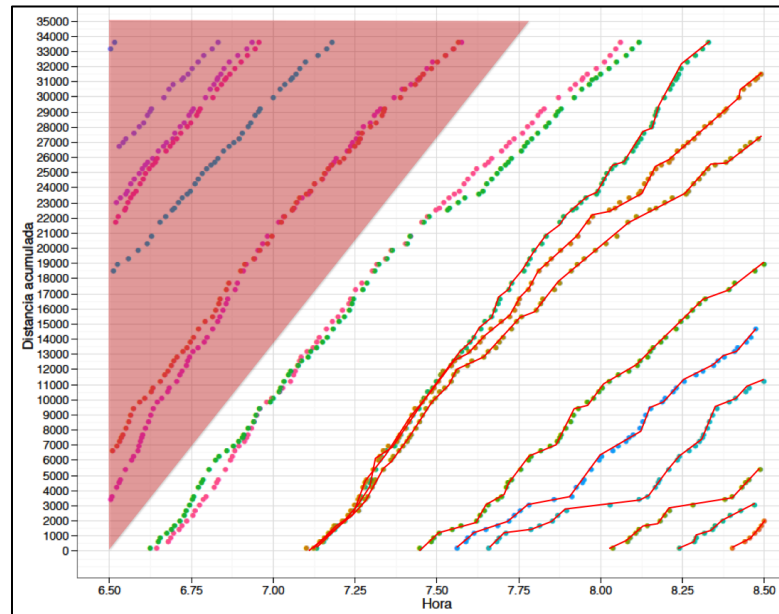


Figura C-3: Depuración de servicios (paso 3)
Fuente: Elaboración propia

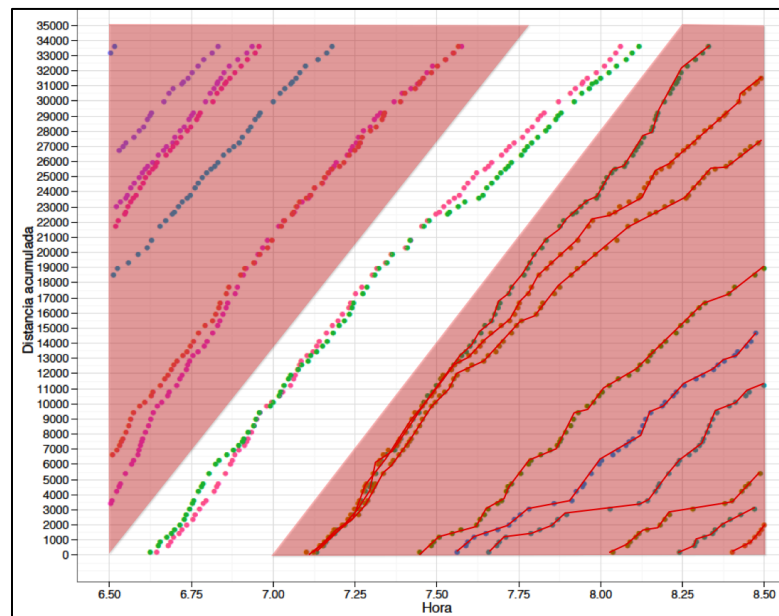


Figura C-4: Depuración de servicios (paso 4)
Fuente: Elaboración propia

ANEXO D: GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Luego de seleccionar los intervalos necesarios para nuestro análisis (ANEXO C: DEPURACIÓN DE SERVICIOS), se procede a (i) calcular la variable dependiente para cada paradero, (ii), calcular las variables independientes para cada paradero y finalmente (iii) asignar las variables correspondientes que influyen en la regularidad de cada paradero. Esto se realiza para cada servicio-fecha.

A continuación se explica gráficamente los pasos recién mencionados. Primero, para poder analizar la regularidad de los servicios, es necesario identificar para cada servicio las distintas expediciones que forman parte del estudio (Figura D-1).

