



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

**MODELACIÓN DE VARIABLES QUE AFECTAN LA REGULARIDAD EN EL  
DESPACHO DE BUSES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**JAVIERA PAZ GODACHEVICH CONTRERAS**

PROFESOR GUÍA:  
ALEJANDRO ANDRÉS TIRACHINI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LEONARDO BASSO SOTZ  
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE  
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: JAVIERA PAZ GODACHEVICH CONTRERAS  
FECHA: 2017  
PROF. GUÍA: SR. ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

## MODELACIÓN DE VARIABLES QUE AFECTAN LA REGULARIDAD EN EL DESPACHO DE BUSES

La variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses al inicio de la ruta es un fenómeno relevante que no ha sido estudiado en profundidad en la literatura, a pesar de ser una de las variables más importantes que contribuye al apelotonamiento de buses y por ende, afectar a los distintos agentes del sistema. Esta investigación tiene como finalidad determinar los factores que inciden en la regularidad de los despachos, a partir de estimaciones de modelos de regresión multivariada.

Se utilizan datos de la operación del sistema de transporte público en la ciudad de Santiago de Chile, para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, en particular, información asociada a la ubicación de los buses en la ruta y a las transacciones de pago realizadas por los usuarios. La modelación es abordada para dos periodos de operación. En primer lugar, se estudia el periodo comprendido entre las 5.30 y las 6.29 horas, donde se da inicio a la operación de la mayor parte de los servicios-sentido del sistema Transantiago. El segundo caso corresponde al periodo de las 6.30 a las 8.29 horas, caracterizado por su alta demanda y mayor congestión vehicular.

Para representar el fenómeno se usan tres medidas de variabilidad de intervalos: coeficiente de variación, desviación estándar e índice por observación modificado, al cual se le aplicó una transformación de Box-Cox con la finalidad de normalizar su distribución de probabilidad. Con respecto a las variables explicativas, éstas son agrupadas en tres categorías en función de los efectos que logran capturar: operación y diseño de la red, desempeño de la empresa operadora y operación e infraestructura de cabezales y depósitos.

Los resultados de las estimaciones muestran que existen variables que son significativas en explicar la varianza de los intervalos entre buses al inicio de la ruta en los dos periodos modelados, como la frecuencia programada y el número de servicios-sentido por cabezal. Hay también variables que son significativas solo en el periodo 5.30-6.29 horas, como por ejemplo la distancia recorrida desde el depósito al primer paradero del servicio, y finalmente se encontraron variables que son significativas solo en el periodo 6.30 a 8.29 horas, como el largo de la ruta, la demanda media por bus, la velocidad comercial y la presencia de cabezales en los depósitos. Además se obtienen diferencias estadísticamente significativas en el desempeño que ofrecen las empresas operadoras al inicio de la ruta.

Por otro lado, las modelaciones efectuadas del fenómeno en cuestión permiten determinar si las variables aumentan o reducen la variabilidad de los intervalos observados entre despachos. A partir de esto, se generan una serie de propuestas para el regulador y las empresas operadoras, que tienen por objetivo aportar en las futuras decisiones de planificación y gestión de operaciones que sean tomadas sobre el sistema de transporte público de Santiago. Además, se definen sugerencias metodológicas para futuras investigaciones.

*Dedicado a los pilares de mi vida*

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional desde el primer día en que inicié mis estudios en la Escuela de Ingeniería. Gracias a mi madre, a mi hermana y a mi abuelita por comprenderme en los días difíciles, por enseñarme que con esfuerzo y constancia es posible alcanzar cualquier meta que nos proponamos. Esto es para ustedes y para mi tata que iluminó mi camino en este largo proceso.

Agradezco a Alberto, mi compañero de sueños, por tomar mi mano en esta aventura y no permitirme caer. Gracias por las risas y la paciencia, por siempre confiar en mí, por regalarme momentos únicos y por ese amor infinito que me entregas. Crecer a tu lado fue el mejor regalo que me entregó mi estadía en esta Facultad.

Gracias a mis amigas de la vida. A Arantzazu, Muriel, Camila, Tamara, Constanza y Jenny por alegrar mis viernes durante mis primeros años, por nunca dejar de creer en mí, por seguir siendo parte de mi vida y permitirme conocer la amistad verdadera.

También agradezco a los amigos que me dejó esta aventura, con quienes compartí lindos momentos a lo largo de estos años. A Camila y Daniel por su apoyo y compañía desde que entramos juntos como mechones, gracias por las experiencias y locuras que nunca olvidaré. A Diego, Gonzalo y Yerko, gracias por el cariño entregado, por las risas, las pizzas y la amistad durante este último tiempo.

A la selección de futbolito de Ingeniería, mi equipo, mis amigas, gracias por enseñarme que nada es imposible y que los problemas quedan fuera de la cancha. Me llevo grandes aprendizajes de cada una y el más bello recuerdo de la familia que logramos formar.

Agradezco al profesor Alejandro Tirachini por haberme guiado en el final de esta aventura, por su disposición mostrada en lo que requerí, por la confianza y el apoyo entregado en mi estadía en la División Ingeniería de Transporte.

Finalmente, quisiera agradecer a cada uno de los miembros de la división, especialmente a los profesores que lo conforman y a mis compañeros de generación. Fue un gusto ser su alumna y un privilegio aprender de profesionales integrales que representan esta disciplina. A Benjamín y Esteban, gracias por su comprensión y ayuda siempre que lo necesité, mucho éxito en sus desafíos futuros.

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Contexto: Sistema de transporte público en Santiago de Chile .....	3
<b>2. Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>7</b>
2.1. Variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses.....	7
2.2. Estrategias de control de operaciones para afrontar el apaltonamiento de buses .....	10
2.3. Variabilidad de los intervalos programados al inicio de la ruta.....	11
2.4. Medidas de variabilidad de intervalos .....	13
<b>3. Recopilación y generación de datos .....</b>	<b>17</b>
3.1. Descripción de los periodos en estudio.....	17
3.1.1. Periodo 1: Transición Nocturna.....	17
3.1.2. Periodo 2: Punta Mañana.....	18
3.1.3. Infraestructura y paraderos en el sistema de transporte público de Santiago.....	18
3.2. Generación de datos .....	18
3.2.1. Intervalos de tiempo entre buses consecutivos que pasan por el primer paradero del servicio .....	19
3.2.2. Frecuencia de buses programada .....	20
3.2.3. Largo de ruta por servicio.....	21
3.2.4. Tiempos de viaje de las expediciones observadas y velocidades comerciales.....	21
3.2.5. Subida de pasajeros por servicio .....	21
3.2.6. Catastro de ubicación y operación de cabezales, depósitos y primeras paradas, por servicio .....	22
3.3. Recopilación de antecedentes en terreno: Estudio de la operación en cabezales de Transantiago.....	23
3.3.1. Visita a cabezal del servicio 205I.....	25
3.3.2. Visita a cabezal del servicio H13R.....	25
3.3.3. Visita a cabezal del servicio D18R.....	26

3.3.4.	Visita a cabezal del servicio 501I.....	27
3.3.5.	Visita a cabezal del servicio 213eI.....	27
3.3.6.	Comentarios.....	28
<b>4.</b>	<b>Modelación .....</b>	<b>29</b>
4.1.	Variables explicadas .....	29
4.2.	Variables explicativas .....	35
4.2.1.	Variables explicativas: Operación y diseño de la red.....	35
4.2.2.	Variables explicativas: Desempeño de la empresa operadora.....	37
4.2.3.	Variables explicativas: Operación e infraestructura de cabezales y depósitos.....	38
4.2.4.	Resultados esperados.....	43
<b>5.</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>44</b>
5.1.	Modelación Periodo 1: Transición Nocturna (5.30 a 6.29 horas).....	44
5.2.	Modelación Periodo 2: Punta Mañana (6.30 a 8.29 horas).....	51
5.3.	Análisis de parámetros.....	58
5.3.1.	Operación y diseño de la red .....	59
5.3.2.	Desempeño de la empresa operadora .....	59
5.3.3.	Operación e infraestructura de cabezales y depósitos .....	60
5.3.4.	Importancia relativa de los parámetros.....	61
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>64</b>
6.1.	Conclusiones finales .....	64
6.2.	Recomendaciones .....	67
6.3.	Limitaciones del trabajo y líneas futuras de investigación .....	68
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>70</b>
	<b>Anexo A .....</b>	<b>73</b>
A.1.	Primera estimación de modelo con STD, periodo 5.30 a 6.29 horas.....	73
A.2.	Primera estimación de modelo con STD, periodo 6.30 a 8.29 horas.....	74

# Índice de Tablas

Tabla 1. 1: Empresas concesionarias que operan Transantiago .....	3
Tabla 1. 2: Número de depósitos con los que cuenta cada unidad de negocio.....	5
Tabla 3. 1: Descripción de cabezales visitados .....	24
Tabla 3. 2: Medición en cabezal del intervalo entre despachos .....	24
Tabla 3. 3: Medición en cabezal del tiempo de detención.....	24
Tabla 4. 1: Coeficientes transformación Box-Cox .....	30
Tabla 4. 2: Estadísticos descriptivos de los indicadores de regularidad, periodos 1 y 2.....	31
Tabla 4. 3: Promedio de minutos de incidencia al inicio de la ruta, por operador .....	31
Tabla 4. 4: Estadísticos descriptivos de frecuencia e intervalo programado.....	35
Tabla 4. 5: Estadísticos descriptivos de velocidad comercial en la expedición de retorno .....	36
Tabla 4. 6: Estadísticos descriptivos de demanda media por bus.....	37
Tabla 4. 7: Estadísticos descriptivos de largo de ruta de la expedición de retorno .....	37
Tabla 4. 8: Descripción variable tipo dummy asociada a punto de control de regularidad en el cabezal .....	39
Tabla 4. 9: Descripción desagregada por operador de la variable tipo dummy asociada a punto de control de regularidad ubicado en el cabezal.....	39
Tabla 4. 10: Descripción variable de tipo dummy asociada a la presencia del cabezal en el interior del depósito respectivo .....	40
Tabla 4. 11: Descripción desagregada por operador de la variable de tipo dummy asociada a la presencia del cabezal en el interior del depósito respectivo .....	40
Tabla 4. 12: Estadísticos descriptivos de distancia recorrida entre depósito y primer paradero ...	41
Tabla 4. 13: Estadísticos descriptivos de número de servicios-sentido por cabezal .....	42
Tabla 4. 14: Influencia esperada de las variables explicativas sobre la regularidad de los despachos de buses .....	43

Tabla 5. 1: Estimación preliminar de modelos con indicadores CV, STD y Reg_IPO, periodo 1	48
Tabla 5. 2: Estimación final de modelos con indicadores CV, STD y Reg_IPO, periodo 1	50
Tabla 5. 3: Estimación final modelo con indicador Minc, periodo 1	51
Tabla 5. 4: Estimación preliminar de modelos con indicadores CV, STD y Reg_IPO, periodo 2	54
Tabla 5. 5: Estimación final de modelos con indicadores CV, STD y Reg_IPO, periodo 2	56
Tabla 5. 6: Estimación final modelo con indicador Minc, periodo 2	58
Tabla 5. 7: Desempeño de operadores, indicadores CV, STD y Reg_IPO	60
Tabla 5. 8: Desempeño de operadores, indicador minutos de incidencia	60
Tabla 5. 9: Coeficientes estandarizados en modelos finales, periodo 5.30 a 6.29 horas	62
Tabla 5. 10: Coeficientes estandarizados en modelos finales, periodo 6.30 a 8.29 horas	62
Tabla 5. 11: Variables significativas por periodo, orden descendiente de importancia	63



# Índice de Ilustraciones

Figura 1. 1: Variabilidad de los intervalos en los operadores de Transantiago, medida a partir de los minutos de incidencia. Fuente: (García, 2016).....	4
Figura 1. 2: Ubicación depósitos U1. Fuente: Elaboración propia.....	5
Figura 1. 3: Ubicación depósitos U2. Fuente: Elaboración propia.....	5
Figura 1. 4: Ubicación depósitos U3. Fuente: Elaboración propia.....	5
Figura 1. 5: Ubicación depósitos U4. Fuente: Elaboración propia.....	5
Figura 1. 6: Ubicación depósitos U5. Fuente: Elaboración propia.....	6
Figura 1. 7: Ubicación depósitos U6. Fuente: Elaboración propia.....	6
Figura 1. 8: Ubicación depósitos U7. Fuente: Elaboración propia.....	6
Figura 3. 1: Cabezal 205 ida.....	25
Figura 3. 2: Cabezal D18 retorno.....	26
Figura 3. 3: Cabezal 501 ida.....	27
Figura 3. 4: Cabezal 213e ida.....	28
Figura 4. 1: Histograma de la variable dependiente $STD(h_{obs})$ , periodo 1.....	32
Figura 4. 2: Histograma de la variable dependiente $CV(h_{obs})$ , periodo 1.....	32
Figura 4. 3: Histograma de la variable dependiente Reg_IPO, periodo 1.....	32
Figura 4. 4: Histograma de la variable dependiente Minc, periodo 1.....	32
Figura 4. 5: Histograma de la variable dependiente $STD(h_{obs})$ , periodo 2.....	33
Figura 4. 6: Histograma de la variable dependiente $CV(h_{obs})$ , periodo 2.....	33
Figura 4. 7: Histograma de la variable dependiente Reg_IPO, periodo 2.....	33
Figura 4. 8: Histograma de la variable dependiente Minc, periodo 2.....	33
Figura 4. 9: ICR medido a lo largo de la ruta vs. ICR-I al inicio del recorrido, periodo 1. Fuente: Elaboración propia.....	34

Figura 4. 10: ICR medido a lo largo de la ruta vs. ICR-I al inicio del recorrido, periodo 2.	34
Fuente: Elaboración propia.....	
Figura 4. 11: ICR primer semestre 2016 medido a lo largo de la ruta vs. Distancia recorrida desde el depósito al primer paradero, por operador. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 5. 1: Histograma de residuos, Indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 1.....	45
Figura 5. 2: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 1.....	45
Figura 5. 3: Histograma de residuos, Indicador Reg_IPO, periodo 1.....	45
Figura 5. 4: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador Reg_IPO, periodo 1.....	45
Figura 5. 5: Histograma de residuos, Indicador $STD(h_{obs})$ , periodo 1.....	45
Figura 5. 6: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador $STD(h_{obs})$ , periodo 1.....	45
Figura 5. 7: Diagrama de dispersión, Indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 1.....	46
Figura 5. 8: Diagrama de dispersión, Indicador Reg_IPO, periodo 1.....	46
Figura 5. 9: Diagrama de dispersión, Indicador $STD(h_{obs})$ , periodo 1.....	46
Figura 5. 10: Histograma de residuos, Indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 2.....	52
Figura 5. 11: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 2.....	52
Figura 5. 12: Histograma de residuos, Indicador Reg_IPO, periodo 2.....	52
Figura 5. 13: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador Reg_IPO, periodo 2.....	52
Figura 5. 14: Histograma de residuos, Indicador $STD(h_{obs})$ , periodo 2.....	52
Figura 5. 15: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador $STD(h_{obs})$ , periodo .....	52
Figura 5. 16: Diagrama de dispersión, Indicador $CV(h_{obs})$ , periodo 2.....	53
Figura 5. 17: Diagrama de dispersión, Indicador Reg_IPO, periodo 2.....	53
Figura 5. 18: Diagrama de dispersión, Indicador $STD(h_{obs})$ , periodo 2.....	53

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El transporte público urbano corresponde a un sistema integral formado por distintos medios de transporte, que tiene como finalidad solucionar las necesidades de las personas por desplazarse dentro de la ciudad. En particular, los buses son parte importante de la oferta del sistema y su uso debe ser incentivado, ya que permiten aprovechar de mejor forma el espacio vial en comparación con el automóvil, son menos costosos para un alto volumen de pasajeros y ambientalmente son más eficientes, dada su menor emisión de contaminantes por pax-km, al menos en periodos punta.

Atributos como regularidad, confiabilidad, tiempos de acceso a la parada, tiempo de espera en paradero, tiempo de viaje al interior del bus y tiempos por transbordos, son relevantes para caracterizar la calidad del servicio entregado a los pasajeros.

La confiabilidad, la cual se define como la invariabilidad de los atributos que influyen en las decisiones de los usuarios y de los proveedores del servicio (Abkowitz, 1978), es un factor importante para los agentes del sistema de transporte. En primer lugar, para los usuarios, ya que se relaciona con el nivel de certeza que estos tienen sobre el tiempo que les tomará desplazarse desde su origen hacia su destino, y con el grado de satisfacción que el servicio les entrega, aspecto relevante también para los reguladores. A su vez, la confiabilidad genera interés en los operadores, dado que una mejora en ella permite retener y atraer pasajeros, afectando directamente sus costos y eficiencia (Diab et al., 2015).

Los servicios de buses muchas veces se ven afectados por diversos fenómenos que deterioran la operación del sistema y con ello, la experiencia de viaje del usuario. Uno de éstos es la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos, la cual tiende a juntar vehículos de un mismo servicio (conocido como apelotonamiento), afectando la confiabilidad y aumentando el tiempo de espera de un usuario en el paradero, como también el número de personas que suben al bus que llega después de un intervalo largo, generándoles un malestar adicional por hacinamiento inducido de pasajeros (Strathman et al., 2003; Arriagada, 2016).

La irregularidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos a lo largo de la ruta es un problema que ha sido ampliamente estudiado en la literatura durante las últimas décadas. Dentro de los factores que inciden en el apelotonamiento de buses, se pueden destacar: regularidad en el despacho, frecuencia de buses, número de subidas y bajadas de pasajeros,

congestión del tránsito, número de paraderos, números de semáforos, largo de la ruta, entre otros (Figliozi, 2012; Moreira-Matias et al., 2012; Arriagada, 2016).

Mientras mayor sea la variabilidad de los intervalos para una frecuencia dada, se observará una espera promedio de los usuarios mayor, generando un impacto sobre la demanda por transporte público (Peek y Van Hagen, 2002). Por lo tanto, si se desea reducir el tiempo de espera, se pueden implementar soluciones como aumentar la frecuencia o bien, mejorar la confiabilidad (Bowman y Turnquist, 1981).

Con el objetivo de mantener intervalos de tiempo más regulares, entre buses consecutivos de un mismo servicio, se han propuesto distintas estrategias de control operacional que pueden ser implementadas en ruta o en paradero. Algunas de las medidas planteadas son: retención de vehículos utilizando datos de posicionamiento basado en GPS, salto de estaciones de parada, control de velocidad y priorización en cruces semaforizados (Daganzo, 2009; Cortés et al., 2010; Lizana et al., 2014; García, 2016).

Sin embargo, existen soluciones para disminuir la variabilidad de los intervalos de tiempo, que no han sido estudiadas en profundidad. En particular, una de las variables que contribuye a aumentar el apelsonamiento en ruta es la irregularidad en el despacho de buses desde el cabezal (Hammerle, 2005; Moreira-Matias et al., 2012; Arriagada, 2016). No obstante, no se conocen con claridad los factores que determinan la regularidad de los intervalos de tiempo entre salidas consecutivas.

El objetivo principal de esta investigación es determinar qué variables explican la irregularidad observada en los despachos de buses e identificar de qué forma contribuyen a incrementar o disminuir la variabilidad de los intervalos de tiempo entre salidas desde el cabezal. Para ello se desarrollan y estiman modelos de regresión lineal múltiple, usando datos de posicionamiento de vehículos basado en GPS y de conteo de pasajeros, para la ciudad de Santiago de Chile.

La estructura de la memoria considera en primer lugar una revisión bibliográfica enfocada en el desarrollo del marco teórico y descripción del estado del arte de los aspectos relacionados con la investigación, la cual se encuentra en el Capítulo 2. El Capítulo 3 se enfoca en la metodología realizada para recopilar y generar los datos que se utilizan en la modelación. A su vez, usando la información que se posee, se exponen características del sistema de transporte de la ciudad de Santiago, que permiten comprender y analizar el contexto actual. En el Capítulo 4 se detalla la modelación, es decir, las variables explicativas usadas candidatas a representar el fenómeno y las variables explicadas. En el Capítulo 5 se encuentran los resultados obtenidos de la modelación y el análisis respectivo de cada parámetro estimado, lo cual permite definir las variables explicativas que mejor se comportan. Por último, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del trabajo, implicancias y recomendaciones dadas para el futuro lector.

## 1.2. Contexto: Sistema de transporte público en Santiago de Chile

El sistema de transporte público de Santiago integra de forma física y tarifaria a los buses del transporte público urbano de la ciudad, conocido comúnmente como Transantiago, y a la red Metro.

En particular, Transantiago entrega su servicio a 34 comunas de la Región Metropolitana de Chile. A julio de 2016, cuenta con 380 servicios y aproximadamente 6500 buses, que recorren más de 460 millones de kilómetros al año. Los vehículos son operados diariamente por 7 empresas concesionarias que se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1: Empresas concesionarias que operan Transantiago

<b>Unidad de Negocio</b>	<b>Empresa</b>
U1	Inversiones Alsacia S.A.
U2	Subus Chile S.A.
U3	Buses Vule S.A.
U4	Express de Santiago Uno S.A.
U5	Buses Metropolitana S.A.
U6	Redbus Urbano S.A.
U7	STP S.A.

La regulación y coordinación de las acciones, programas y medidas que permitan gestionar el transporte público de la ciudad de Santiago y velar por la entrega de un servicio de calidad, es responsabilidad del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM).

Los vehículos de Transantiago son monitoreados mediante un sistema GPS, que entrega la posición geográfica de los buses cada 30 segundos. Por otro lado, el medio de pago que se utiliza, con formato sin contacto, es la Tarjeta Bip!. Es el único método disponible de pago en buses y el más usado en Metro. En su conjunto, posicionamiento GPS y transacciones realizadas mediante la tarjeta inteligente, entregan datos operacionales de mucha utilidad para los distintos agentes del sistema.

Los programas de operación definen la oferta de cada empresa, indicando el trazado, las paradas asignadas, los despachos por período, entre otras características. Existen distintos indicadores que velan por la correcta ejecución del programa de operación, donde su grado de cumplimiento determina la calidad del servicio entregado. Ellos son: Índice de Cumplimiento de Frecuencia (ICF) e Índice de Cumplimiento de Regularidad (ICR) (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2012).

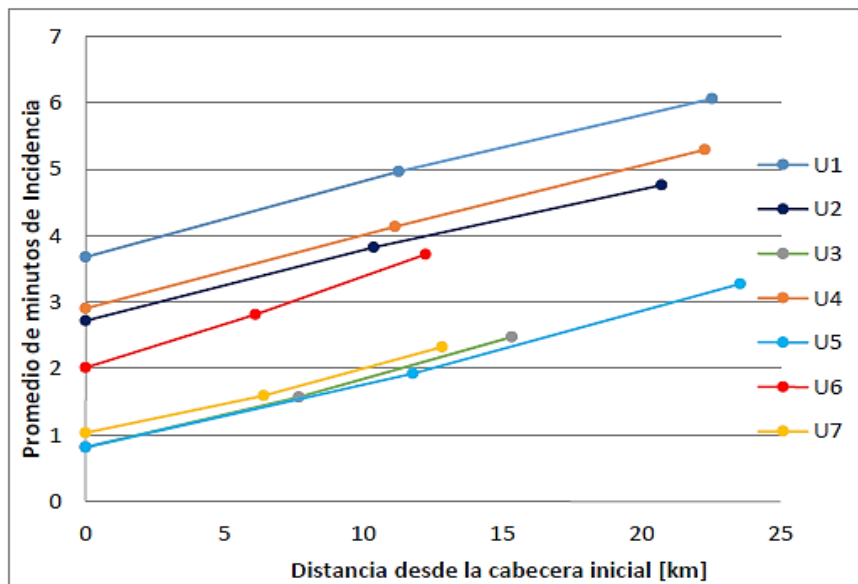
Con respecto al segundo indicador, este mide el cumplimiento del intervalo existente entre buses de un mismo recorrido, y lo compara con el intervalo programado, de forma tal de tratar de prevenir que se produzcan intervalos demasiado grandes en relación a lo planificado, que aumenten los tiempos de espera de los usuarios. Para la medición del desempeño del ICR, usando el posicionamiento GPS, se registran instantes de paso de los buses, por lo general, en tres puntos

de control. Estos se ubican idealmente en el cabezal de inicio, en un punto medio de la ruta y en el cabezal de término de cada servicio-sentido.

Cada servicio dispone de su cabezal, el cual corresponde a un sitio donde se gestiona la salida y llegada de buses, dando por inicio y termino respectivamente a la ruta. Estos puntos determinan el horario de arribo a los paraderos. El cabezal puede estar ubicado en un espacio físico como por ejemplo, en un terminal de buses, en su depósito asignado, sin embargo, se encuentran mayormente en la vía pública a metros del primer paradero del servicio.

El DTPM utiliza los minutos de incidencia para medir la variabilidad de los intervalos, es decir, si el tiempo observado entre buses consecutivos de un mismo servicio supera un cierto umbral, la empresa operadora será penalizada. En particular, un análisis realizado por el DICTUC, citado en García (2016) sobre los minutos de incidencia en los tres puntos de control donde Transantiago mide la regularidad de los buses, expone la relación existente entre la variabilidad de los intervalos y la distancia recorrida en ruta desde el cabezal de inicio, para las siete empresas (ver Figura 1.1). A partir de ella se deduce que la principal diferencia de regularidad entre los operadores del sistema se origina por despachar desde el cabezal de forma más regular (menor promedio de minutos de incidencia), ya que el comportamiento en ruta y su regulación es común.

Figura 1.1: Variabilidad de los intervalos en los operadores de Transantiago, medida a partir de los minutos de incidencia. Fuente: (García, 2016)



En lo que respecta a la infraestructura, cada operador dispone de depósitos que están ubicados estratégicamente de acuerdo a los recorridos (ver Figura 1.2 a 1.8), no obstante, por lo general se posicionan en zonas periféricas de la ciudad, de difícil acceso y limitado entorno urbano. En ellos, se controla la operación diaria, se realizan mantenciones a los buses y se cuenta con los medios necesarios para cargar combustible. En la Tabla 1.2 se presenta el número de depósitos por unidad de negocio.

Tabla 1. 2: Número de depósitos con los que cuenta cada unidad de negocio

Unidad de Negocio	Depósitos por operador
U1	9
U2	11
U3	20
U4	9
U5	15
U6	8
U7	4

Figura 1.2: Ubicación depósitos U1.  
Fuente: Elaboración propia

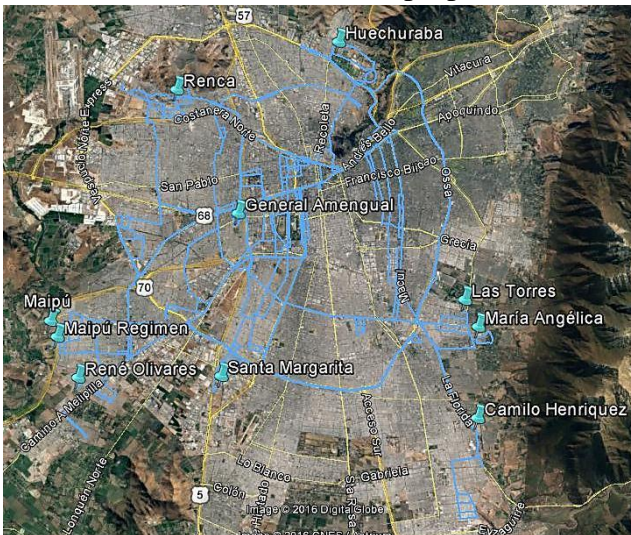


Figura 1.3: Ubicación depósitos U2.  
Fuente: Elaboración propia

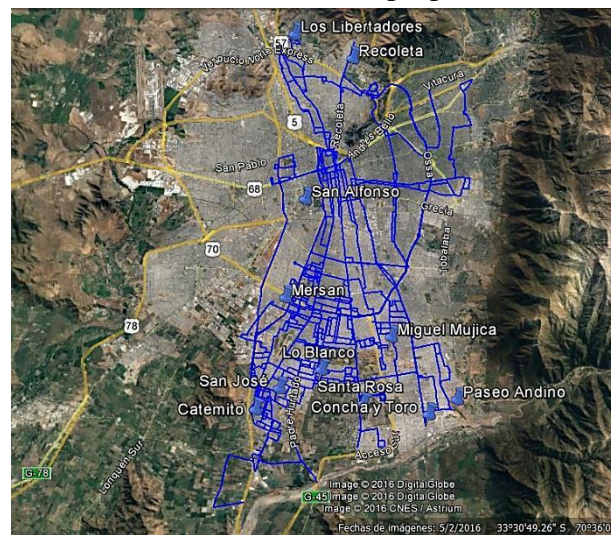


Figura 1.4: Ubicación depósitos U3.  
Fuente: Elaboración propia

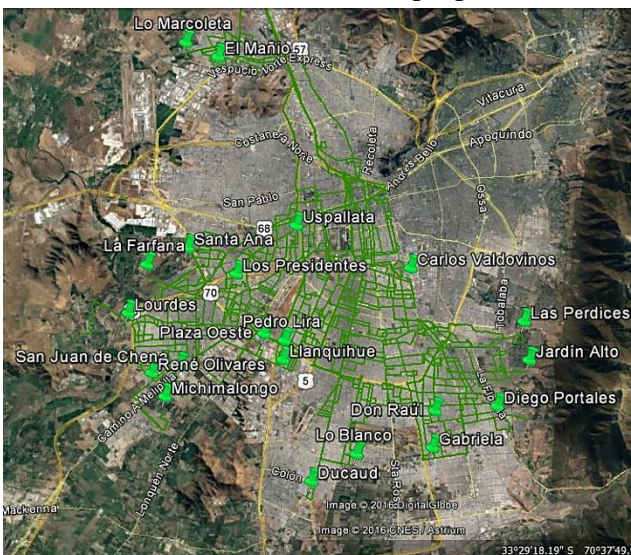


Figura 1.5: Ubicación depósitos U4.  
Fuente: Elaboración propia

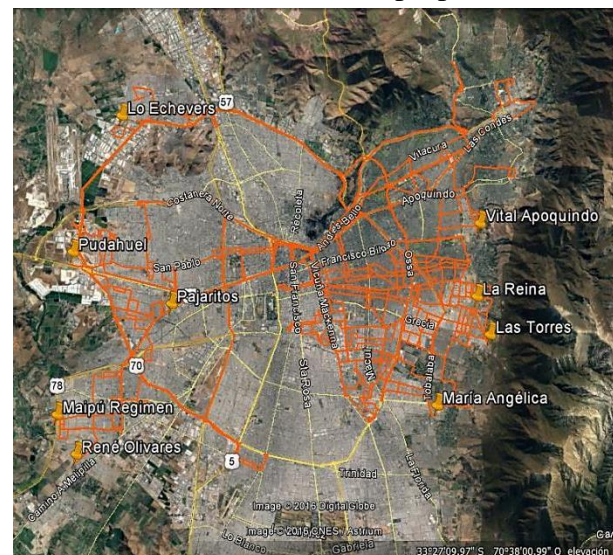


Figura 1.6: Ubicación depósitos U5. Fuente: Elaboración propia

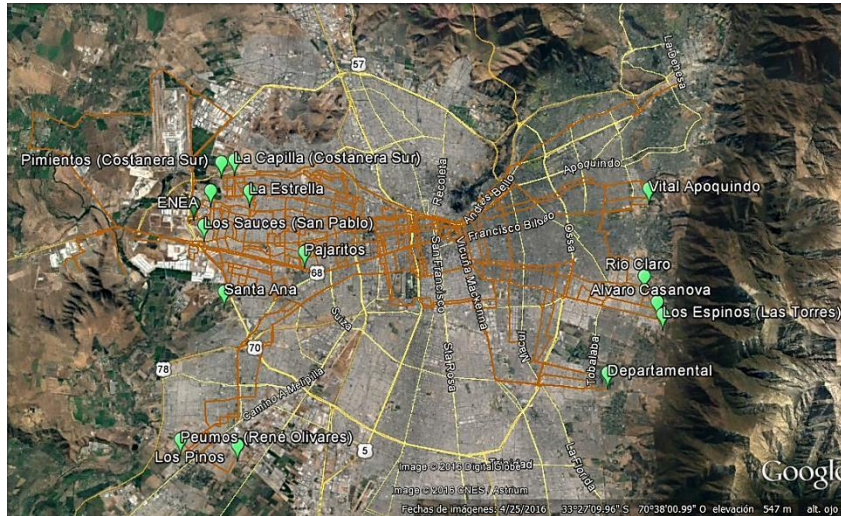


Figura 1.7: Ubicación depósitos U6  
Fuente: Elaboración propia

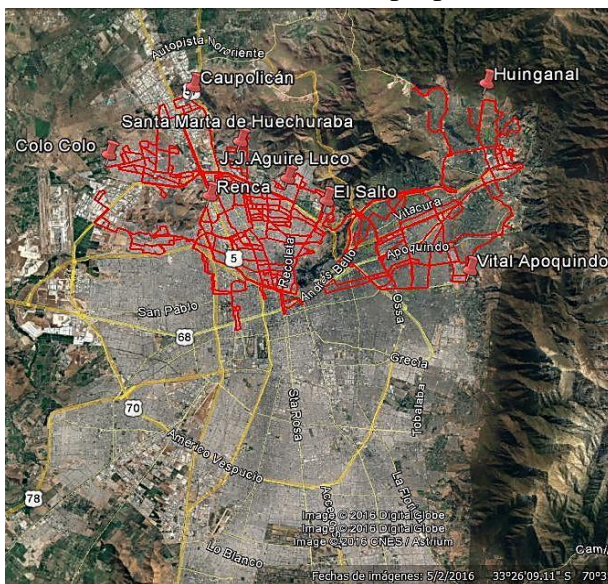
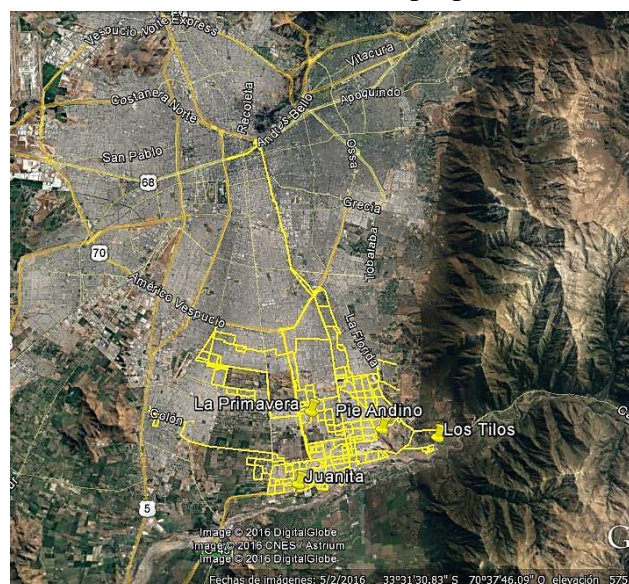


Figura 1.8: Ubicación depósitos U7  
Fuente: Elaboración propia



El año 2018 aparece en el horizonte como una fecha de transformaciones en el sistema de transporte público, dado que comenzarán a aplicarse cambios en los contratos de las empresas de Transantiago. Uno de los aspectos a solucionar a la fecha tiene que ver con los depósitos y las diferencias que se observan en su operación. Para ello, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, ha decidido realizar un proceso de licitación para construir y operar depósitos por empresas que se dediquen exclusivamente a entregar este servicio.



## Capítulo 2

### Revisión Bibliográfica

La irregularidad de los intervalos de tiempos entre buses consecutivos que son despachados desde un cabezal no ha sido estudiada en la literatura, a pesar de ser un problema que se reporta frecuentemente en los sistemas de transporte. Es por ello que el presente capítulo se enfoca en exponer las líneas de investigación que motivan el estudio profundo de una de las variables relevantes que afecta al fenómeno de apelotonamiento.

En primer lugar, se presenta la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos a lo largo de la ruta, problemática globalmente estudiada en las últimas décadas. Luego, se exponen algunas de las estrategias que han sido implementadas con el fin de afrontar el apelotonamiento de buses. Finalmente, se muestran aquellas investigaciones enfocadas en estudiar la variabilidad de los intervalos en ruta, que consideran a la irregularidad en los despachos como uno de los factores más significativos para explicar el fenómeno, junto con las medidas de variabilidad de intervalos más usadas en la literatura.

#### 2.1. Variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses

El intervalo entre buses corresponde al tiempo existente entre dos vehículos consecutivos que ofrecen un mismo servicio en ruta. Cuando el intervalo observado difiere del programado, se origina variabilidad de los intervalos entre buses y un deterioro de la calidad, ya que un sistema de transporte es capaz de ofrecer un servicio confiable cuando posee, entre otros aspectos, la habilidad de mantener una regularidad en los intervalos y un tiempo de viaje consistente (El-Geneidy et al., 2011). A partir de esto se deduce que la confiabilidad y la regularidad son dos variables que se relacionan directamente.

Los factores que inciden en la confiabilidad del servicio y por ende, en la regularidad de los intervalos, se asocian a las características de la ruta, como por ejemplo largo y número de intersecciones semaforizadas, y a las condiciones de operación, como volumen de tráfico y frecuencia (Strathman, 2003). A su vez, pueden ser clasificados en externos o internos al sistema. Por un lado, las causas externas se relacionan con las condiciones del tráfico y sus características, como lo son la congestión y las señalizaciones de tránsito. Luego, las causas internas hacen alusión al comportamiento del conductor, horarios incorrectos, variabilidad de la demanda, entre otros (Strathman et al., 2001).

Por otro lado, la variabilidad de los intervalos entre buses que van en una misma dirección deja en evidencia un fenómeno conocido como apelsonamiento, donde producto de una irregularidad extrema los buses tienden a juntarse. Para explicar dicha variabilidad, se han planteado una serie de factores que inciden en ello. Dentro de los más relevantes se pueden mencionar los siguientes:

- *Frecuencia programada.* Mientras mayor sea ésta, la regularidad se ve reducida ya que aumenta la variabilidad de los intervalos entre buses y con ello, la probabilidad de evidenciar apelsonamiento (Arriagada, 2016). No obstante, un incremento en la frecuencia implica una reducción en los tiempos de espera de los usuarios.
- *Distancia recorrida desde el inicio de la ruta.* A medida que los buses avanzan, se enfrentan a mayores situaciones en el entorno, dificultando la mantención del intervalo programado. Por lo tanto, mientras más alejados se encuentren los buses del cabezal de inicio, mayor será la variabilidad de los intervalos y por ende, existirá un mayor apelsonamiento entre vehículos (Arriagada, 2016; García, 2016).
- *Variabilidad de la demanda.* La cantidad de usuarios que suben o bajan y su comportamiento afectan al tiempo de detención del bus en parada, dado que para una alta demanda el bus estará más detenido, originando un intervalo mayor al programado entre el bus en el paradero y el que le antecede en la ruta, y un intervalo menor con el bus que le precede. De igual forma, para una demanda menor (nula en los casos que no existen usuarios esperando en el paradero), el tiempo de detención del bus también se ve reducido. Por lo tanto, a medida que la variabilidad de la demanda se intensifica, es decir, el número de pasajeros por parada a lo largo de la ruta cambia notablemente, la variabilidad de los intervalos aumenta.
- *Número de intersecciones semaforizadas existentes antes de la parada y los tiempos de rojo en ellos,* corresponden a factores que intensifican la probabilidad de observar variabilidad de los intervalos, dado que se interrumpe el flujo libre del tránsito (Arriagada, 2016).
- *Variabilidad de los intervalos programados al inicio de la ruta* generan un mayor impacto en la ocurrencia de apelsonamiento de buses. Por lo tanto, mientras más irregular sean los despachos, la variabilidad de los intervalos en ruta será mayor (Moreira-Matias et al., 2012; Arriagada, 2016).

A su vez, los factores que afectan la variabilidad del tiempo de viaje se relacionan con aquellos que inciden en la variabilidad de los intervalos (Arriagada, 2016). Además del largo de la ruta, la variabilidad de subidas y bajadas en paradero, y el número de intersecciones semaforizadas, otros que se destacan son:

- *Condiciones del tráfico.* Congestión e incidentes de tránsito corresponden a unas de las principales fuentes de variabilidad del tiempo de viaje. Por un lado, la congestión recurrente, es decir, aquella que se evidencia día a día dado que la capacidad vial ofrecida no es capaz de satisfacer la demanda, incide sobre la confiabilidad del tiempo de viaje, mientras que la congestión no recurrente originada por eventos imprevistos para el usuario, afecta excesivamente los tiempos. Por lo tanto, antes eventos de congestión la

variabilidad del tiempo de viaje aumenta, como también la irregularidad de los intervalos entre buses (Durán, 2016).