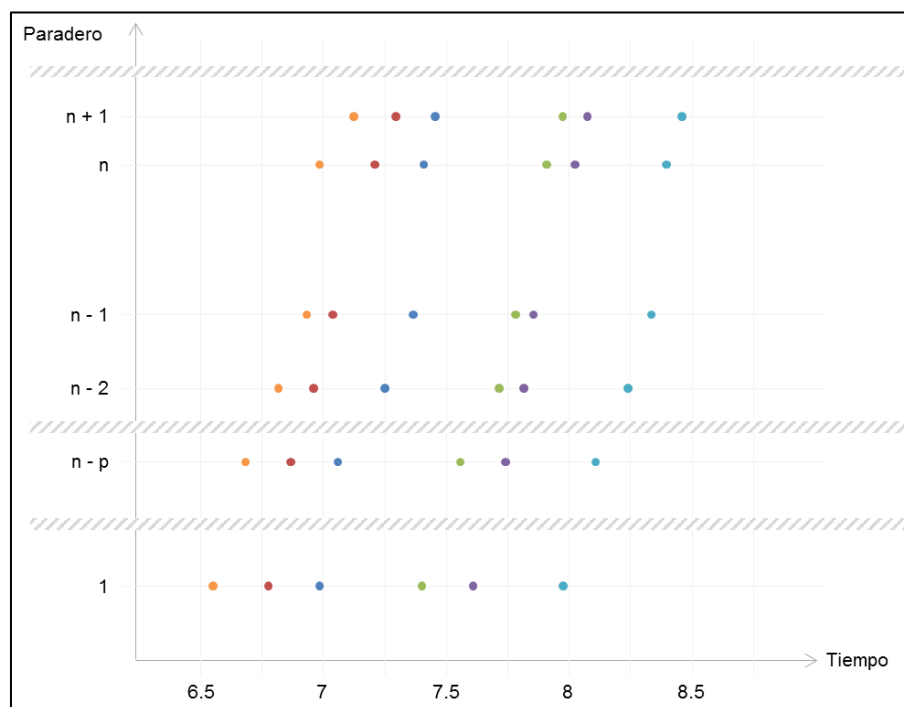


Figura D-1: Trayectorias (distancia-tiempo)
Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la variable dependiente presentada en la ecuación (2-2) se calculan $E(h)$ y $V(h)$ en cada paradero según los intervalos generados por los buses involucrados (

Figura D-2). De manera similar se calcularon la velocidad promedio y la desviación estándar de la velocidad. Estas variables fueron calculadas a partir de las velocidades con que llegan los buses a su paradero destino (

Figura D-3). En el caso del cálculo de la tasa de demanda promedio (Figura D-4), tanto de subida como de bajada, se calculó el promedio ponderado considerando el tamaño del intervalo.