- *Número de paraderos.* Esta variable aumenta de forma significativa la variabilidad del tiempo de viaje. Mientras mayor sea la cantidad de paraderos, el bus se detiene en mayor medida y se reduce la velocidad comercial del servicio (El-Geneidy et al., 2011).
- *Infraestructura en la vía.* La presencia de prioridad en la vía para buses, es decir, corredores segregados o pistas solo bus, implican una menor variabilidad del tiempo de viaje en comparación con los buses que deben circular bajo tráfico mixto (Durán, 2016). Por lo tanto, estas medidas de infraestructura que benefician la operación del transporte público podrían implicar una menor variabilidad de los intervalos

Los servicios que se ven aquejados por intervalos irregulares afectan la satisfacción de los usuarios hacia el sistema, dado que los tiempos de espera se ven incrementados y existe una incertidumbre en cuanto al tiempo de viaje. Dado la relevancia que toma el tiempo de espera en la percepción del usuario sobre la calidad de servicio recibido, es que se ha convertido en uno de los atributos más estudiados en la literatura. Para reducir la espera se cuenta con dos opciones (García, 2016):

- *Aumentar la frecuencia,* lo cual disminuye el intervalo entre buses y origina que los usuarios que arriban a la parada de forma aleatoria esperen menos.
- *Mejorar la confiabilidad,* solución que reduce la variabilidad de los intervalos y con ello, disminuye la probabilidad de que los usuarios arriben al paradero en un intervalo largo entre buses.

En servicios que operan a alta frecuencia (intervalos entre buses menores o iguales a 10 minutos), donde se supone que los intervalos son independientes entre sí y que la llegada de los usuarios a los paraderos distribuye uniforme dado que no programan su arribo a la estación, la irregularidad en ruta origina una mayor probabilidad de llegar en un intervalo largo y por ende, subir a un bus retrasado y lleno de pasajeros, que circula a una menor velocidad, ya que el tiempo de detención en las paradas ha aumentado producto del aumento en el número de subidas y bajadas, incrementando el tiempo de viaje y degradando la percepción del usuario por el servicio (Arriagada, 2016). Esta relación entre la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses y el tiempo de espera promedio por usuario, queda descrita en la ecuación (2.1) en función del intervalo promedio ( $\bar{h}$ ) y la varianza del intervalo ( $\sigma^2(h)$ ) (Ozuna y Newell, 1972).

$$E(t_e) = \frac{\bar{h}}{2} + \frac{\sigma^2(h)}{2\bar{h}} \quad (2.1)$$

Por otro lado, en servicios que operan bajo itinerario, la irregularidad de los intervalos genera que un bus retrasado recoja tanto a pasajeros que estaban esperando por él como también a aquellos que arribaron tempranamente al paradero a esperar el próximo bus. Como consecuencia, el número de subidas y el tiempo de detención aumentan, el bus se retrasa aún más, el próximo bus llevará menos pasajeros y el tiempo de espera de los usuarios de las siguientes paradas, se incrementa. Por lo tanto, el efecto del apolonamiento en servicios operados por intervalos,

donde la regularidad toma más relevancia, es más grave que en servicios bajo itinerarios para los cuales la puntualidad es clave (Arriagada, 2016).

A su vez, en su investigación Moreira-Matias et al. (2012) detecta las siguientes consecuencias provocadas por el fenómeno de apelsonamiento: demora adicional del bus, vehículos llenos, disminución de la comodidad, largos tiempos de espera en parada, aumento en el número de pasajeros que esperan la llegada de bus, mayor demanda de los recursos y disminución de la confiabilidad de horarios. Estas consecuencias en su conjunto pueden originar una fuga de pasajeros hacia otros modos.

A partir de lo planteado se deduce que la variabilidad de los intervalos entre buses genera efectos sobre los distintos agentes del sistema, tanto usuarios como operadores, afectando la confiabilidad por el servicio, la espera en paradero para pasajeros, el uso eficiente de la flota y la valoración que los usuarios tienen por el sistema.

## **2.2. Estrategias de control de operaciones para afrontar el apelsonamiento de buses**

Ante la cotidianeidad del fenómeno de apelsonamiento de buses y sus consecuencias provocadas sobre la percepción del servicio para el usuario, se han desarrollado distintas estrategias que tienen como finalidad reducir la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses y mejorar la confiabilidad.

Moreira-Matias et al. (2012) propone dos caminos para mitigar el apelsonamiento de buses. La primera alternativa planteada se basa en una adecuada planificación, que tenga como objetivo ajustar los planes horarios existentes. La segunda familia de estrategias se basa en decisiones en tiempo real, usando datos que permitan evaluar la red y tomar alguna acción que mantenga al sistema estable.

Por otro lado, las estrategias para mejorar la confiabilidad, de acuerdo a lo señalado en Cham (2006), pueden ser clasificadas en:

- *Estrategias de prioridad*, basadas en dar un trato especial a los buses con el fin de reducir los efectos de factores externos, como por ejemplo, inclusión de pistas exclusivas o de señales de prioridad para transporte público.
- *Estrategias de control*, basadas en información obtenida en tiempo real, como por ejemplo, retención de buses (holding), salto de paradas, modificaciones en la velocidad y adelantamiento.
- *Estrategias operacionales*, relacionadas con los cambios en la ruta, horario y asignación de recursos, como por ejemplo, reservas de vehículos y conductores, y ajustes en los horarios planificados.

Estas medidas a su vez pueden agruparse en dos categorías: estrategias preventivas, las cuales buscan reducir la probabilidad de desarrollar problemas de confiabilidad, y estrategias

correctivas, que tienen como objetivo evitar la propagación de incidentes y recuperar el estado normal de la operación (Cham, 2006).

Específicamente, las estrategias de control operacional pueden ser clasificadas como se expone a continuación (García, 2016):

- *Estrategias programadas o decididas en tiempo real*
- *Estrategias implementadas en parada o en ruta.*
- *Estrategias basadas en intervalos (para servicios de alta frecuencia) o en itinerarios (para bajas frecuencias).*

Con respecto a este último grupo, las estrategias basadas en itinerarios se caracterizan por estar enfocadas en servicios con intervalos largos, donde el cumplimiento del horario planificado es el más importante objetivo en la operación. Por otro lado, las estrategias basadas en intervalos se enfocan en servicios con una frecuencia mayor, por lo tanto, el principal objetivo operacional a cumplir es la mantención del intervalo, dado que la espera del usuario se ve reducida cuando los buses están uniformemente espaciados en la ruta (Strathman, 2001).

Una de las estrategias de control operacional más utilizadas por los sistemas de transporte público es la retención de buses en paradas, también conocida como “holding”. Su finalidad es mantener al bus detenido por unos momentos, hasta que se alcance el horario programado de salida (en caso de servicios que operan por itinerario) o bien, hasta que se cumpla el intervalo esperado entre dos buses consecutivos (servicios operados con frecuencia mayor). En este último caso, el uso de datos GPS en ruta resulta de mucha utilidad, ya que entrega información en tiempo real del posicionamiento del bus y a partir de ello, se pueden tomar decisiones en función de la situación actual en la que el sistema se encuentre. Algunos ejemplos de ello son las investigaciones realizadas por Daganzo (2009) y Chen et al. (2013). No obstante, la implementación de estrategias de tipo “holding” pueden traer consecuencias como el aumento del tiempo de viaje dentro del bus y de los costos de operación.

Otras metodologías desarrolladas en la literatura son: control de velocidad de buses usando información en tiempo real, salto de paraderos (Cortés et al., 2010) y prioridad en intersecciones semaforizadas. Por ejemplo, en Lizana et al. (2014) se expone el diseño de un software que entrega indicaciones a los conductores, respecto a si deben aumentar o reducir la velocidad y el tiempo que permanecen detenidos en el paradero, con el fin de reducir la espera de los pasajeros tanto en el bus como en la parada.

### **2.3. Variabilidad de los intervalos programados al inicio de la ruta**

La variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta ha sido reconocida como una de las variables que incide en la regularidad de los buses a lo largo de la ruta. Sin embargo, en la literatura no se ha explicado con modelos estadísticos cuáles son las causas de tal fenómeno.

En una evaluación de la operación de los buses de Chicago realizada partir de datos de localización automática de vehículos por GPS y de conteo de pasajeros, Hammerle et al., (2005) encuentra que los intervalos irregulares son observados incluso en el inicio, en los terminales de buses. Esto implica que el apelotonamiento en ruta pueda ser atribuible a aquellos buses que dejan el terminal con un intervalo corto respecto al bus que le antecede, situación que se mantiene o empeora a lo largo del recorrido. Por otro lado, la implementación de acciones que permitan controlar los intervalos irregulares que inician en el terminal resulta menos molesta para los usuarios que las medidas que puedan ser incorporadas en medio de la ruta.

De igual forma en Cham (2006), investigación que tiene como fin revisar los elementos principales de la confiabilidad de buses, se identifica a la variabilidad de los intervalos en los terminales como una de las principales fuentes de servicios poco confiables. Según los resultados obtenidos, las causas de esta desviación del intervalo respecto al programa son una combinación de una pobre supervisión en el terminal y del comportamiento del operador, a pesar de que el inicio de la ruta es uno de los puntos donde aquellos que ofrecen el servicio poseen mayor control.

Dentro de los efectos que puede originar un despacho tarde desde el terminal (Chem, 2006), se pueden mencionar:

- *Incremento de las subidas en paraderos aguas abajo*, si es que los pasajeros llegan de forma aleatoria a la parada como es el caso de los servicios con alta frecuencia.
- *Aumento en los tiempos de detención*, lo cual incrementa el tiempo de viaje

Si no existe un tiempo suficiente al final del viaje capaz de recuperar estos retrasos, los buses podrían llegar tarde de regreso al terminal, afectando los próximos despachos. Con respecto a las causas que pueden generar retraso en los despachos (Chem, 2006), se destacan las siguientes:

- *Operador o vehículo no disponible*, ya sea por un mal funcionamiento del bus o por una reasignación del conductor producto del ausentismo.
- *Arribo tardío de un viaje previo*. Si la holgura asignada en el terminal es insuficiente, las demoras de cada viaje serán propagadas a los próximos despachos. El retraso en el regreso de un bus, respecto al horario esperado, puede ser consecuencia de una mala programación (holguras muy ajustadas), o bien demoras por las condiciones del tráfico, carga de pasajeros o comportamiento del conductor.
- *Comportamiento del operador*, dado que si el conductor desconoce el horario programado para el despacho, podría tomar un tiempo de descanso mayor al asignado.

Moreira-Matias et al. (2012) estudia la secuencia de paraderos de buses donde la desviación del intervalo observado en comparación con el programado, origina apelotonamiento de buses. Para ello utiliza dos líneas urbanas de un operador de transporte público de la ciudad de Porto. Su investigación arroja que el fenómeno de apelotonamiento comienza en los paraderos iniciales, existiendo correlación entre la desviación del intervalo en un paradero dado y la de las siguientes paradas.

En Murphy et al., (2016) se investigan las causas de la impuntualidad observada en los despachos, encontrando que el primer punto de control de regularidad es afectado en mayor medida por el comportamiento del operador y los horarios programados, por sobre otros factores externos que si indican por ejemplo, en la regularidad de los intervalos en ruta. De esta investigación se deduce que al existir holguras ajustadas entre expediciones consecutivas, el cumplimiento del intervalo esperado resulta más complejo, dado que es probable que se generen retrasos en el inicio del recorrido, lo cual afecta los despachos programados y con ello a la regularidad.

Con respecto a estudios basados en el sistema de transporte público de Santiago, Arriagada (2016) identifica los factores que aumentan y reducen la intensidad del fenómeno de apelonamiento a partir de la estimación de modelos de regresión lineal múltiple. Una de las variables con mayor relevancia es la regularidad en el despacho. Mientras menor sea la variabilidad de los intervalos en el despacho de buses, más se favorece la mantención de intervalos en ruta.

Por otro lado, en García (2016), investigación que enfrenta la problemática de la elección de estrategia de control operacional con un enfoque mixto que permita operar distintos segmentos del recorrido con diferentes esquemas de control, se deduce que la principal diferencia en regularidad entre los distintos operadores de Transantiago se origina por el despacho regular desde el cabezal. A su vez, mientras más largo sea el recorrido resulta más difícil cumplir con los itinerarios definidos en el cabezal inicial, ya que los buses tienden a regresar después de lo planificado al comienzo del servicio.

## 2.4. Medidas de variabilidad de intervalos

Con el objetivo de medir la variabilidad de los intervalos, se han propuesto una serie de indicadores en la literatura que pueden ser clasificados de la siguiente manera (Nuñez, 2015):

- *Indicadores de regularidad estadística:* Se basan en medidas estadísticas de la variabilidad, como por ejemplo desviación estándar, coeficiente de variación, índice por observación y tiempo de espera en exceso. No necesariamente tienen una relación clara con la percepción de los usuarios.
- *Indicadores de puntualidad:* Se basan en la comparación con un itinerario establecido (baja frecuencia) o bien, acotan los intervalos a un umbral superior (alta frecuencia), como por ejemplo los indicadores actuales ICR-I e ICR-P del sistema Transantiago.
- *Indicadores de percentil extremo:* Utilizan un percentil extremo para representar la variabilidad de los usuarios. Se caracterizan por examinar las peores experiencias de los pasajeros, ser sensibles a intervalos muy grandes y difíciles de calcular.

No existe una única metodología capaz de cuantificar la percepción de los usuarios con respecto a la regularidad. No obstante, esta investigación centra su estudio en los dos primeros grupos, los cuales se detallan a continuación:

- *Desviación estándar de los intervalos observados*,  $STD(h_{obs})$ : Este indicador se caracteriza por ser simple de obtener y por considerar simetría de los intervalos. Es una de las medidas de variabilidad más recurrentes usadas en la literatura, sin embargo, presenta inconvenientes al ser simétrica y no representar la inclinación que puede tener la distribución de probabilidad (en el caso del tiempo de viaje en ruta, las distribuciones suelen tener una cola derecha más larga) (Durán, 2016).

$$STD(h_{obs}) = STD\left(\frac{1}{f_{obs}}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{obsi} - \bar{h}_{obs})^2}{N}} \quad (2.2)$$

Una alternativa de este indicador es obtener la desviación estándar de la diferencia entre el intervalo observado y el intervalo programado,  $STD(h_{obs} - h_{prog})$ , dado que se ha detectado que dicha medida distribuye aproximadamente normal, mientras que el intervalo observado no lo hace (Nuñez, 2015).

- *Coefficiente de variación de los intervalos observados*,  $CV(h_{obs})$ : Corresponde a la razón entre la desviación estándar de los intervalos observados y su promedio. Es un indicador de variabilidad comúnmente utilizado en la literatura.

$$CV(h_{obs}) = \frac{STD(h_{obs})}{\bar{h}_{obs}} = STD(h_{obs}) \cdot \overline{f_{obs}} \quad (2.3)$$

- *Tiempo de espera en exceso*, TEE: En la espera existe una componente inherente al funcionamiento del transporte público  $\left(\frac{\bar{h}_{obs}}{2}\right)$ , que depende del supuesto de llegadas uniformes a los paraderos (razonable para servicios de alta frecuencia), y otra componente que depende de la variabilidad de las pasadas de los buses conocida como tiempo de espera en exceso (Nuñez, 2015).

$$TEE = E(t_e) - \frac{\bar{h}_{obs}}{2} = \frac{STD^2(h_{obs})}{2 \cdot \bar{h}_{obs}} \quad (2.4)$$

- *Razón entre el intervalo observado y el intervalo programado*,  $HR_i$ : Medida que relaciona el intervalo observado con el valor planificado. Cuando toma un valor igual a 1 significa que existe una perfecta correspondencia entre lo observado y lo programado en la parada  $i$ . Por otro lado, cuando el indicador está por sobre o por debajo de 1, se evidencia una desviación positiva o negativa del intervalo observado respecto al intervalo planificado (Strathman, 1999).

$$HR_i = \frac{h_{obsi}}{h_{prog_i}} \quad (2.5)$$

- *Indicador de cumplimiento de regularidad según intervalos entre buses fuera de rango (incidentes)*, ICR-I: Medida que tiene como finalidad determinar el desempeño de la regularidad para los servicios-sentido-periodo de alta frecuencia, es decir, con un número de expediciones programado mayor o igual a 15 buses/hora (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2012).



En primer lugar, se define un intervalo de tiempo aceptable ( $TA_{j,p}$ ) para el servicio-sentido  $j$  y un periodo  $p$ , en minutos:

$$TA_{j,p} = h_{j,p}^{\text{prog}} + Hol_{j,p}^{\text{Inc}} \quad (2.6)$$

La holgura ( $Hol_{j,p}^{\text{Inc}}$ ) para el servicio-sentido  $j$  en el periodo  $p$ , en minutos, se muestra en la ecuación (2.7), la cual depende del intervalo programado ( $h_{j,p}^{\text{prog}}$ ), toma como valor mínimo 3 minutos y máximo 10 minutos.

$$Hol_{j,p}^{\text{Inc}} = \text{Max}\{3; \text{Min}\left\{\left(0,4 \cdot h_{j,p}^{\text{prog}}\right); 10\right\}\} \quad (2.7)$$

Se define un incidente en un intervalo observado ( $h_{j,p}^{\text{obs}}$ ), para el servicio-sentido  $j$ , periodo  $p$  y punto de control  $c_{i,j}$  ( $\text{Inc}_{j,p}(c_{i,j})$ ) como:

$$\text{Inc}_{j,p}(c_{i,j}) = (\text{Max}\{0; h_{j,p}^{\text{obs}}(c_{i,j}) - TA_{j,p}\})^2 \quad (2.8)$$

En aquellos casos donde  $\text{Inc}_{j,p}(c_{i,j}) = 0$ , se considera que no existe incidente en el intervalo observado. Por lo tanto, el indicador ICR-I corresponde a la razón entre el número de intervalos sin incidentes y el número total de intervalos observados durante el periodo de medición  $T$ .

- *Indicador de cumplimiento de regularidad según puntualidad en ruta, ICR-P:* Medida que tiene como finalidad determinar el desempeño de la regularidad para los servicios-sentido-periodo de baja frecuencia, es decir, con un número de expediciones programado menor o igual a 5 buses/hora (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2012).

Su cálculo requiere de un itinerario de paso por un punto de control en la ruta. A partir de él, se constata el tiempo de paso de cada bus por el punto de control con el tiempo definido en el itinerario. Por otro lado, los instantes de paso programados ( $g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j})$ ) son definidos en el programa de operación, para cada servicio-sentido  $j$ , periodo  $p$  y punto de control  $c_{i,j}$ .

Se define el desfase efectivo  $d(g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}))$  de un instante de paso programado para el servicio-sentido  $j$ , periodo  $p$  y punto de control  $c_{i,j}$  como se muestra a continuación:

$$d(c_{i,j}) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_{j,p}^{\text{obs}}(c_{i,j}) \in \{g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}) - 2; g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}) + 4\} \\ g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}) - g_{j,p}^{\text{obs}}(c_{i,j}) & \text{si } g_{j,p}^{\text{obs}}(c_{i,j}) \notin \{g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}) - 2; g_{j,p}^{\text{prog}}(c_{i,j}) + 4\} \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde  $g_{j,p}^{\text{obs}}(c_{i,j})$  corresponde al siguiente instante en que se observa el paso de un bus por el punto de control. Finalmente, el indicador ICR-P equivale a la razón entre el número de desfases efectivos iguales a cero y el total de instantes de paso programados estudiados durante el periodo de medición  $T$ .

- *Índice por observación*, IPO: Indicador continuo de tipo estadístico basado en el ratio de tiempo de espera relativo de los pasajeros, el cual se caracteriza por capturar casos de variabilidad de intervalos menos notorios. Éste depende del intervalo observado entre buses ( $h_{obs}$ ), del intervalo programado entre buses ( $h_{prog}$ ) y del número de observaciones realizadas ( $N$ ) (Arriagada, 2016).

$$IPO = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{h_{obs}}{h_{prog}} \right)^2}{N} \quad (2.10)$$

El indicador IPO está relacionado directamente con el coeficiente de variación (CV) de los intervalos observados, mediante la siguiente expresión. Notar que este indicador alcanza su mínimo valor igual a uno cuando no existe variabilidad en los intervalos (Arriagada, 2016).

$$IPO = CV^2 + 1 \quad (2.11)$$

# Capítulo 3

## Recopilación y generación de datos

Los datos usados en el presente trabajo entregan información correspondiente al sistema de transporte público de la ciudad de Santiago de Chile. Ellos fueron obtenidos a partir del sistema de posicionamiento de vehículos basado en GPS y de conteo de pasajeros basado en las transacciones de pago.

Los vehículos de Transantiago disponen de dispositivos GPS. La posición geográfica de los buses es entregada por el proveedor tecnológico del sistema cada 30 segundos. En su conjunto, posicionamiento GPS y transacciones realizadas mediante la tarjeta inteligente, permiten determinar información operacional de mucha utilidad, como por ejemplo los intervalos entre buses consecutivos que pasan por un respectivo paradero, el tiempo que tarda un bus en completar su ruta o bien, el perfil de carga del servicio.

### 3.1. Descripción de los periodos en estudio

El presente trabajo está enfocado en estudiar la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos al inicio de la ruta, en un periodo del día caracterizado por:

- *Dar inicio a la operación diaria de la mayoría de los servicios-sentido del sistema*, es decir, en el periodo comprendido entre las 5:30 y las 8:29 de la mañana ocurren gran parte de los primeros despachos programados.
- *Alta demanda por transporte público*, el cual es uno de los modos disponibles que busca satisfacer viajes, en su mayoría, con propósitos trabajo y estudio, provenientes principalmente desde los sectores residenciales de la ciudad hacia los grandes centros que concentran actividades.

#### 3.1.1. Periodo 1: Transición Nocturna

En este caso, se usan datos de distintos servicios de Transantiago, para el periodo comprendido entre las 5:30 y las 6:29 horas, en la semana laboral que inicia el día lunes 14 de marzo de 2016 y finaliza el viernes 18 de marzo del mismo año.

### **3.1.2. Periodo 2: Punta Mañana**

En este caso, se usan datos de distintos servicios de Transantiago, para el periodo comprendido entre las 6:30 y las 8:29 horas, en la semana laboral del 14 al 18 de marzo de 2016, el cual es comúnmente conocido como Punta Mañana debido a la alta demanda y congestión vehicular que se evidencia.

### **3.1.3. Infraestructura y paraderos en el sistema de transporte público de Santiago**

La ciudad de Santiago se caracteriza por poseer una infraestructura vial para buses en algunos ejes, la cual cuenta con vías exclusivas, pistas sólo bus y vías segregadas. En primer lugar, las vías exclusivas funcionan en horarios punta, de lunes a viernes, siendo prohibida la circulación de vehículos particulares desde las 07:30 a las 10:00 de la mañana y entre las 17:30 y las 21:00 horas. Por otro lado, las pistas sólo bus se ubican al lado derecho de la vía y operan durante las 24 horas del día, todo el año. En ellas, los vehículos particulares pueden circular por la pista izquierda de la vía o bien pueden ingresar a la pista derecha en caso de que necesiten virar, situación que incentiva a los conductores a no respetar la prioridad que posee el bus. Finalmente, las vías segregadas, comúnmente conocidas como corredores de buses, se caracterizan por su segregación física y exclusividad al transporte público (Directorio de Transporte Público Metropolitano, 2016).

Estas medidas de prioridad enfocadas en los buses permiten disminuir los tiempos de viaje, mejorar la regularidad de los servicios y el desempeño de las empresas. No obstante, de acuerdo a lo reportado por el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM), a la fecha solo se dispone de 61,7 km de vías segregadas, 31 km de vías exclusivas y 119,3 km de pistas sólo bus, por ende los buses deben circular principalmente en tráfico mixto, compartiendo la vía con los modos de transporte privado.

En lo que respecta a los puntos de parada, según lo mencionado por el DTPM, en la actualidad existe un total de 11.208 paraderos distribuidos por la ciudad, de los cuales un 84% cuenta con refugio. A su vez, en aquellas paradas donde la demanda de pasajeros o el flujo de buses son altos, es probable encontrar zonas pagas. Su implementación se concentra principalmente en periodos punta y permite al pasajero pagar su pasaje antes de subir al bus, reduciendo los tiempos de detención en el paradero.

## **3.2. Generación de datos**

A continuación se exponen las metodologías desarrolladas para la generación de los datos usados en la investigación de la regularidad de los intervalos de tiempo al inicio de la ruta. Notar que por lo general, cada servicio se realiza en dos sentidos, ida y retorno. Es por ello que en adelante éstos serán llamados “servicio-sentido”. Por otro lado, se define como expedición al viaje efectuado entre el inicio y el fin de un servicio-sentido.

### 3.2.1. Intervalos de tiempo entre buses consecutivos que pasan por el primer paradero del servicio

La base de datos disponible contiene para cada servicio-sentido del sistema los instantes de pasada por los paraderos que forman parte de la respectiva ruta, los cuales fueron obtenidos gracias a los dispositivos GPS ubicados en los buses. A su vez, se cuenta con información específica del paradero (código, nombre, correlativo en ruta) y del bus (patente, hora de inicio y de término del viaje), lo que permite identificar cada expedición realizada por el vehículo.

No obstante, dado que este trabajo se enfoca en estudiar la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, solo se trabajó con los instantes de pasada por el primer paradero de cada servicio-sentido (correlativo igual a 1), para los cinco días laborales estudiados (desde el 14 de marzo de 2016 al 18 de marzo del mismo año).

Es importante mencionar que no se cuenta con el instante exacto cuando se realiza el despacho de buses desde el cabezal de inicio del servicio-sentido. Sin embargo, el primer paradero está posicionado próximo al cabezal, e incluso en algunos casos su ubicación coincide, por lo tanto el uso de datos relativos al paradero número 1 corresponde a una correcta representación del fenómeno en estudio.

El segundo filtro realizado tiene relación con el periodo del día, generándose con ello dos nuevas bases de datos. En la primera se han eliminado todas las expediciones donde el instante de pasada por el primer paradero no esté contenido entre las 5:30 y las 6:29 horas, mientras que la segunda base de datos solo cuenta con los instantes de paso por la parada número 1, observados entre las 6:30 y las 8:29 horas.

Un tercer filtro efectuado fue eliminar aquellas expediciones de servicios-sentido que, según lo establecido en el plan operacional, no les corresponde estar en circulación en los respectivos periodos de estudio. Con ello, se calcula el intervalo, en minutos, como el tiempo que existe entre dos expediciones consecutivas del mismo servicio-sentido que pasan por el primer paradero respectivo.

Por otro lado, en ambas bases de datos generadas se detectaron intervalos de tiempo muy grandes, que tienden a ensuciar las observaciones. Se define un “intervalo afectado” como aquel que cumpla la siguiente condición, la cual depende del tiempo aceptable (TA) del servicio-sentido, es decir, del intervalo programado y de la holgura establecida (ecuación 2.7):

$$h_{\text{obs}} > 2 \cdot TA = 2(h_{\text{prog}} + Hol) \quad (3.1)$$

Dentro de las posibles causas que pueden originar estos intervalos mayores a los esperados, se pueden señalar dos:

- *Ausencia de pulsos GPS.* Por posibles problemas tecnológicos asociados al GPS, existen expediciones donde no se conoce el instante de paso del bus por el primer paradero, pero si se observa el tiempo de pasada por paraderos aguas debajo de éste. Ello conlleva a que se registren intervalos más largos que los evidenciados realmente por los pasajeros en el paradero número 1.

- *Problemas en la operación.* Si efectivamente el usuario observa un intervalo extremadamente grande y con ello, su tiempo de espera aumenta, significa que existen problemas operacionales. Los atrasos en los despachos programados desde el cabezal tienen distintas fuentes. Tal como se menciona en el capítulo anterior, las más frecuentes son que el vehículo o el conductor no estén disponibles para iniciar el servicio (por mantención o ausentismo, respectivamente), o bien, el arribo tardío de un bus que está finalizando un viaje previo.

Para cada “intervalo afectado” se define su causante usando los instantes de pasada de buses por el cuarto paradero del respectivo servicio-sentido. Si se identifica que existen expediciones que no fueron registradas en su paso por el primer paradero pero sí por el paradero número cuatro, entonces el intervalo en cuestión se ve perjudicado por la ausencia pulso GPS. En este caso, tales intervalos son eliminados de la base de datos. Por el contrario, si se determina que el origen del intervalo largo es un problema de operación, la observación se mantiene. Con ello, en el periodo 1 de estudio se encontraron 41 expediciones con ausencia de pulsos GPS en el primer paradero, mientras que para el periodo 2 se tienen 75 expediciones con esta situación.

A su vez, existen servicios-sentido que de acuerdo al plan operacional deberían presentar observaciones, no obstante no existe registro de su circulación en los periodos trabajados. En estos casos, se ha decidido eliminar tales servicios-sentido de la investigación, ya que no es posible evaluar la regularidad de sus intervalos en el inicio de la ruta sino se dispone de tal información. En el periodo 1 de estudio, 5 servicios-sentido cumplen tal condición mientras que en el periodo 2 se tienen 8 servicios-sentidos que son eliminados por este motivo.

De igual forma, se eliminan de la base de datos los servicios-sentido que cuentan con un solo despacho diario observado en el periodo respectivo, dado que no es posible evaluar la regularidad entre buses consecutivos a partir de una única expedición. Luego, en el periodo 1 de estudio se encontraron 9 servicios-sentido, mientras que en el periodo 2 sólo un servicio-sentido satisface esta situación.

Tras aplicar todos los filtros antes mencionados, se obtiene un total de 579 servicios-sentido circulando por la ciudad de Santiago, 17907 expediciones y 14900 intervalos entre buses consecutivos que pasan por el primer paradero, para el periodo comprendido entre las 5:30 y las 6:29 horas. Por otro lado, para el periodo Punta Mañana (6:30 a 8:29 horas) se dispone finalmente de 679 servicios-sentido, 48203 expediciones y 44476 intervalos.

### **3.2.2. Frecuencia de buses programada**

El Directorio de Transporte Público Metropolitano dispone de información histórica relativa al plan operacional, donde se define y regula las características de los servicios-sentido. En particular, uno de los parámetros que se encuentran en el archivo “Consolidado de Frecuencias-Capacidades-Distancias-Velocidades.xlsx”, generado por el DTPM, es la frecuencia programada (en buses/hora) establecida hasta el 30 de Abril del 2016, para cada uno de los servicios-sentido del sistema. El documento puede ser filtrado por tipo de día y por periodo de interés. En este caso, se extrae la información del número de despachos planificado por servicio-sentido, para un día de tipo laboral, para los periodos Transición Nocturna (TNOC) y Punta Mañana (PMA).

### 3.2.3. Largo de ruta por servicio

Al igual que en el caso anterior, en el archivo “Consolidado de Frecuencias-Capacidades-Distancias-Velocidades”, reportado por el DTPM, se encuentra la distancia promedio (en km) por servicio-sentido, la cual fue válida hasta el 30 de Abril del 2016. El documento nuevamente es filtrado, obteniéndose la información respectiva de un día de tipo laboral, para los periodos Transición Nocturna (TNOC) y Punta Mañana (PMA).

### 3.2.4. Tiempos de viaje de las expediciones observadas y velocidades comerciales

Tal como fue mencionado, la base de datos disponible gracias a los dispositivos GPS en buses no solo entrega información de los instantes de pasada por los paraderos, sino que también proporciona la hora de inicio y término de cada expedición. A partir de estos valores, es posible determinar el tiempo de viaje de una expedición como la diferencia entre la hora de término y la hora de inicio. Notar que para el periodo 1 de estudio se calcula el tiempo de viaje de 17907 expediciones, mientras que para el periodo 2 se obtienen 48203 tiempos de viaje.

Por otro lado, la velocidad comercial de un bus corresponde a la velocidad media de viaje, considerando todas las detenciones que realiza el vehículo a lo largo de la ruta que le implican una demora adicional, como por ejemplo la existencia de intersecciones y paraderos, entre otros.

Para determinar la velocidad comercial por servicio-sentido ( $V_{ci}$ ), se requiere conocer el largo de la ruta recorrida ( $l_i$ ), el total de expediciones realizadas en los periodos estudiados ( $n_i$ ) y sus respectivos tiempos de viaje ( $t_{in}$ ).

$$V_{ci} = \frac{l_i}{\sum_{k=1}^{n_i} \frac{t_{ik}}{n_i}} = \frac{n_i \cdot l_i}{\sum t_{in}} \quad (3.2)$$

La columna de información generada entrega la velocidad comercial observada entre las 5:30 y las 6:29 horas y entre las 6:30 y las 8:29 horas, usando datos registrados en la semana laboral que abarca desde el 14 al 18 de marzo de 2016. En ella, se evidencia un servicio-sentido por periodo con valor de velocidad comercial mayor a 60 km/h, razón por la cual se eliminan tales registros de velocidad de los respectivos servicios-sentido, dado que pueden estar sujetos a errores en los pulsos GPS.

### 3.2.5. Subida de pasajeros por servicio

Como se señaló en capítulos anteriores, el medio de pago disponible en los buses de Transantiago es la Tarjeta Bip!. Los usuarios deben acercar su tarjeta (*smartcard*) al validador, el cual se encuentra al interior del bus o de la zona paga si éste fuera el caso. Esto permite recopilar datos acerca del lugar, día, hora y bus donde se hizo la validación. El cruce de información entre

el posicionamiento GPS del bus y la transacción realizada por el usuario al pagar su viaje, entrega información asociada al número de subidas de pasajeros por cada paradero.

La base de datos disponible contiene para cada servicio-sentido del sistema el total de subidas realizadas a un bus, en cualquiera de los paraderos donde se detiene el respectivo vehículo de acuerdo a la ruta que le corresponda cumplir. A su vez, se cuenta con información específica de la parada (código, nombre, correlativo en ruta) y del bus (patente, hora de inicio y de término del viaje).

El primer filtro realizado tiene relación con el periodo del día, donde solo se conserva la información recolectada entre las 5:30 y 6:29 horas, como también entre las 6:30 y las 8:29 horas. Con ello, es posible determinar el total de subidas realizadas a cada servicio-sentido en los periodos de operación de interés, durante los cinco días estudiados.

La demanda media por bus, por servicio-sentido para el día  $i$  ( $DM_i$ ) se obtiene de partir de la siguiente expresión, la cual depende del total de subidas registradas por servicio-sentido el día  $i$  ( $Sub_i$ ), el periodo de recolección de datos ( $t_i$ ) (una hora para el periodo 1 y dos horas para el periodo 2) y la frecuencia programada ( $f_{prog}$ ).

$$DM_i = \frac{Sub_i}{t_i \cdot f_{prog}} \quad (3.3)$$

La columna de información generada entrega demanda media por bus por servicio-sentido, entre las 5:30 y las 6:29 horas y entre las 6:30 y las 8:29 horas, usando datos registrados en la semana laboral que abarca desde el 14 al 18 de marzo de 2016. En ella, se ha fijado como valor mínimo 5 [pax/bus] y como máximo 150 [pax/bus], teniendo en consideración que los datos de subidas de pasajeros por paradero, obtenidos a partir de las transacciones bip!, no están corregidos por evasión al pago del pasaje, la cual en Santiago de Chile alcanza actualmente cerca de un 30%.

### **3.2.6. Catastro de ubicación y operación de cabezales, depósitos y primeras paradas, por servicio**

Los cabezales y depósitos son elementos importantes del sistema a la hora de evaluar el cumplimiento de las empresas en el inicio de la ruta de sus respectivos servicios. En particular, antecedentes como ubicación, infraestructura disponible y metodologías adaptadas para regular los despachos, resultan útiles de recopilar.

En primer lugar, se dispone del archivo “Cabezales & Puntos Regulación\_PO Marzo 2016.xlsx” facilitado por el DTPM, donde se encuentran antecedentes por servicio-sentido de cabezales y puntos de regulación. Específicamente, se cuenta con las coordenadas geográficas, dirección y comuna. Con ello, es posible definir si existe o no control de regularidad cuando el servicio-sentido comienza su ruta, es decir, a una distancia menor a 150 metros del cabezal. A su vez, se puede determinar el número de servicios-sentido que comparten cabezal con el fin de asociar el espacio disponible en el punto de inicio al desempeño del operador.



Paralelamente, Diego García tesista de la Pontificia Universidad Católica de Chile, proporciona el archivo “Terminales y cabeceras.xlsx”. En él se encuentran antecedentes de depósitos, como por ejemplo, coordenadas geográficas, dirección, comuna y operador a cargo del sitio. Esta información es complementada con lo reportado por las empresas. No obstante, no se conoce con exactitud a cuál depósito está asignado cada servicio-sentido, por lo tanto, para completar la información se debe cruzar la base de datos de cabezales con la de depósitos.

Dado que se dispone de la ubicación de cada cabezal por servicio-sentido, se procede a asignarle el depósito tal que se minimicen las distancias recorridas por el vehículo desde que éste deja el sitio hasta que se posiciona en el cabezal de inicio (comúnmente conocido como “kilómetros en vacío”, costo internalizado por el operador en la actualidad), sujeto a restricciones de capacidad del sitio en cuestión. A partir de lo anterior, es posible determinar si el cabezal de un respectivo servicio-sentido se ubica exactamente en el depósito o bien, definir el número de servicios-sentido que están asignados por cada depósito, de forma tal de dimensionar el tamaño del sitio.

Por otro lado, en los documentos históricos del plan operacional facilitados por el DTPM, es posible encontrar por servicio-sentido antecedentes de cada uno de los paraderos correspondientes. Específicamente se cuenta con la ubicación, comuna y nombre del paradero. Sin embargo, dado que esta investigación se focaliza en lo que sucede al inicio de la ruta, se procede a extraer solo la información asociada al primer paradero de cada servicio-sentido.

Un último elemento de interés por conocer es la distancia existente entre el depósito y el primer paradero del recorrido. Para obtenerla, se requiere el uso del software Google Earth. En él, se localiza el depósito y el primer paradero respectivo, para finalmente obtener la posible ruta mínima entre el origen y el destino solicitado. Este algoritmo es repetido para cada uno de los servicios-sentido que circulan en el periodo estudiado.

### **3.3. Recopilación de antecedentes en terreno: Estudio de la operación en cabezales de Transantiago**

Con el objetivo de conocer y analizar el desempeño de los operadores en los despachos de buses de Transantiago, se realizaron visitas a cabezales entre los días 14 y 23 de septiembre de 2016, en el periodo comprendido entre las 07:30 y las 08:30 horas.

Cabe señalar que una mala ubicación del cabezal puede generar congestión vehicular, molestia para los residentes del sector y mala calidad laboral para los conductores, quienes no siempre cuentan con un sitio para descansar. En la Tabla 3.1 se presenta el detalle de los servicios-sentido observados y sus principales características.

Tabla 3. 1: Descripción de cabezales visitados

<b>Servicio-Sentido</b>	<b>Ubicación Cabezal</b>	<b>Comuna</b>	<b>Frecuencia programada [buses/h]</b>
205I	Av. Santa Rosa / Marcoleta	Santiago	10.5
H13R	Diagonal Paraguay / Portugal	Santiago	5
D18R	Santa Isabel / Bustamante	Providencia	7
501I	Av. Vicuña Mackenna / Av. Francisco Bilbao	Providencia	11.5
213eI	Purísima / Cardenal José María Caro	Santiago	6.5

En cada visita se llevó a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo, a partir del intervalo real observado entre despachos de buses (Tabla 3.2) y del tiempo de detención del vehículo en el cabezal (Tabla 3.3). Se define el intervalo entre despachos como el tiempo transcurrido entre dos salidas de buses consecutivas desde el cabezal. Por otro lado, el tiempo de detención es medido desde que el bus llega al cabezal tras finalizar una expedición hasta que sale de este punto, iniciando nuevamente el servicio.