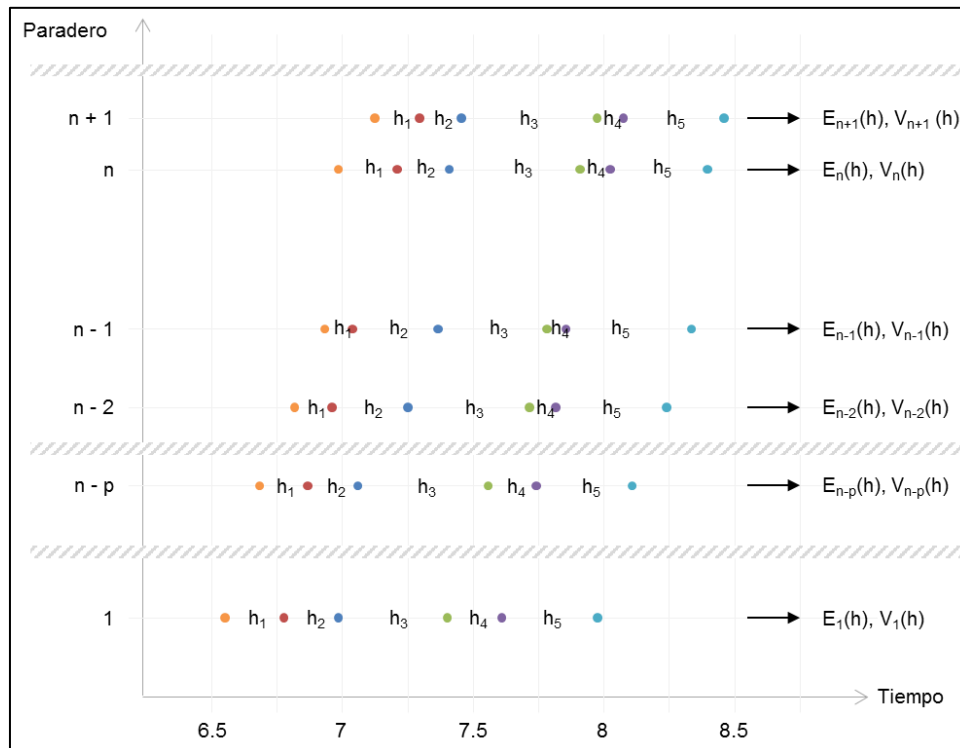


Figura D-2: Cálculo variable dependiente
Fuente: Elaboración propia

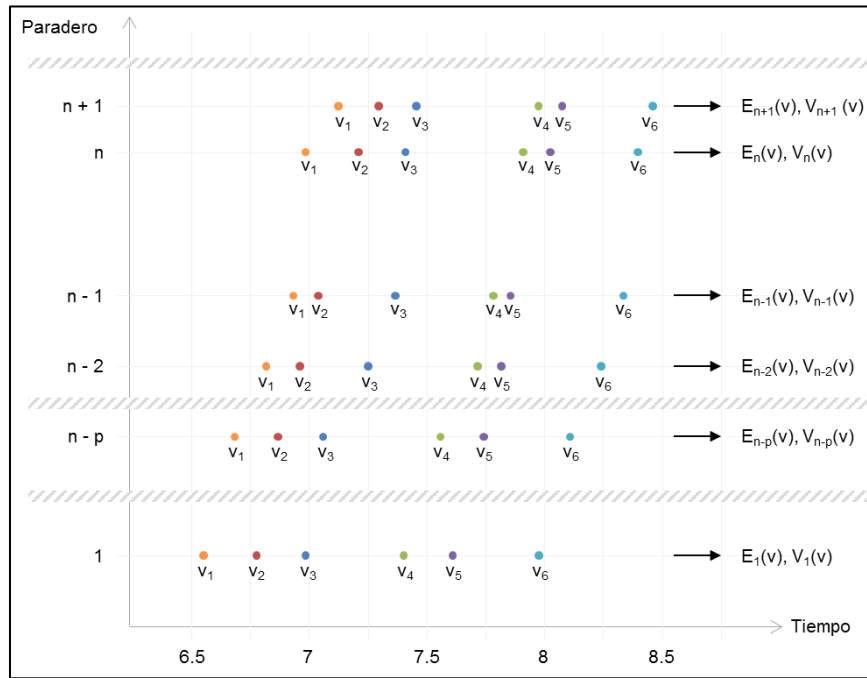


Figura D-3: Cálculo velocidad promedio y su desviación estándar
Fuente: Elaboración propia