Tabla 3. 2: Medición en cabezal del intervalo entre despachos

<b>Intervalos observados entre despachos [min]</b>					
<b>Servicio</b>	<b>N° de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
205I	8	7,3	6,5	1	17
H13R	3	17,0	19	9	23
D18R	5	12,0	10	8	22
501I	11	5,6	6	2	8
213eI	6	7,8	8	5	10

Tabla 3. 3: Medición en cabezal del tiempo de detención

<b>Tiempo de detención en cabezal [min]</b>					
<b>Servicio</b>	<b>N° de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
205I	9	1,7	2	1	3
H13R	4	4,5	4	1	9
D18R	5	7,6	7	4	14
501I	12	5,4	5	2	10
213eI	7	9,4	8	1	21

### 3.3.1. Visita a cabezal del servicio 205I

El servicio 205 ida es operado por Subus Chile, circulando desde el centro de Santiago hacia la comuna de Puente Alto, ubicada en el sector sur-oriente de la ciudad. Su cabezal se encuentra en Av. Santa Rosa esquina Marcoleta (Figura 3.1). En el periodo observado, desde las 07:28 a las 08:28, se realizaron 9 despachos, con un intervalo promedio entre salidas igual a 7.3 [min] y un tiempo de detención en cabezal promedio de 1.7 [min].

El depósito desde donde es despachada la flota en este caso, se ubica en la comuna de Estación Central (San Alfonso esq. Ramón Subercaseaux). El bus sale de allí a posicionarse en el cabezal de inicio (antes que inicie el periodo Punta Mañana) y regresa al depósito solo cuando finaliza su operación por el día.

El cabezal asignado corresponde a un espacio en la vía pública y es compartido con otros servicios-sentido que también inician su ruta allí, lo cual origina congestión en los periodos críticos. Los buses llegan a este punto con una alta carga de pasajeros provenientes de la expedición de retorno. Sin embargo, la demanda de usuarios que esperan por abordar hacia Puente Alto es menor.

Por otro lado, los buses son despachados de forma inmediata, sin un mayor cumplimiento de la planificación. No existe una retención en la parada para mantener un intervalo regular entre despachos, dado que se busca no formar grandes colas y evitar multas. No obstante, se evidencia el fenómeno de apelotonamiento de buses desde el inicio del servicio.

Figura 3.1: Cabezal 205 ida



### 3.3.2. Visita a cabezal del servicio H13R

El servicio H13 retorno es operado por Buses Vule, circulando desde la comuna de Santiago Centro sector Posta Central hacia Santa Olga, Lo Espejo. Su cabezal se encuentra en Diagonal Paraguay esq. Portugal. En el periodo observado, desde las 07:21 a las 08:21, se realizaron 4

despachos, con un intervalo promedio entre salidas igual a 17 [min] y un tiempo de detención en cabezal promedio de 4.5 [min].

El depósito desde donde se despacha la flota en este caso, se ubica en la comuna de Lo Espejo (Pedro Lira 9161). El bus sale de allí a posicionarse al cabezal (antes que inicie el periodo Punta Mañana) y regresa al depósito solo cuando finaliza su operación del día.

El cabezal asignado corresponde a un espacio en la vía pública. El planillero a cargo intenta cumplir los horarios de salida programados, sin embargo, la congestión afecta el regreso de los buses al cabezal y con ello, la regularidad de los intervalos entre despachos.

### 3.3.3. Visita a cabezal del servicio D18R

El servicio D18 retorno es operado por Express de Santiago, circulando desde la comuna de Providencia, en las cercanías de la estación de metro Santa Isabel, hacia Diagonal Las Torres, Peñalolén. Su cabezal se encuentra en Santa Isabel esq. Seminario (Figura 3.2). En el periodo observado, desde las 07:34 a las 08:34, se realizaron 6 despachos, con un intervalo promedio entre salidas igual a 12 [min] y un tiempo de detención en cabezal promedio de 7.6 [min].

El depósito desde donde se despacha la flota en este caso, se ubica en la comuna de Peñalolén (Av. Las Torres esq. Álvaro Casanova). El bus sale de allí a posicionarse al cabezal (antes que inicie el periodo Punta Mañana).

El cabezal asignado corresponde a un espacio en la vía pública. El planillero a cargo intenta cumplir los horarios de salida programados, sin embargo, la congestión puede retrasar el retorno de los buses y con ello, afectar la planificación. El primer paradero del servicio se ubica a metros del cabezal y presenta una alta demanda de pasajeros, dada la cercanía de una estación de Metro.

Figura 3.2: Cabezal D18 retorno



### 3.3.4. Visita a cabezal del servicio 501I

El servicio 501 ida es operado por Buses Metropolitana (Metbus), circulando desde la comuna de Providencia, en las cercanías de la estación de metro Parque Bustamante, hacia Vital Apoquindo, Las Condes. Su cabezal se encuentra en Av. Vicuña Mackenna esq. Av. Francisco Bilbao (Figura 3.3). En el periodo observado, desde las 07:26 a las 08:31, se realizaron 12 despachos, con un intervalo promedio entre salidas igual a 5.6 [min] y un tiempo de detención en cabezal promedio de 5.4 [min].

El depósito desde donde se despacha la flota en este caso, se ubica en la comuna de Las Condes (Nueva Bilbao esq. Vital Apoquindo). El bus sale de allí a posicionarse al cabezal (antes que inicie el periodo Punta Mañana) y retorna a él cada vez que termina su recorrido, dado que el cabezal de inicio del servicio de retorno (501R) se ubica en el depósito mismo.

El cabezal asignado corresponde a un espacio en la vía pública. El planillero a cargo intenta cumplir los horarios de salida programados, sin embargo, la congestión puede retrasar el retorno de los buses, afectando a la planificación. El primer paradero del servicio se ubica a metros del cabezal y presenta una alta demanda de pasajeros, dada la cercanía de una estación de Metro.

Figura 3.3: Cabezal 501 ida



### 3.3.5. Visita a cabezal del servicio 213eI

El servicio 213e ida es operado por STP, circulando desde la comuna de Santiago, en las cercanías de la Plaza Italia, hacia Puente Alto. Su cabezal se encuentra en Purísima esq. Cardenal José María Caro (Figura 3.4). En el periodo observado, desde las 07:20 a las 08:20, se realizaron 7 despachos, con un intervalo promedio entre salidas igual a 7.8 [min] y un tiempo de detención en cabezal promedio de 9.4 [min].

El depósito desde donde se despacha la flota en este caso, se ubica en la comuna de Puente Alto (Juanita Oriente esq. Acceso Sur). El bus sale de allí a posicionarse al cabezal (antes que inicie el periodo Punta Mañana). Este servicio se caracteriza por ser expreso.

El cabezal asignado corresponde a un espacio en la vía pública, el cual es compartido con dos servicios que tienen su parada allí. El planillero a cargo intenta cumplir los horarios de salida programados y mantener una regularidad en los intervalos entre buses despachados. Por otro lado, cada chofer dispone idealmente de a lo menos 5 minutos para descansar antes de iniciar el servicio.

Figura 3.4: Cabezal 213e ida



### 3.3.6. Comentarios

Este estudio en terreno permite deducir que el tiempo de detención en cabezal dependerá de factores como la frecuencia programada y las características de la zona en donde se ubica el cabezal. Servicios con frecuencias bajas cuentan con más tiempo de detención, por lo que los choferes tienen un margen más amplio para descansar. Por otro lado, se observa que mientras mayor es el número de despachos programados por hora, los buses salen prácticamente apenas llegan y el efecto de la congestión en la ruta es más significativo, ya que si un vehículo se retrasa en su horario de arribo al cabezal, afectará al horario de salida de la próxima expedición.

Otro aspecto importante que determina el tiempo de detención en el cabezal y el cumplimiento de un intervalo regular entre salidas, tiene relación con las características del sitio y la infraestructura con la que se cuenta. Existen cabezales que están ubicados actualmente en puntos críticos de la ciudad, o bien, no cuentan con suficiente espacio ya que el sitio asignado puede ser compartido por múltiples líneas.

Luego, los planilleros a cargo de cumplir la planificación, pueden optar por despachar los buses en cuanto éstos llegan al cabezal o retenerlos con el fin de cumplir el intervalo programado entre buses. La segunda alternativa mencionada sería la ideal, ya que se evita enviar desde el inicio de la ruta a los buses apelotonados. No obstante, su cumplimiento puede conllevar multas por congestionar sectores sobresaturados en periodo punta. Por lo tanto, en la práctica la posible retención se dificulta por la poca capacidad de acopio que poseen ciertos cabezales, debiendo despachar a los buses anticipadamente con la finalidad de liberar el espacio ocupado a algún vehículo que arribe al sitio, ya sea del mismo servicio o no.

# Capítulo 4

## Modelación

Con el fin de determinar qué variables explican la variabilidad de los intervalos de tiempo entre despachos consecutivos desde el cabezal e identificar de qué forma afectan a la regularidad en el inicio de la ruta, se utilizan modelos de regresión lineal múltiple, donde su forma funcional es expuesta en la ecuación (4.1). En ella,  $Y$  representa a la variable dependiente o explicada,  $X_i$  a las variables independientes o explicativas,  $A$  corresponde al intercepto y  $B_i$  son los coeficientes de regresión asociados a cada variable explicativa.

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_kX_k \quad (4.1)$$

La modelación del fenómeno expuesto a partir de regresión multivariada permite investigar y comprender la relación existente entre la variable explicada y las respectivas variables explicativas. La descripción y caracterización de dichas variables se expone en las siguientes secciones del presente capítulo.

### 4.1. Variables explicadas

En la literatura, existen múltiples indicadores que han sido utilizados para evaluar la regularidad de los intervalos de tiempo. En este trabajo, para efectos de modelación se han seleccionado como variables dependientes los siguientes índices, los cuales fueron caracterizados en el capítulo de revisión bibliográfica:

- *Desviación estándar de los intervalos de tiempo observados entre buses consecutivos de un mismo servicio-sentido, que pasan por el primer paradero asignado,  $STD(h_{\text{obs}})$ .*
- *Coficiente de variación de los intervalos de tiempo observados entre buses consecutivos de un mismo servicio-sentido, que pasan por el primer paradero asignado,  $CV(h_{\text{obs}})$ .*
- *Índice por observación, IPO.*
- *Minutos de incidencia, Minc..*

Estos indicadores tienen como finalidad capturar el efecto de variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, específicamente cuando los buses son despachados desde el cabezal respectivo. Para ello, se trabaja bajo el supuesto de que en los periodos estudiados (5:30-6:29 y 6:30-8:29) todos los servicios-sentido del sistema operan por frecuencia, lo que implica que los usuarios no conocen el instante en que el vehículo arribará al primer paradero.

En una simulación de indicadores realizada en Arriagada (2016), la cual tenía como objetivo seleccionar índices que no se vieran afectados por la frecuencia y a su vez fuesen capaces de representar de buena forma la variabilidad de los intervalos, se concluye que los indicadores CV e IPO logran cumplir correctamente con ambas condiciones requeridas. Por otro lado, muchas investigaciones han usado el CV como indicador de variabilidad, por lo que su capacidad de representar el fenómeno en cuestión está altamente comprobada.

Un inconveniente que caracteriza al indicador IPO es su distribución de probabilidad. Por lo tanto, con el objetivo de obtener una variable dependiente que se asemeje en mayor medida a la distribución normal, se aplica una transformación de Box-Cox mediante el software SigmaXL que entregó como coeficientes los siguientes valores:

Tabla 4. 1: Coeficientes transformación Box-Cox

<b>Periodos estudiados</b>	<b>Coficiente</b>
Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas	-3,32
Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas	-2

Con ello, el indicador IPO modificado queda finalmente definido como se muestra en la ecuación (4.2) para el periodo de 5.30 a 6.29 horas y en la ecuación (4.3) entre las 6.30 y 8.29 horas, donde el máximo valor que podrá alcanzar será uno y corresponde al caso de regularidad de intervalos perfecta.

$$\text{Reg\_IPO}_1 = \frac{1}{\text{IPO}^{3,32}} \quad (4.2)$$

$$\text{Reg\_IPO}_2 = \frac{1}{\text{IPO}^2} \quad (4.3)$$

Paralelamente, el DTPM utiliza los minutos de incidencia como medida de variabilidad de intervalos, lo que lleva a considerarla dentro de las variables explicadas utilizadas en esta investigación. Estos se definen como la diferencia entre el intervalo observado y el tiempo aceptable establecido para el periodo respectivo (ver ecuaciones 2.6 a 2.8). En particular, a partir de la base de datos generada es posible determinar los minutos de incidencia promedio por servicio-sentido al inicio de la ruta en ambos periodos de operación analizados.



En la siguiente Tabla 4.2 se exponen estadísticos descriptivos de los indicadores de regularidad medidos al inicio de la ruta, para ambos casos abordados. En ellas se observa que la variabilidad de los intervalos de tiempo entre despachos de buses es mayor en el periodo comprendido desde las 6:30 a las 8:29 horas. Además, en la Tabla 4.3 se presenta el promedio de minutos de incidencia al inicio del servicio, por operador para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, en los periodos de operación analizados.

Tabla 4. 2: Estadísticos descriptivos de los indicadores de regularidad, periodos 1 y 2

Variables explicadas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
STD( $h_{obs}$ )	[min]	0,34	11,91	3,79	3,58	1,08	16,48	4,71	4,44
CV( $h_{obs}$ )	[-]	0,01	0,99	0,41	0,39	0,03	1,14	0,53	0,52
Reg_IPO	[-]	0,10	1,00	0,61	0,63	0,19	1,00	0,61	0,62
Minc	[min]	0	7,81	0,30	0,15	0	6,74	0,82	0,65
N° de observaciones		579				679			

Tabla 4. 3: Promedio de minutos de incidencia al inicio de la ruta, por operador

Minutos de incidencia por operador	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas	Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas
Inversiones Alsacia	0,52	1,044
Subus Chile	0,523	0,838
Buses Vule	0,156	0,44
Express de Santiago	0,388	1,285
Metbus	0,38	0,582
Redbus Urbano	0,181	0,886
STP	0,323	0,865

Cabe señalar que los indicadores STD, CV y Reg\_IPO son medidas de variabilidad pura, es decir, reflejan que tanto difieren entre si los intervalos observados, sin embargo, ignoran otros aspectos relevantes de la operación al no considerar en su definición la existencia de un programa. En otras palabras, existen servicios-sentido que pueden reportar una leve varianza en sus intervalos, pero a la vez estos pueden estar superando el umbral permitido, con lo cual se aumentan sistemáticamente los tiempos de espera de los usuarios en los paraderos ubicados aguas abajo del cabezal.

Por otro lado, los minutos de incidencia capturan en mayor medida el cumplimiento del programa de despachos y los posibles retrasos en el arribo de los buses al cabezal. No obstante,

por la forma en cómo se calcula este indicador, no logra reflejar si el intervalo observado se mantiene a lo largo del periodo estudiado. Es más, si el tiempo entre salidas nunca supera el valor aceptable, este servicio no presentará minutos de incidencia, incluso si los intervalos difieren notoriamente entre ellos.

Lo anterior se debe a la definición de holgura expuesta en la ecuación (2.7), donde el mínimo valor que toma es 3 minutos y el máximo 10. A su vez, el tiempo aceptable definido en la ecuación (2.6) restringe al intervalo observado entre buses, estableciendo un umbral superior pero no una cota inferior, es decir, los minutos de incidencia son contabilizados cuando existe un incumplimiento del programa asociado a un intervalo observado excesivo, no así cuando se despachan buses consecutivos con un mínimo margen y se ve favorecido el apelotonamiento en ruta. Con ello, los operadores tienden a preocuparse más por cumplir con la regularidad requerida en servicios con mayores intervalos programados, dejando en cierta medida de lado aquellos con altas frecuencias.

Para comprender más en detalle el comportamiento de las cuatro variables dependientes anteriormente planteadas y observar su distribución, a continuación se muestran histogramas de frecuencia de cada una de ellas (ver Figuras 4.1 a 4.8).