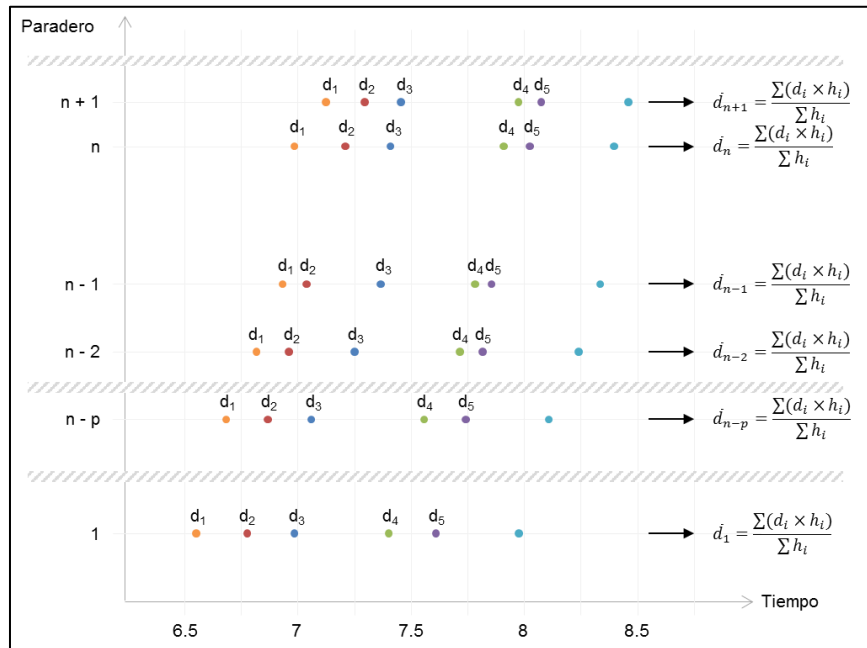


Figura D-4: Cálculo tasas de demanda
Fuente: Elaboración propia

Así, obtenemos las características propias de cada paradero. Variables como la presencia de zona paga, corredor, el operador, día de la semana y frecuencia teórica son propias del paradero, servicio o fecha, por lo que no es necesario calcular una variante por paradero.

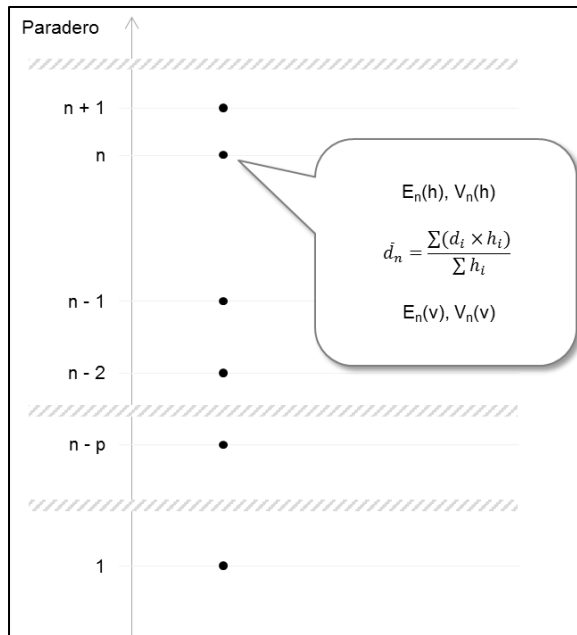


Figura D-5: Resumen información por paradero
Fuente: Elaboración propia

Ahora, si pensamos en el modelo presentado en la ecuación (4-1), las variables que influyen sobre la regularidad de un paradero n son los factores que enfrenta el bus desde que se detuvo en un paradero anterior $n-p$ hasta que se detuvo en el paradero n . Al pensar en esto es importante no olvidar que el bus se detiene por cierto periodo de tiempo en cada paradero (

Figura D-6). Así, para armar nuestra base de datos final es necesario asignar a cada paradero las variables de los paraderos anteriores que influyen en su regularidad. Por ejemplo se calcula el promedio de la velocidad promedio y de su desviación estándar de los segmentos entre n y $n-p$. En el caso de la demanda se calcula el promedio de la tasa de demanda promedio (tanto para subidas como bajadas) de los paraderos $n-1$ al $n-p$.

Para el mismo subconjunto de paraderos se calcula el porcentaje de zonas pagas y el porcentaje de presencia de corredor (Figura D-7). Estas variables serán *dummy* en el caso de analizar paraderos consecutivos.