Figura 4.1: Histograma de la variable dependiente  $STD(h_{obs})$ , periodo 1

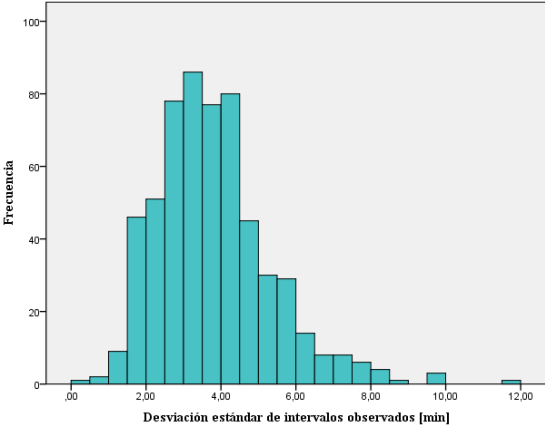


Figura 4.2: Histograma de la variable dependiente  $CV(h_{obs})$ , periodo 1

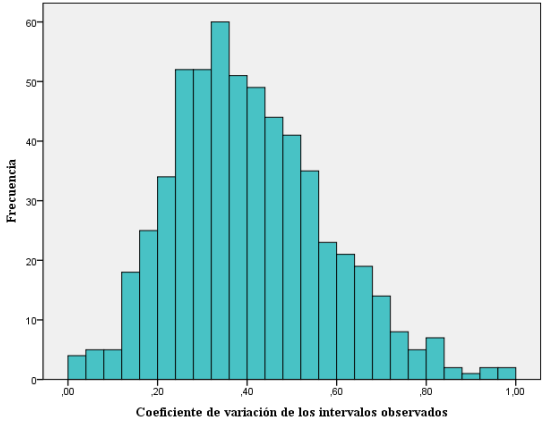


Figura 4.3: Histograma de la variable dependiente Reg\_IPO, periodo 1

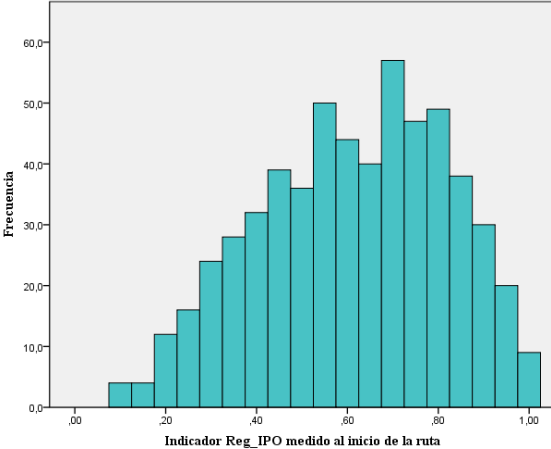


Figura 4.4: Histograma de la variable dependiente Minc, periodo 1

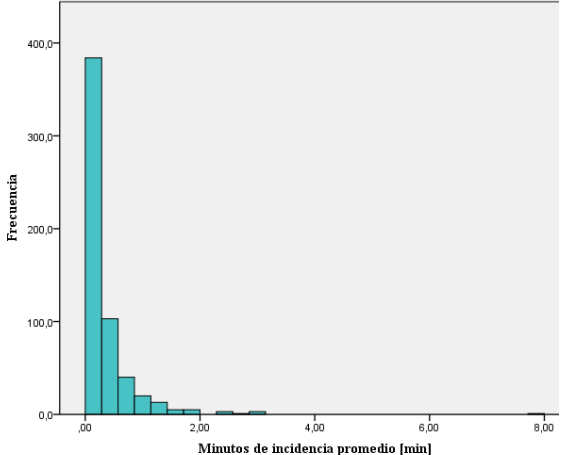


Figura 4.5: Histograma de la variable dependiente  $STD(h_{obs})$ , periodo 2

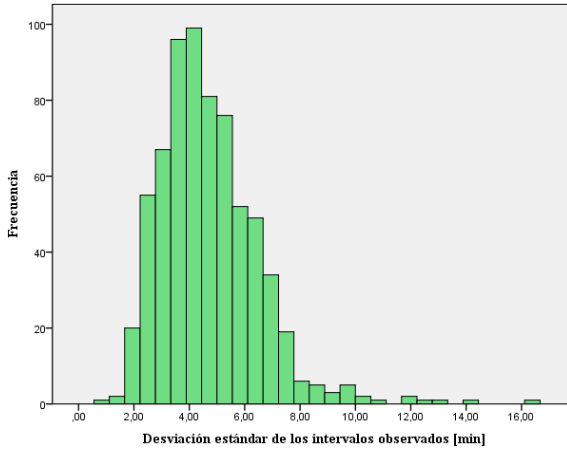


Figura 4.6: Histograma de la variable dependiente  $CV(h_{obs})$ , periodo 2

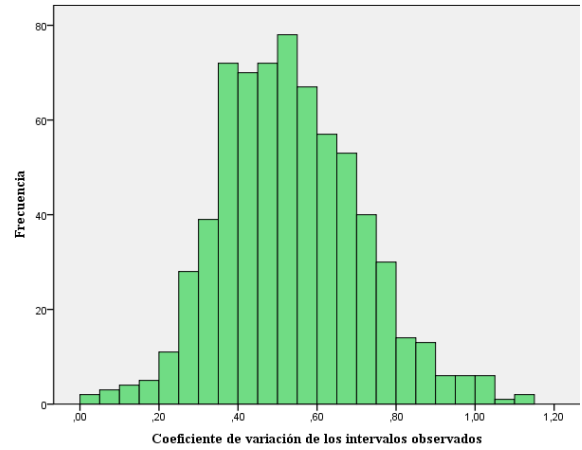


Figura 4.7: Histograma de la variable dependiente Reg\_IPO, periodo 2

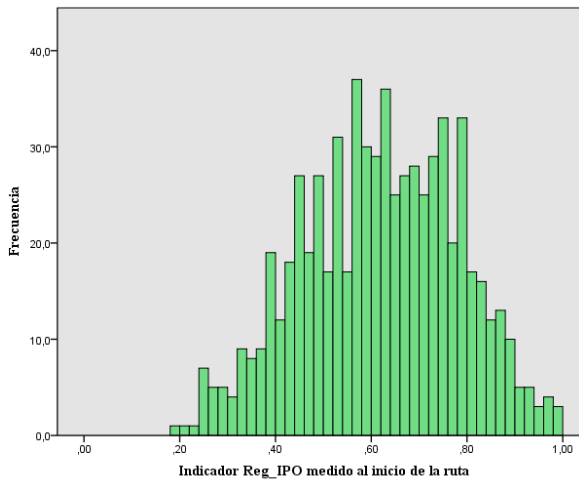
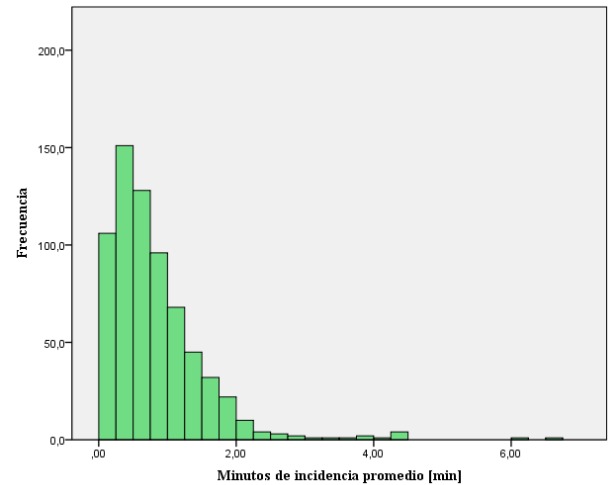


Figura 4.8: Histograma de la variable dependiente Minc, periodo 2



Con respecto al outlier que se observa en la Figura 4.4, éste corresponde al servicio 107ida. De acuerdo al plan operacional, debería presentar un intervalo aproximado de 4,3 minutos, mientras que el tiempo aceptable establecido corresponde a 7,3 minutos para el periodo 5.30-6.29 horas. Sin embargo, al comparar los intervalos observados durante la semana del 14 al 18 de marzo de 2016 con el umbral definido, se obtiene un promedio de 7,81 minutos de incidencia al inicio de la ruta, aun cuando la variabilidad de sus intervalos no es alta ( $CV \sim 0,37$ ). Esto deja en evidencia que durante la semana laboral analizada, el servicio 107ida realizó sistemáticamente menos despachos entre las 5.30 y las 6.29 horas.

Cada uno de los indicadores propuestos ha sido determinado al inicio del recorrido. No obstante, también es posible evaluar la regularidad de los intervalos a lo largo de la ruta y con ello, estudiar fenómenos comunes de evidenciar en la actualidad, como por ejemplo el apelonamiento de buses. En particular, el Directorio de Transporte Público Metropolitano reporta por día, periodo y servicio-sentido el índice de cumplimiento de regularidad (ICR). A partir de esta información, se calcula para cada servicio-sentido un indicador que represente lo

reportado por el DTPM durante la semana laboral del 14 al 18 de marzo de 2016, en los periodos de operación de interés. Con él, es posible comparar la variabilidad de los intervalos observada en los despachos desde el cabezal con la medida a lo largo de la ruta por el regulador (ver Figuras 4.9 y 4.10).

Figura 4.9: ICR medido a lo largo de la ruta vs. ICR-I al inicio del recorrido, periodo 1. Fuente: Elaboración propia

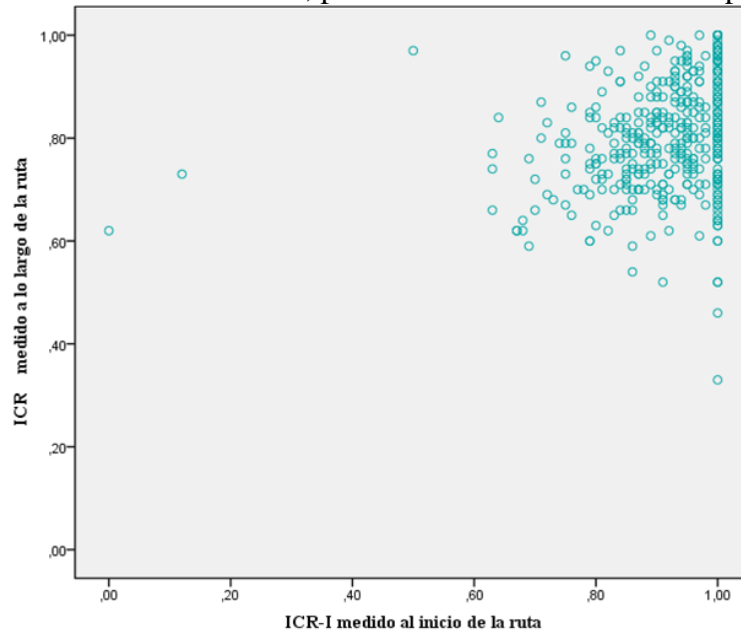
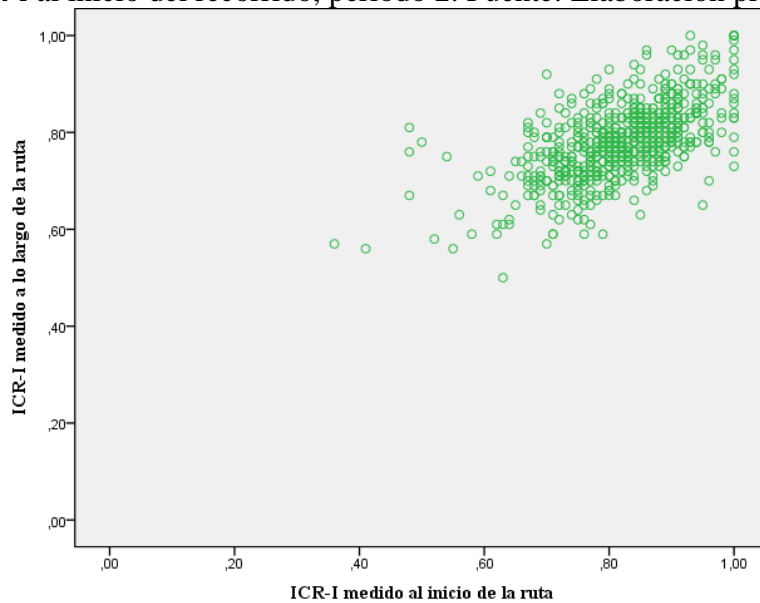


Figura 4.10: ICR medido a lo largo de la ruta vs. ICR-I al inicio del recorrido, periodo 2. Fuente: Elaboración propia



Para el periodo comprendido entre las 5:30 y las 6:29 horas, en un 82% del total de observaciones el ICR-I medido al inicio del recorrido es mayor al ICR reportado a lo largo de la ruta, mientras que entre las 6:30 y las 8:29 horas esta condición se cumple para el 73% de los servicios-sentidos que forman parte de la base de datos. Tales resultados siguen en su mayoría lo señalado en la revisión bibliográfica; la variabilidad de los intervalos aumenta a medida que el bus se aleja del cabezal desde donde fue despachado.

A pesar de que el índice de cumplimiento de regularidad es uno de los indicadores usados en la actualidad por el regulador de Transantiago para evaluar el cumplimiento de la oferta, este cuenta con ciertos defectos que conllevan a no considerarlo en la presente investigación como medida de variabilidad al inicio de la ruta. En particular, el ICR-I toma valor uno en muchos casos donde si existen evidencias de irregularidad de los intervalos.

## 4.2. Variables explicativas

Las variables consideradas para explicar el fenómeno de variabilidad de intervalos al inicio de la ruta, se agrupan en tres categorías. En primer lugar, se presentan aquellas que capturan efectos de la operación y diseño de la red, a partir de las principales características de la oferta y demanda del sistema. Posteriormente, se exponen variables binarias que reflejan el desempeño de las empresas operadoras y su nivel de cumplimiento de regularidad en el inicio de un respectivo servicio-sentido. Por último, se incorporan variables explicativas que muestran la influencia de la operación e infraestructura de cabezales y depósitos en los despachos efectuados.

### 4.2.1. Variables explicativas: Operación y diseño de la red

Los factores que buscan capturar efectos de la operación y del diseño de la red son: frecuencia programada, intervalo programado (inverso de la frecuencia), velocidad comercial, demanda media por bus y largo de la ruta. Con respecto a las primeras dos variables explicativas, sus estadísticos descriptivos son expuestos en la Tabla 4.4. En ella se hace referencia a los valores obtenidos para ambos periodos estudiados.

Tabla 4. 4: Estadísticos descriptivos de frecuencia e intervalo programado

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
Frecuencia programada	[buses/h]	1	25	6,1	5	1,5	25	7,7	7
Intervalo programado	[min]	2,4	60	12,3	12	2,4	40	9,4	8,6
Nº de observaciones		579				679			

Por otro lado, las tres siguientes variables independientes permiten capturar el ambiente bajo el cual se lleva a cabo la operación de la red, por lo cual son factores que difícilmente puedan ser manipulados por las empresas y que eventualmente originan retrasos en el retorno de los buses al cabezal, afectando al cumplimiento de los horarios programados de despachos. Notar que en la Punta Mañana es común que la flota disponible esté completamente utilizada y por ende, sea necesario esperar a que un vehículo regrese al cabezal para poder efectuar una nueva salida.

Tanto la velocidad comercial, como la demanda media por bus y el largo de la ruta están referidas a la expedición que regresa al cabezal (en adelante llamada “expedición de retorno”). Es decir, se considerará que todo servicio, ya sea de ida o de retorno, que sea despachado desde su respectivo cabezal de inicio se verá afectado por el entorno bajo el cual operó la expedición que antecede a dicha salida. Para que se cumpla la condición expuesta se requiere trabajar bajo el supuesto de no interlineado, lo que implica que cada bus está asignado a un único servicio y por ende, recorre la misma ruta durante el periodo estudiado.

La velocidad comercial en la expedición de retorno, variable que tiene como finalidad capturar efectos de congestión e incidentes en la vía, es obtenida a partir de la metodología definida en el capítulo anterior. En la Tabla 4.5 se muestran los estadísticos descriptivos de la variable independiente, para ambos periodos. Notar que dado las diversas condiciones bajo las cuales circulan los vehículos (tráfico mixto, segmentos de vía con prioridad para buses, corredores segregados, tramos por autopistas, entre otros), la velocidad comercial toma valores desde aproximadamente 8 a 51 [km/h].

Tabla 4. 5: Estadísticos descriptivos de velocidad comercial en la expedición de retorno

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
Velocidad comercial	[km/h]	10,2	50,9	23	22,5	7,7	43,8	16,3	16
N° de observaciones		546				655			

La demanda media por bus observada en la expedición de retorno pretende capturar efectos de carga de pasajeros y tiempos de detención en paradero. Ésta se determina a partir de la metodología presentada en el capítulo 3. Es útil recalcar que en su obtención no se incorpora la evasión del pago de Transantiago, por lo tanto, los valores de demanda determinados posiblemente se encuentren subestimados. En la Tabla 4.6 se describe estadísticamente la variable independiente, para ambos periodos. Notar que, como es de esperar, la demanda media es altamente mayor para la Punta Mañana, donde es común evidenciar buses con aproximadamente 5 [pax/m<sup>2</sup>], aumentando la percepción de incomodidad en el usuario.

Tabla 4. 6: Estadísticos descriptivos de demanda media por bus observada en la expedición de retorno

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
Demanda media por bus	[pax/bus]	5	82,1	25,5	23,1	6	150,6	48,2	42,3
N° de observaciones		458				638			

La variable independiente largo de ruta, la cual representa uno de los parámetros de diseño de la red, corresponde a la distancia media recorrida por un bus desde que deja el cabezal de inicio hasta que finaliza su recorrido llegando al cabezal de término. A mayor largo de la ruta, el vehículo se enfrenta a más situaciones externas aleatorias y la probabilidad de retrasarse en su regreso al cabezal se incrementa. En la Tabla 4.7 se presentan los estadísticos descriptivos obtenidos en los periodos de interés.

Tabla 4. 7: Estadísticos descriptivos de largo de ruta de la expedición de retorno

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
Largo de ruta	[km]	4	57,3	17,7	15,5	2,4	57,3	17,2	15,4
N° de observaciones		549				655			

#### 4.2.2. Variables explicativas: Desempeño de la empresa operadora

Las dummies por operador corresponden a siete variables binarias, una por cada empresa perteneciente al sistema de transporte público de la ciudad, las cuales valen uno si el servicio-sentido en cuestión está a cargo de la respectiva unidad de negocios  $i$ , y cero en caso contrario, tal como se observa en la ecuación 4.4, donde  $i$  toma valores entre 1 y 6. Estas variables reflejan exclusivamente las diferencias en el funcionamiento de cada operador en el despacho de buses desde el cabezal y su grado de cumplimiento de regularidad al inicio de la ruta.

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{si el servicio es operado por la empresa } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.4)$$

Con el fin de evitar la existencia de multicolinealidad perfecta entre las variables ficticias, la dummy asociada a la unidad de negocios STP ha quedado fija, tomando valor cero para todo servicio-sentido. Lo anterior se debe a que según los resultados del “Ranking de Calidad de Servicio” (Directorio de Transporte Público Metropolitano, 2016), ellos fueron la empresa operadora con mejores índices de regularidad en el primer semestre del año 2016.

Por lo tanto, los coeficientes beta obtenidos al estimar modelos que incluyan estas variables dummies serán interpretados como la diferencia entre la regularidad ofrecida al inicio de la ruta por STP y por un respectivo operador.

### **4.2.3. Variables explicativas: Operación e infraestructura de cabezales y depósitos**

Los depósitos corresponden a sitios ubicados en puntos estratégicos de la ciudad, donde se controlan aspectos como la operación, la mantención de los vehículos y la carga de combustible. A su vez, este lugar permite guardar los buses en aquellos periodos donde no les corresponde circular, de acuerdo a lo establecido en el plan operacional.

Cada día, generalmente horas previas a que inicien los periodos punta, los buses de un cierto servicio-sentido son sacados desde el depósito y dirigidos a posicionarse en su respectivo cabezal. Una vez allí, los buses son despachados de forma tal de cumplir con la planificación y se dirigen hacia el primer paradero del servicio-sentido, lugar donde deben detenerse a recoger pasajeros por primera vez en la ruta.

No obstante, existen servicios-sentido que poseen cabezales ubicados en los mismos depósitos. En estos casos, cada vez que un determinado bus finaliza su recorrido, ingresa al depósito, se inicia la nueva expedición, sale del sitio y se dirige al primer paradero, comúnmente posicionado a menos de 1 [km]. En caso contrario, cuando el cabezal está ubicado fuera del depósito (por ejemplo en la vía pública, en una estación intermodal, entre otros), por lo general los vehículos regresan al sitio solo una vez que han finalizado su operación programada.

Por lo tanto, las siguientes variables explicativas tienen como finalidad recoger efectos de la operación realizada específicamente en los puntos donde se inician los respectivos servicios-sentido y caracterizar la infraestructura disponible en los sitios donde esto ocurre.

En primer lugar, la regulación realizada en el cabezal queda representada a partir de una variable de tipo dummy. Tal como fue mencionado en capítulos anteriores, en el caso de Transantiago se definen a lo largo de la ruta ciertos puntos de control de regularidad de intervalos. Generalmente el primero de ellos se ubica en el cabezal, sitio donde se da inicio al recorrido. No obstante, esto no se cumple para todos los servicios-sentido, ya que el punto de control inicial podría llegar a estar ubicado incluso 900 metros abajo del cabezal.

Producto de lo anterior, la variable binaria definida busca capturar dicho efecto, tomando valor uno en aquellos casos donde el punto de control de regularidad se ubica en el cabezal (o a menos de 150 metros de éste) y cero en caso contrario, tal como se expone en la ecuación 4.5.

$$\delta_{\text{reg}} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto de control de regularidad se ubica en el cabezal} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.5)$$



El porcentaje de veces que ésta toma valor uno, para ambos periodos, es detallado en la Tabla 4.8 a continuación. A su vez, en la Tabla 4.9 se muestra la variable desagregada por operador.

Tabla 4. 8: Descripción variable tipo dummy asociada a punto de control de regularidad en el cabezal

Punto de control de regularidad ubicado en cabezal	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas		Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
0	71	12,3%	84	12,4%
1	508	87,7%	595	87,6%
N° de observaciones	579		679	

Tabla 4. 9: Descripción desagregada por operador de la variable tipo dummy asociada a punto de control de regularidad ubicado en el cabezal

Punto de control de regularidad ubicado en cabezal	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas		Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
Inversiones Alsacia	39	79,6%	50	82%
Subus Chile	78	91,8%	100	91,7%
Buses Vule	116	86,6%	130	87,2%
Express de Santiago	75	81,5%	85	79,4%
Metbus	67	95,7%	77	96,3%
Redbus Urbano	76	83,5%	93	83%
STP	57	98,3%	60	98,4%
N° de observaciones	508		595	

Paralelamente, cuando un cierto servicio-sentido cuenta con su cabezal ubicado al interior del depósito, es de esperar que la regularidad con la que se despacha a los buses sea mayor, producto de los beneficios que conlleva tener un lugar físico en el cumplimiento de las salidas programadas. Esto permite evitar impactos de factores externos a la operación que si afectan a los cabezales ubicados en la vía pública.

El efecto antes mencionado es capturado por una variable tipo dummy, la cual toma valor uno en aquellos casos donde el cabezal se ubica al interior del depósito y cero en caso contrario (ver ecuación 4.6).

$$\delta_{\text{cab}} = \begin{cases} 1 & \text{si el cabezal se ubica al interior del depósito} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.6)$$

En la Tabla 4.10 se detalla el porcentaje de veces que la variable independiente binaria es igual a uno, para ambos periodos analizados. A su vez, en la Tabla 4.11 se muestra la variable desagregada por operador.

Tabla 4. 10: Descripción variable de tipo dummy asociada a la presencia del cabezal en el interior del depósito respectivo

Cabezal ubicado al interior del depósito	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas		Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
0	368	63,6%	453	66,7%
1	211	36,4%	226	33,4%
N° de observaciones	579		679	

Tabla 4. 11: Descripción desagregada por operador de la variable de tipo dummy asociada a la presencia del cabezal en el interior del depósito respectivo

Cabezal ubicado al interior del depósito	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas		Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
Inversiones Alsacia	12	24,5%	14	23%
Subus Chile	28	32,9%	31	28,4%
Buses Vule	52	38,8%	56	37,6%
Express de Santiago	25	27,2%	27	25,2%
Metbus	39	55,7%	42	52,5%
Redbus Urbano	23	25,3%	24	21,4%
STP	32	55,2%	32	52,5%
N° de observaciones	211		226	

Por otro lado, el trayecto recorrido desde el depósito al cabezal puede verse impactado por incidentes externos a la operación misma (congestión, accidentes, desvíos, entre otros). Esta situación puede originar que el bus se retrase en su arribo al cabezal, por lo cual la planificación horaria se ve afectada y con ello el cumplimiento de las salidas programadas. Así, la ubicación del depósito condiciona los costos de las empresas y restringe los posibles cambios de recorridos.