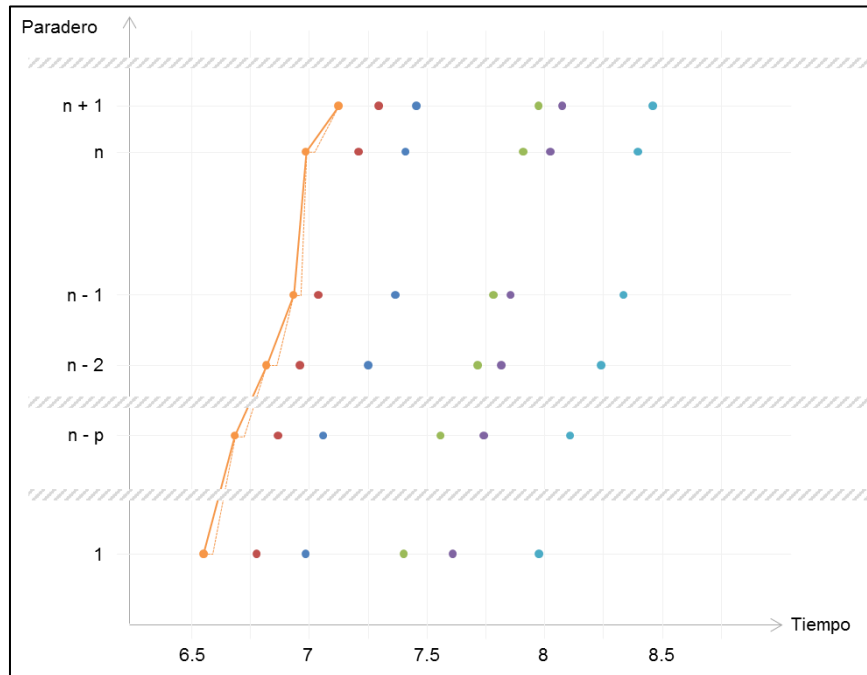


Figura D-6: Trayectorias y *dwell time*
Fuente: Elaboración propia

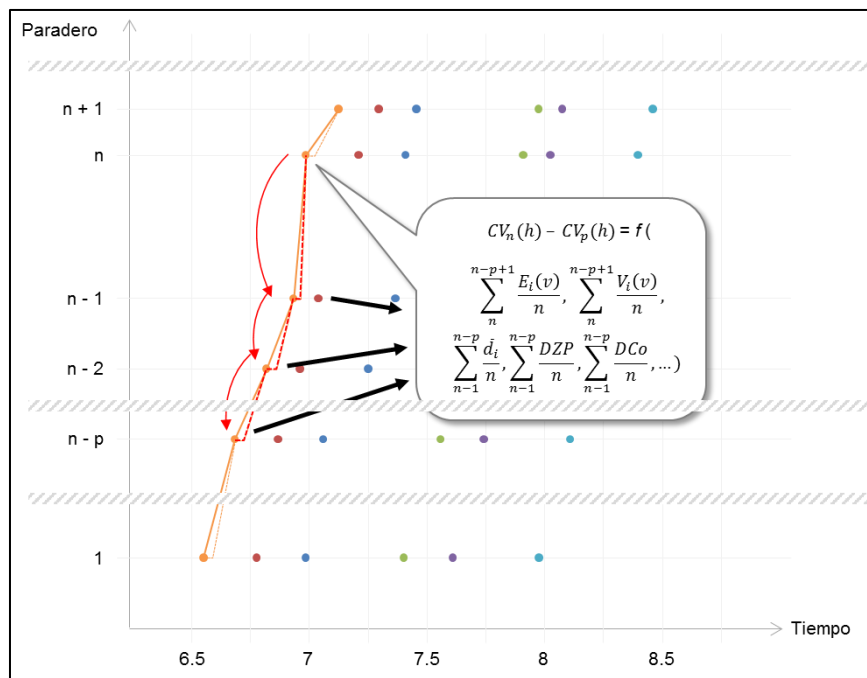


Figura D-7: Asignación de factores incidentes en la variable dependiente
Fuente: Elaboración propia

ANEXO E: CORRECCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN

Como estamos analizando la variación del coeficiente de variación de los intervalos entre dos paraderos, si tomamos dos paraderos alejados cada observación contendrá la información característica de una gran cantidad de paraderos. Ahora si comparamos dos observaciones veremos que comparten la mayor parte de la información, excepto los extremos (

Figura E-1). Es por esto que existe la posibilidad de que un modelo de este tipo presente autocorrelación. Para evitarlo se utilizará una muestra aleatoria de la base de datos, tal que las observaciones compartan un mínimo de información entre ellas. Para el modelo 1 se consideró observación por medio, mientras que para los modelos 2 y 3 se consideró una observación cada 10. Esto tuvo un gran impacto en el tamaño de la base de datos.