En particular, mientras mayor sea el trayecto que recorra el bus entre el sitio y el cabezal respectivo, mayor es la probabilidad de que el vehículo se vea impactado por agentes externos y con ello, la espera del usuario en el paradero aumente. La variable distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero de un cierto servicio-sentido tiene como finalidad capturar tales efectos que condicionan la regularidad de los intervalos al inicio de la ruta. En la Tabla 4.12 se presentan sus estadísticos descriptivos para ambos casos en estudios.

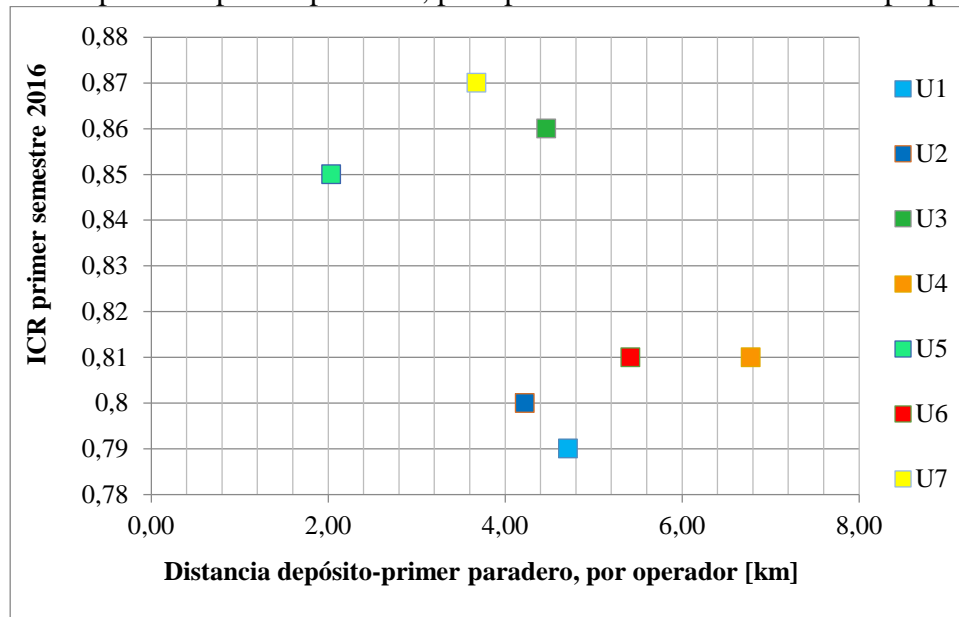
Notar que en el periodo 1 se tienden a recorrer distancias mayores ya que los servicios-sentido suelen iniciar su operación en este horario, por lo que es altamente probable que los buses se encuentren guardados en los depósitos previamente. Sin embargo, para el periodo 2 los vehículos en promedio recorren una menor distancia, debido a que ya se han posicionado en sus cabezales y en general, no requieren volver al depósito hasta que terminen su programación diaria.

Tabla 4. 12: Estadísticos descriptivos de distancia recorrida entre depósito y primer paradero

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
Distancia recorrida depósito-primer paradero	[km]	0	42,2	4,5	3	0	24,6	0,7	0
N° de observaciones		579				679			

A partir de la variable independiente antes mencionada, es posible analizar el cumplimiento por operador de la regularidad de sus intervalos en ruta (Índice ICR medido por el DTPM periódicamente) en función de la distancia que deben recorrer desde el depósito hasta el primer paradero. En la Figura 4.11 se presenta el indicador de regularidad por empresa operadora para el primer semestre del año 2016 y se compara con la distancia recorrida en promedio por unidad de negocio, desde que los buses abandonan el depósito hasta que se han posicionado en el primer paradero. En ella es posible observar que no existe una clara relación entre la variabilidad de los intervalos, evidenciada a lo largo del día en toda la ruta, y el trayecto que deben recorrer los buses en ciertos periodos para poder comenzar sus servicios. No obstante, esto no implica que la variable independiente estudiada no afecte a la programación de salidas desde el cabezal y con ello, a la regularidad de los intervalos observados exclusivamente al inicio de la ruta.

Figura 4.11: ICR primer semestre 2016 medido a lo largo de la ruta vs. Distancia recorrida desde el depósito al primer paradero, por operador. Fuente: Elaboración propia



Con respecto a la infraestructura de los sitios donde se inicia la operación, ésta será representada a partir de la variable explicativa número de servicios-sentido por cabezal, la cual tiene como finalidad capturar efectos de tamaño y capacidad. Se espera que mientras mayor sea el número de servicios que comparten un mismo cabezal, sobre todo si éste se ubica en la vía pública, más difícil resulte cumplir con la programación de despachos consecutivos y con ello, se evidencie una mayor variabilidad de intervalos.

A su vez, el tiempo de permanencia de un respectivo bus en el punto de inicio de la ruta se ve influenciados por la existencia de congestión vehicular en la zona, por el número de sitios disponibles para detención del vehículo, por posibles conflictos con los residentes del sector, entre otros. Los estadísticos descriptivos de esta última variable independiente son expuestos en la Tabla 4.13. En ella se hace referencia a los valores obtenidos para ambos periodos de operación estudiados.

Tabla 4. 13: Estadísticos descriptivos de número de servicios-sentido por cabezal

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	Mediana	Mín	Máx	Media	Mediana
N° de servicios por cabezal	[-]	1	18	4,3	3	1	18	4,1	3
N° de observaciones		579				679			

#### 4.2.4. Resultados esperados

Para concluir el presente capítulo, en la siguiente Tabla 4.14 se expone la influencia esperada de cada variable explicativa propuesta sobre la regularidad de los intervalos al inicio de la ruta. Cabe señalar que estos pronósticos se basan en la literatura previa sobre modelación del fenómeno de irregularidad de intervalos en ruta y en el desempeño mostrado por las empresas operadoras de Transantiago a la fecha. Por otro lado, existen variables independientes donde su contribución no es completamente predecible.

Tabla 4. 14: Influencia esperada de las variables explicativas sobre la regularidad de los despachos de buses

<b>Categoría</b>	<b>Unidad</b>	<b>Variable explicativa</b>	<b>Regularidad de intervalos al inicio de la ruta</b>
Operación y diseño de la red	[buses/h]	Frecuencia programada	No es claro
	[min]	Intervalo programado	No es claro
	[km/h]	Velocidad comercial, expedición de retorno	La mejora
	[pax/bus]	Demanda media por bus, expedición de retorno	La empeora
	[km]	Largo de la ruta, expedición de retorno	La empeora
Desempeño de la empresa operadora	[-]	Inversiones Alsacia	La empeora
	[-]	Subus Chile	La empeora
	[-]	Buses Vule	La mejora
	[-]	Express de Santiago	La empeora
	[-]	Buses Metropolitana (Metbus)	La mejora
	[-]	Redbus Urbano	No es claro
Operación e infraestructura de cabezales y depósitos	[-]	Punto de control de regularidad ubicado en el cabezal	La mejora
	[-]	Cabezal ubicado al interior del depósito	La mejora
	[km]	Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	La empeora
	[-]	Número de servicios-sentido por cabezal	La empeora

# Capítulo 5

## Resultados y análisis

El presente capítulo tiene como finalidad determinar cuáles de las variables propuestas anteriormente afectan la regularidad en el despacho de buses, en la ciudad de Santiago. Para ello, se realizan estimaciones de modelos de regresión lineal múltiple utilizando los softwares SPSS y STATA, los cuales permiten obtener los coeficientes de cada variable incluida, estudiar sus signos y la significancia estadística, como también discutir la validez de los modelos propuestos, la bondad del ajuste y la importancia relativa de las variables explicativas en el fenómeno estudiado.

Cabe señalar que la precisión de los parámetros estimados depende del cumplimiento de los supuestos de regresión multivariada, por lo tanto, se requiere analizar los residuos de los modelos y verificar los requerimientos necesarios.

### 5.1. Modelación Periodo 1: Transición Nocturna (5.30 a 6.29 horas)

En la siguiente sección se exponen los resultados obtenidos a partir de la estimación de modelos, para el periodo comprendido entre las 5.30 y las 6.29 horas. En primer lugar, se consideran como variables dependientes los indicadores coeficiente de variación (denotado como CV) y desviación estándar (STD), ambos descritos en los capítulos anteriores. Las estimaciones a partir del indicador Reg\_IPO serán presentadas de igual forma, no obstante, el análisis de parámetros será omitido ya que es análogo al efectuado con el indicador coeficiente de variación, producto de la forma en cómo se determina el índice por observación modificado (ver ecuación 2.1). Por último, se utiliza como variable explicada a los minutos de incidencia (Minc). Recordar que mientras más altos valores tomen los indicadores CV, STD y Minc, mayor será la variabilidad de los intervalos, sin embargo, en el indicador Reg\_IPO un valor alto implica mayor regularidad en los despachos.

La verificación de los supuestos de regresión lineal múltiple permite garantizar la validez de los modelos planteados. Luego, las condiciones que deben ser cumplidas son: residuos normalmente distribuidos, homocedásticos o de igual de varianza, no correlacionados, no colinealidad entre variables independientes y por último, linealidad (Tabachnick y Fidell, 2012).

Con respecto al supuesto de normalidad, entre las Figuras 5.1 y 5.6 se presentan histogramas de residuos junto a la respectiva curva asociada  $N(0,1)$  y gráficos de probabilidad normal de tipo P-P (proporciones), donde se observa que para los indicadores  $CV(h_{obs})$  y Reg\_IPO la

distribución de los errores tiende en mayor medida a una normal en comparación a la del indicador  $STD(h_{obs})$ .

Figura 5.1: Histograma de residuos, Indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 1

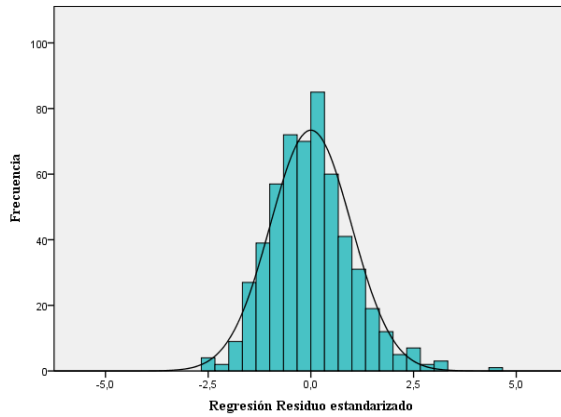


Figura 5.2: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 1

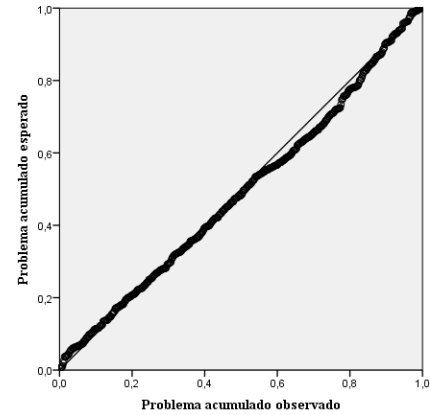


Figura 5.3: Histograma de residuos, Indicador  $Reg\_IPO$ , periodo 1

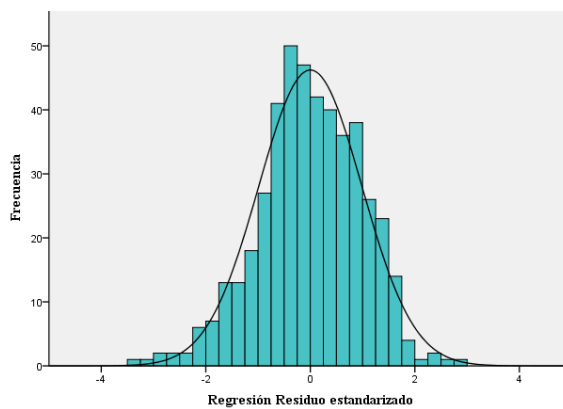


Figura 5.4: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador  $Reg\_IPO$ , periodo 1

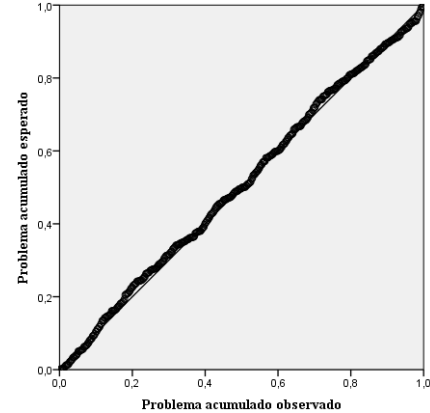


Figura 5.5: Histograma de residuos, Indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 1

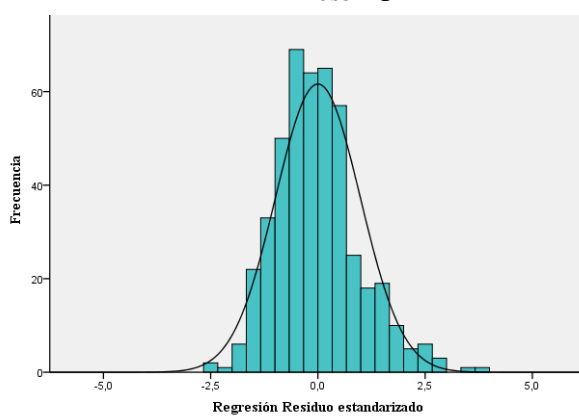
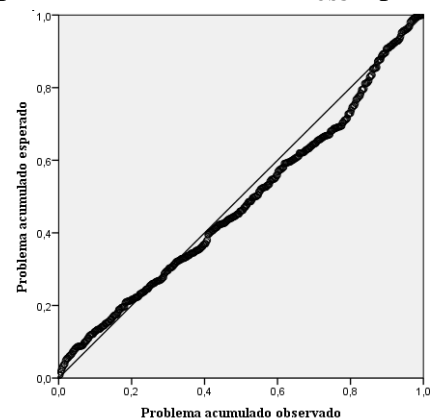


Figura 5.6: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 1



Si bien la verificación de este supuesto justifica el uso de pruebas estadísticas que involucren distribuciones t y F, en presencia de muestras grandes (por sobre 100 observaciones) se ha

demostrado que el total cumplimiento de dicha condición no es crucial, ya que los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) siguen aproximadamente una distribución normal (Vela, 2010). Por ende, a pesar que se evidencian ciertas desviaciones de la normalidad en los histogramas de residuos, dado que la muestra usada en la presente investigación es grande, los test estadísticos t y F no se ven afectados.

La hipótesis de independencia de los residuos es verificada a partir del estadístico Durbin Watson. Si este parámetro toma valores entre 1.5 y 2.5 entonces se considera que los errores no están correlacionados (Murillo y González, 2000). Con respecto a los modelos estimados, en la Tabla 5.1 se puede notar que este supuesto se cumple para cada uno de ellos.

Para estudiar la homocedasticidad de los residuos, se proceden a analizar los gráficos de dispersión expuestos en las Figuras 5.7 a 5.9. Para cumplir con este supuesto, se requiere que la banda que encierra los residuos sea aproximadamente uniforme en todo el rango de valores predichos. Si se detecta heterocedasticidad, entonces el estimador MCO sigue siendo lineal e insesgado, pero deja de ser eficiente ya que no es el estimador de mínima varianza, por lo cual las inferencias realizadas a partir de los contrastes de significación pierden validez (Tabachnick y Fidell, 2012).

Figura 5.7: Diagrama de dispersión, Indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 1

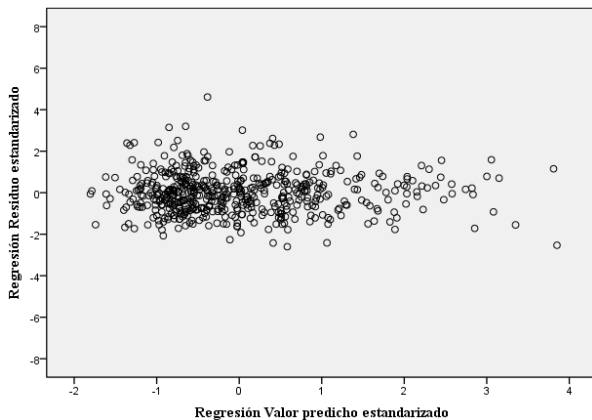


Figura 5.8: Diagrama de dispersión, Indicador Reg\_IPO, periodo 1

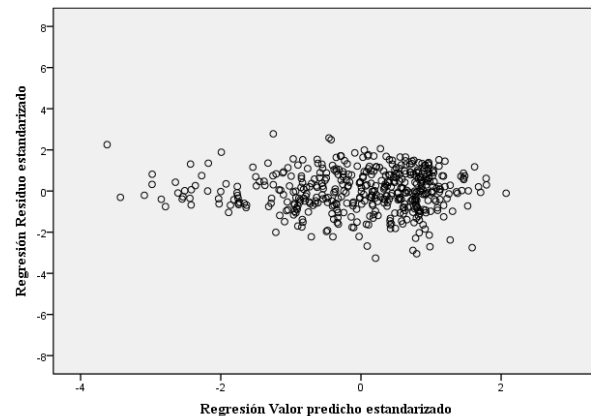
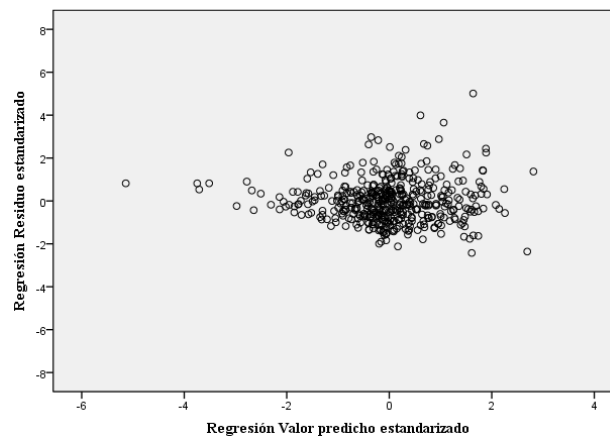


Figura 5.9: Diagrama de dispersión, Indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 1





En este caso, es posible observar que la homocedasticidad se cumple para los indicadores CV y Reg\_IPO, no así para el modelo estimado a partir de la desviación estándar como variable explicada. Cuando las varianzas de los residuos son desiguales se propone realizar una regresión lineal robusta para obtener los parámetros, lo que permite el uso de los test t y F sin que se vean afectados. La diferencia entre la regresión lineal ordinaria y la robusta se encuentra en la minimización realizada, ya que la primera minimiza la suma de cuadrados de los residuos mientras que la segunda minimiza una suma ponderada de residuos al cuadrado (Tabachnick y Fidell, 2012).

La significancia individual de las variables es determinada mediante el estadístico t de Student y el p-valor de la prueba, considerando un nivel de confianza del 95%. Cuando el p-valor es menor que 0,05, entonces se concluye que el parámetro estimado para la variable explicativa en cuestión es significativamente distinto de cero, lo cual es equivalente a obtener valores de t mayores a 1,96 y menores a -1,96.

Por lo tanto, en la Tabla 5.1 se observan los modelos estimados de forma preliminar y las variables explicativas incluidas en cada uno de ellos, mediante la técnica de MCO cuando las variables dependientes son CV y Reg\_IPO, mientras que para el modelo con indicador STD se efectúa una estimación robusta. Es posible notar que los parámetros obtenidos a partir de la regresión lineal robusta no difieren con los del modelo con MCO (ver Anexo A.1), no obstante los valores del estadístico t de Student varían levemente. Además, se muestran en negrilla las variables que han resultado significativas estadísticamente a partir de la modelación de variabilidad de intervalos al inicio de la ruta para el periodo comprendido entre las 5.30 y las 6.29 horas, para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016. Aquellas que obtuvieron un valor t Student superior a 1,96 o inferior  $-1,96$ , independiente del indicador utilizado son: frecuencia programada, Subus Chile, Express de Santiago, Metbus y número de servicios-sentido por cabezal.