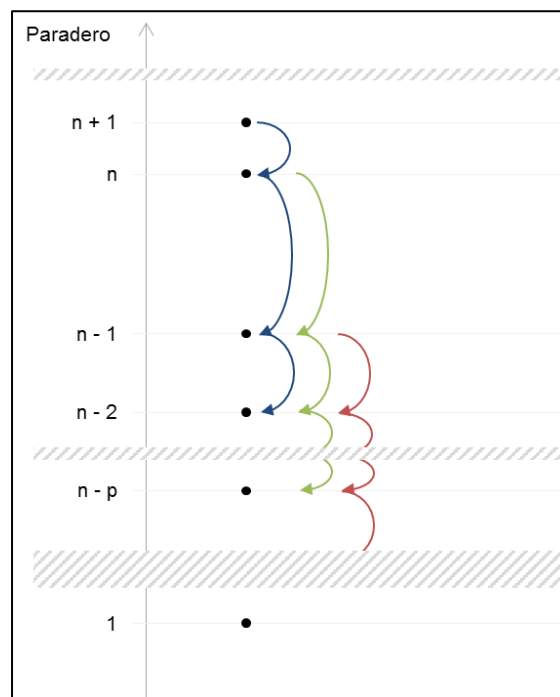


Figura E-1: Corrección de la autocorrelación
Fuente: Elaboración propia

ANEXO F: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Tabla F-1: Análisis datos modelo 0

<i>Variable</i>	<i>Min.</i>	<i>1er Cu.</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cu.</i>	<i>Max.</i>
CV_n	1,7840	56,7000	70,8000	73,3800	88,1900	213,6000
LS	78,2700	229,2000	293,4000	337,4000	383,1000	2.818,0000
$VPROM$	1,1100	5,2510	6,5780	6,7870	8,1120	22,4400
VSD	0,0400	1,4520	2,0010	2,1850	2,7460	8,7940
DCo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0333	0,0000	1,0000
$HPROM$	163,6000	326,9000	403,1000	411,2000	477,3000	1.492,0000
SNP	0,0000	0,0000	0,0004	0,0017	0,0020	0,0415
$EBNP$	-0,2455	-0,0005	0,0000	-0,0021	0,0000	0,0000
DU_3	0,0000	0,0000	0,0000	0,1654	0,0000	1,0000
DU_6	0,0000	0,0000	0,0000	0,2354	0,0000	1,0000
DD_3	0,0000	0,0000	0,0000	0,2777	1,0000	1,0000
DD_4	0,0000	0,0000	0,0000	0,2866	1,0000	1,0000
DD_5	0,0000	0,0000	0,0000	0,2881	1,0000	1,0000
CV_{n-p}	0,9945	56,1000	70,0500	72,7600	87,3600	215,5000

Tabla F-2: Análisis datos modelo 1

<i>Variable</i>	<i>Min.</i>	<i>1er Cu.</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cu.</i>	<i>Max.</i>
$CV_n - CV_{n-1}$	-29,4400	-0,7609	0,4890	0,6186	1,9070	27,9700
LS	78,2700	229,2000	293,4000	337,4000	383,1000	2.818,0000
$VPROM$	1,1100	5,2510	6,5780	6,7870	8,1120	22,4400
VSD	0,0400	1,4520	2,0010	2,1850	2,7460	8,7940
DCo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0333	0,0000	1,0000
$HPROM$	163,6000	326,9000	403,1000	411,2000	477,3000	1.492,0000
SNP	0,0000	0,0000	0,0004	0,0017	0,0020	0,0415
$EBNP$	-0,2455	-0,0005	0,0000	-0,0021	0,0000	0,0000
DU_3	0,0000	0,0000	0,0000	0,1654	0,0000	1,0000
DU_6	0,0000	0,0000	0,0000	0,2354	0,0000	1,0000
DU_7	0,0000	0,0000	0,0000	0,1841	0,0000	1,0000

Tabla F-3: Matriz de correlación modelo 1

<i>Variable</i>	<i>Int.</i>	<i>LS</i>	<i>VPROM</i>	<i>VSD</i>	<i>DCo</i>	<i>HPROM</i>	<i>SNP</i>	<i>EBNP</i>	<i>DU₃</i>	<i>DU₆</i>
<i>LS</i>	-24%									
<i>VPROM</i>	-39%	-16%								
<i>VSD</i>	-20%	18%	-50%							
<i>DCo</i>	8%	-16%	-7%	-6%						
<i>HPROM</i>	-71%	-4%	3%	2%	-4%					
<i>SNP</i>	-29%	-6%	15%	-1%	-1%	11%				
<i>EBNP</i>	9%	11%	-8%	-1%	-2%	-3%	4%			
<i>DU₃</i>	-23%	-2%	0%	6%	9%	6%	12%	-8%		
<i>DU₆</i>	-17%	-1%	-7%	-6%	14%	7%	15%	-3%	34%	
<i>DU₇</i>	-35%	10%	-6%	8%	3%	21%	16%	-5%	32%	36%

Tabla F-4: Análisis datos modelo 2

<i>Variable</i>	<i>Min.</i>	<i>1er Cu.</i>	<i>Mediana</i>	<i>Promedio</i>	<i>3er Cu.</i>	<i>Max.</i>
$CV_n - CV_{n-15}$	-69,1400	2,2400	9,8830	10,0900	18,5600	60,5400
<i>VPROM</i>	4,7160	6,1130	6,9160	6,9580	7,7170	9,6370
<i>VSD</i>	1,4270	1,9670	2,2350	2,3090	2,6500	4,0460
<i>DCo</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0115	0,0000	0,6000
<i>SNP</i>	0,0000	0,0003	0,0016	0,0023	0,0034	0,0122
<i>DZP</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0123	0,0000	0,1333
<i>DU₂</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,1567	0,0000	1,0000
<i>DU₃</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,1254	0,0000	1,0000
<i>DU₄</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,1944	0,0000	1,0000
<i>DU₅</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,1034	0,0000	1,0000
<i>DU₆</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,2602	1,0000	1,0000
<i>DU₇</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0658	0,0000	1,0000
<i>DD₅</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,2821	1,0000	1,0000

Tabla F-5: Matriz correlación modelo 2

Var.	Int.	VPROM	VSD	DCo	SNP	DZP	DU₂	DU₃	DU₄	DU₅	DU₆	DU₇
<i>VPROM</i>	-79%											
<i>VSD</i>	14%	-66%										
<i>DCo</i>	-6%	8%	-4%									
<i>SNP</i>	-56%	40%	-12%	-2%								
<i>DZP</i>	39%	-25%	2%	-1%	-75%							
<i>DU₂</i>	-5%	-20%	3%	-22%	12%	-4%						
<i>DU₃</i>	-7%	-22%	12%	-3%	11%	-5%	63%					
<i>DU₄</i>	-43%	29%	-22%	0%	2%	-4%	50%	47%				
<i>DU₅</i>	-16%	5%	-13%	2%	-13%	-5%	45%	44%	58%			
<i>DU₆</i>	-21%	-1%	-12%	-2%	26%	-22%	68%	65%	60%	54%		
<i>DU₇</i>	-9%	-15%	10%	-2%	-2%	4%	51%	50%	44%	41%	52%	
<i>DD₅</i>	-4%	-2%	2%	-3%	1%	-4%	-3%	-3%	-5%	-1%	0%	-2%

Tabla F-6: Análisis datos modelo 3

Variable	Min.	1er Cu.	Mediana	Promedio	3er Cu.	Max.
<i>CV_n – CV_{n-25}</i>	-24,2300	4,5950	15,8600	17,5400	30,7000	57,1100
<i>VPROM</i>	4,7530	6,1100	6,8690	6,8420	7,6240	8,6530
<i>DCo</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0018	0,0000	0,0400
<i>SNP</i>	0,0000	0,0007	0,0031	0,0032	0,0051	0,0096
<i>DZP</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0206	0,0400	0,0800
<i>DU₅</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,1927	0,0000	1,0000
<i>DU₆</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,2661	1,0000	1,0000
<i>DD₅</i>	0,0000	0,0000	0,0000	0,2569	1,0000	1,0000

Tabla F-7: Matriz correlación modelo 3

Variable	Int.	VPROM	DCo	SNP	DZP	DU₅	DU₆
<i>VPROM</i>	-97%						
<i>DCo</i>	-4%	2%					
<i>SNP</i>	-56%	43%	-10%				
<i>DZP</i>	26%	-18%	-58%	-51%			
<i>DU₅</i>	7%	-10%	60%	-23%	-47%		
<i>DU₆</i>	8%	-22%	46%	30%	-69%	49%	
<i>DD₅</i>	-6%	-2%	6%	9%	-18%	7%	18%