Con respecto a la variable frecuencia programada, ésta ha resultado aumentar la variabilidad de los intervalos cuando se utiliza como indicador al coeficiente de variación y disminuirla en el modelo con desviación estándar. Lo anterior sigue lo esperado según lo visto en la literatura, ya que por un lado el indicador CV puede ser expresado como la multiplicación entre la desviación estándar de los intervalos reales y la frecuencia media observada (ver ecuación 2.3), donde ésta última se relaciona directamente con la frecuencia programada. Luego, un aumento en la frecuencia implica un incremento del indicador CV.

Por otro lado, el indicador STD descrito en la ecuación 2.4 sufre el efecto contrario debido a que presenta una relación directa con el intervalo observado. Con ello, aumentos en la frecuencia implican una disminución de la variabilidad de intervalos al inicio de la ruta. Cabe mencionar que solo se exponen modelos que incluyen como variable explicativa a la frecuencia en vez del intervalo programado, debido a que los resultados obtenidos por ambas variables son similares en cuanto a significancia individual y bondad de ajuste de los modelos.

La velocidad comercial de la expedición de retorno no resultó ser una variable significativa para el periodo estudiado. De igual forma, el largo de la ruta no fue incorporado en ningún modelo ya que en pruebas previas realizadas su valor t de Student fue siempre cercano a cero. No obstante, la variable demanda media por bus es significativa en el modelo con indicador CV y presenta el signo esperado aumentando la variabilidad de los despachos, ya que mientras mayor sea la demanda de pasajeros a lo largo de la ruta el tiempo de detención en paradero, el número

de paradas y por ende, el tiempo de viaje se incrementan y con ello, la probabilidad de retornar retrasado al cabezal.

Tabla 5. 1: Estimación preliminar de modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO, periodo 1

Variables	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD
	Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)
	Modelo 1.1	Modelo 2.1	Modelo 3.1	Modelo 4.1	Modelo 5.1
Frecuencia programada	<b>0,019 (9,39)</b>	<b>0,016 (7,46)</b>	<b>-0,022 (-9,06)</b>	<b>-0,02 (-7,36)</b>	<b>-0,189 (-9,28)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,001 (-1,17)	-	0,002 (1,2)	-	-
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	<b>0,001 (2,73)</b>	-	<b>-0,001 (-2,69)</b>	0,006 (1,4)
Inversiones Alsacia	-0,002 (-0,08)	-0,015 (-0,5)	-0,007 (-0,2)	0,015 (0,41)	0,032 (0,12)
Subus Chile	<b>0,14 (5,54)</b>	<b>0,144 (5,55)</b>	<b>-0,169 (-5,61)</b>	<b>-0,166 (-5,3)</b>	<b>1,077 (3,82)</b>
Buses Vule	-0,013 (-0,59)	-0,024 (-1,0)	0,015 (0,54)	0,03 (1,04)	-0,166 (-0,69)
Express de Santiago	<b>0,081 (3,21)</b>	<b>0,09 (3,36)</b>	<b>-0,106 (-3,5)</b>	<b>-0,12 (-3,78)</b>	<b>0,559 (2,15)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,057 (-2,23)</b>	<b>-0,081 (-2,94)</b>	<b>0,068 (2,19)</b>	<b>0,097 (2,94)</b>	<b>-0,782 (-2,95)</b>
Redbus Urbano	-0,033 (-1,35)	-0,01 (-0,37)	0,036 (1,22)	0,015 (0,47)	-0,006 (-,02)
Punto de regulación ubicado en el cabezal	0,006 (0,33)	-0,003 (-0,15)	-0,006 (-0,25)	0,003 (0,11)	0,057 (0,3)
Cabezal ubicado al interior del depósito	-0,008 (-0,49)	-	-	0,031 (1,8)	-0,12 (-0,86)
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	<b>0,003 (2,03)</b>	0,002 (1,55)	<b>-0,003 (-2,44)</b>	-	-
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,007 (5,02)</b>	<b>0,007 (4,93)</b>	<b>-0,009 (-5,16)</b>	<b>-0,009 (-5,14)</b>	<b>0,037 (2,51)</b>
Constante	<b>0,259 (6,4)</b>	<b>0,224 (6,7)</b>	<b>0,788 (16,35)</b>	<b>0,808 (20,41)</b>	<b>4,557 (13,98)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,378	0,381	0,372	0,378	0,215
Error	0,136	0,134	0,164	0,162	1,368
Durbin-Watson	1,86	1,76	1,86	1,77	2,02

Con respecto a las variables asociadas al desempeño de los operadores, en los modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO se encuentra que solo Subus Chile, Express de Santiago y Metbus tienen efectos estadísticamente significativos. Al observar los signos de los coeficientes estimados, se deduce que las dos primeras empresas operadoras presentan una peor operación que STP en lo que respecta a la regularidad ofrecida en el despacho de buses desde cabezales en el periodo estudiado, mientras que Metbus es la única empresa con un desempeño superior a STP entre las 5.30 y las 6.29 horas. Las variables asociadas a los operadores restantes (Inversiones Alsacia, Buses Vule y Redbus Urbano) no son estadísticamente significativas, es decir, no presentan diferencias significativas con respecto a la empresa operadora STP.

La variable que indica la existencia del punto de control de regularidad en el cabezal no es significativa independiente del indicador que se ocupe. Por otro lado, la variable asociada a la presencia del cabezal ubicado al interior del depósito también resulta ser no significativa, no obstante, en el modelo con indicador Reg\_IPO, el valor de t de Student muestra una significancia estadística con intervalo de confianza al 90% ( $p\text{-valor}=0,073$ ) y con el signo esperado reduciendo la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta. Lo anterior se explica en el hecho de que cabezales posicionados en sitios que cuentan con un espacio físico aislado de la vía pública, pueden verse favorecidos y ofrecer una mayor regularidad al despachar los buses ya que pueden evitar situaciones ajenas a la operación que se asocian a las características del lugar donde se inicia un respectivo servicio-sentido (por ejemplo, falta de espacio, congestión vehicular).

La distancia recorrida entre el depósito y el primer paradero resultó ser significativa en los modelos que utilizan CV y Reg\_IPO como indicadores de variabilidad de intervalos, o con significancia estadística al 85% ( $t=1,55$ ;  $p\text{-valor}=0,123$ ) y con el signo esperado, indicando que mientras mayor sea la distancia que recorre un vehículo desde que deja el depósito hasta que se posiciona para dar inicio al recorrido, menor será el cumplimiento del intervalo regular programado entre despachos consecutivos, para el periodo comprendido entre las 5.30 y 6.29 horas. Sin embargo, en el modelo con STD los valores de t de Student obtenidos previamente fueron cercanos a cero, por lo cual no se incluyó la variable explicativa en cuestión.

Finalmente, la variable explicativa número de servicios-sentido por cabezal presenta significancia estadística para todos los modelos estimados anteriormente. Además, los signos de los parámetros señalan que los servicios que deban compartir el espacio destinado para dar inicio al recorrido (generalmente ubicado en la vía pública) serán más propensos a evidenciar intervalos irregulares al despachar, en comparación con aquellos que se encuentran en cabezales con menos servicios-sentido asignados.

En la Tabla 5.2 se observan los modelos finales estimados para el periodo de 5.30 a 6.29 horas, para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, los cuales consideran como variables dependientes a CV, STD y Reg\_IPO. Para ello, se han removido variables sin significancia estadística en los modelos preliminares. Las variables explicativas frecuencia programada, Subus Chile, Express de Santiago, Metbus y número de servicios-sentido por cabezal continúan siendo significativas en comparación con los primeros modelos, independiente del indicador de variabilidad pura utilizado.

Por otro lado, para la velocidad comercial no se obtienen valores de t que superen los umbrales establecidos, no así la variable demanda media por bus que sigue presentando significancia estadística con intervalo de confianza al 95% en los modelos con indicadores CV y Reg\_IPO, o al 85% ( $t=1,53$ ;  $p\text{-valor}=0,116$ ) al considerar como variable explicada a la STD.

En lo que respecta al desempeño de las empresas y la regularidad de sus servicios-sentido al inicio de la ruta, a partir de los modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO se puede deducir que para el periodo analizado solo Subus Chile, Express de Santiago y Metbus presentan diferencias estadísticamente significativas con el operador STP.

De forma similar, las variables distancia recorrida desde el depósito y el primer paradero del servicio, y cabezal ubicado al interior del depósito cuentan con un valor t de Student alto en los

modelos finales donde fueron incluidas, manteniendo sus signos esperados. Cabe señalar que ambas no fueron incorporadas de forma simultánea para evitar efectos de correlación que fueron encontrados en los modelos preliminares.

Tabla 5. 2: Estimación final de modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO, periodo 1

Variables	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD
	Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)
	Modelo 6.1	Modelo 7.1	Modelo 8.1	Modelo 9.1	Modelo 10.1
Frecuencia programada	<b>0,019 (9,74)</b>	<b>0,017 (7,69)</b>	<b>-0,022 (-9,43)</b>	<b>-0,02 (-7,63)</b>	<b>-0,191 (-9,54)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,001 (-1,23)	-	0,002 (1,17)	-	-
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	<b>0,001 (2,73)</b>	-	<b>-0,001 (-2,73)</b>	0,007 (1,53)
Subus Chile	<b>0,149 (8,06)</b>	<b>0,158 (8,61)</b>	<b>-0,175 (-7,88)</b>	<b>-0,184 (-8,3)</b>	<b>1,155 (5,04)</b>
Express de Santiago	<b>0,088 (4,8)</b>	<b>0,105 (5,51)</b>	<b>-0,112 (-5,07)</b>	<b>-0,138 (-6,21)</b>	<b>0,623 (3,28)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,049 (-2,56)</b>	<b>-0,065 (-3,23)</b>	<b>0,06 (2,59)</b>	<b>0,097 (2,94)</b>	<b>-0,746 (-3,93)</b>
Redbus Urbano	-0,024 (-1,42)	-	0,029 (1,4)	-	-
Cabezal ubicado al interior del depósito	-	-	-	0,031 (1,81)	-
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	<b>0,003 (2,88)</b>	0,002 (1,58)	<b>-0,004 (-2,47)</b>	-	-
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,007 (5,23)</b>	<b>0,008 (5,23)</b>	<b>-0,009 (-5,33)</b>	<b>-0,01 (-5,43)</b>	<b>0,035 (2,54)</b>
Constante	<b>0,252 (7,9)</b>	<b>0,207 (10,56)</b>	<b>0,794 (20,66)</b>	<b>0,829 (37,38)</b>	<b>4,516 (23,3)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,381	0,385	0,374	0,382	0,22
Error	0,135	0,134	0,163	0,161	1,363
Durbin-Watson	1,85	1,75	1,86	1,77	2,00

De forma paralela, se estima para la semana en cuestión un modelo entre las 5.30 y las 6.29 horas que incorpora como variable dependiente a los minutos de incidencia. Para esto, se utiliza la técnica de regresión robusta con el objetivo de evitar heterocedasticidad y correlación de los residuos. En la Tabla 5.3 se muestran los coeficientes determinados y los valores del estadístico t de Student asociado. Notar que solo fueron incluidas las variables explicativas que obtuvieron una significancia estadística con intervalo de confianza mayor o igual a un 85%.

En este caso, fue considerado el intervalo programado en vez de la frecuencia ya que se alcanza una mayor bondad de ajuste. No obstante, el valor del  $R^2$  ajustado es bajo, por lo que se deduce que este conjunto de variables independientes no permiten explicar satisfactoriamente la varianza en los minutos de incidencia para el periodo 5.30 a 6.29 horas.

Tabla 5. 3: Estimación final modelo con indicador Minc, periodo 1

Variables	Indicador Minc
	Coefficientes (t-stat)
	Modelo 11.1
Intervalo programado	<b>-0,017 (-5,08)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	<b>-0,007 (-2,04)</b>
Inversiones Alsacia	<b>0,278 (1,55)</b>
Subus Chile	<b>0,272 (3,59)</b>
Express de Santiago	<b>0,211 (2,58)</b>
Constante	<b>0,612 (5,45)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,045
Error	0,732

## 5.2. Modelación Periodo 2: Punta Mañana (6.30 a 8.29 horas)

A continuación se muestran los resultados de los modelos estimados para el periodo comprendido entre las 6.30 y las 8.29 horas, correspondiente a la Punta Mañana. Las variables explicadas consideradas como medidas de variabilidad de intervalos al inicio de la ruta son las mismas que fueron analizadas en la modelación del periodo 1, es decir, se utiliza el coeficiente de variación (CV), índice por observación modificado (Reg\_IPO), desviación estándar (STD) y posteriormente, los minutos de incidencia (Minc).

En primer lugar, se procede a verificar los supuestos de regresión multivariada para los modelos preliminares expuestos en la Tabla 5.4. Con respecto al cumplimiento de normalidad, se presentan en las Figuras 5.10 a 5.15 histogramas de residuos y sus respectivos gráficos de probabilidad normal de tipo P-P, asociados a cada modelo estimado. En ellos se observa que los errores se aproximan a la distribución requerida, principalmente al utilizar como indicadores de variabilidad de intervalos al CV y Reg\_IPO. Sin embargo, la verificación de este supuesto pierde relevancia si se tienen en cuenta las características de los estimadores MCO mencionadas anteriormente y el tamaño de la muestra con la que se ha trabajado.

Paralelamente, la independencia de los residuos se demuestra mediante el estadístico Durbin Watson, el cual toma valores entre 1,5 y 2 para los modelos estimados en el periodo de interés que incorporan como variables dependientes a CV, STD y Reg\_IPO, tal como se expone en la Tabla 5.4.

Por otro lado, para la verificación del supuesto de homocedasticidad se utilizan diagramas de dispersión (ver Figuras 5.16 a 5.18). En ellos se observa que para los modelos con CV y Reg\_IPO como variables explicadas la hipótesis es cumplida, no obstante, al utilizar el indicador STD nuevamente se presencian evidencias de heterocedasticidad. Con el objetivo de no afectar la validez de los resultados entregados por los test t y F, se realiza una regresión lineal robusta para la estimación de coeficientes en el modelo con STD.

Figura 5.10: Histograma de residuos, Indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 2

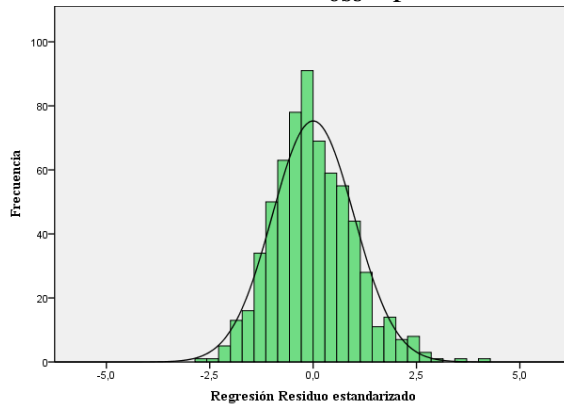


Figura 5.11: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 2

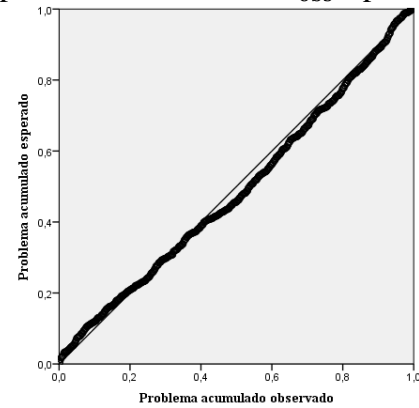


Figura 5.12: Histograma de residuos, Indicador Reg\_IPO, periodo 2

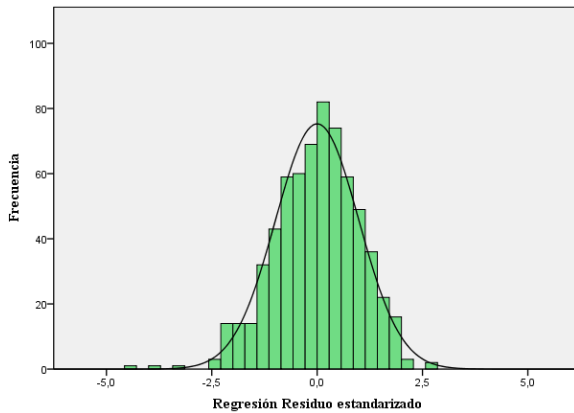


Figura 5.13: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador Reg\_IPO, periodo 2

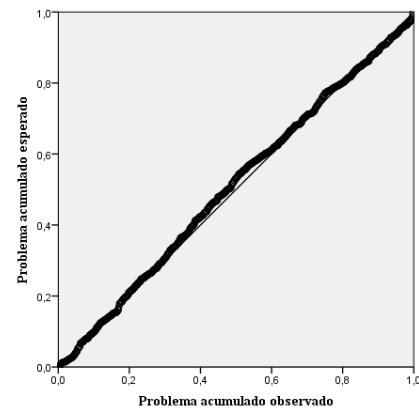


Figura 5.14: Histograma de residuos, Indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 2

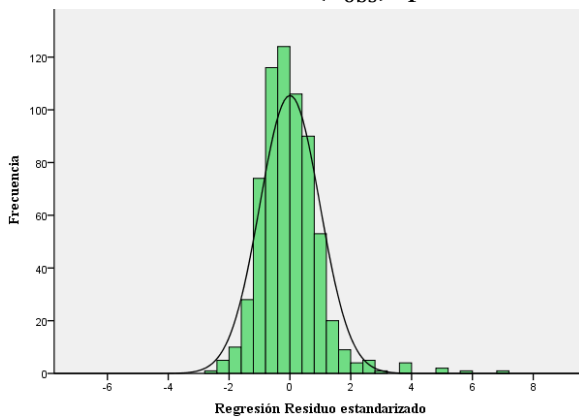


Figura 5.15: Gráfico de probabilidad normal de tipo P-P, indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 2

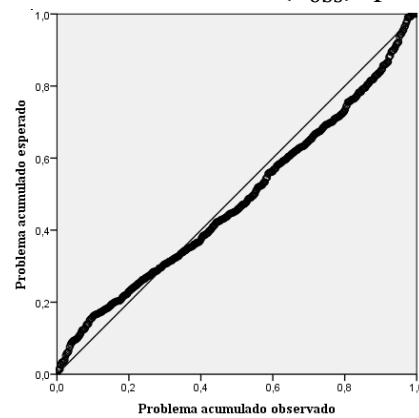


Figura 5.16: Diagrama de dispersión, Indicador  $CV(h_{obs})$ , periodo 2

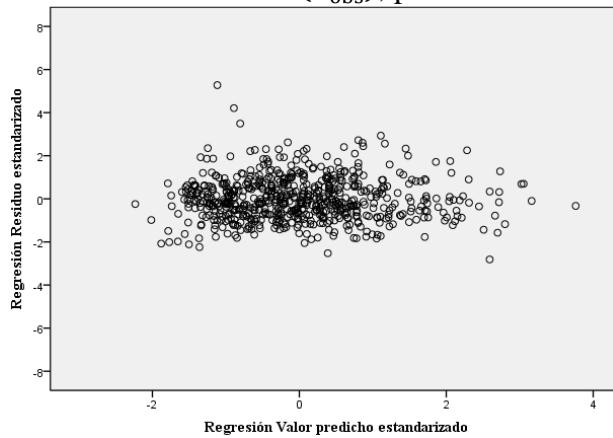


Figura 5.17: Diagrama de dispersión, Indicador Reg\_IPO, periodo 2

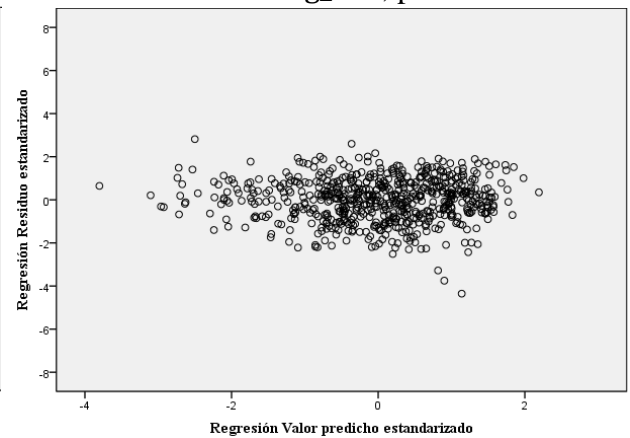
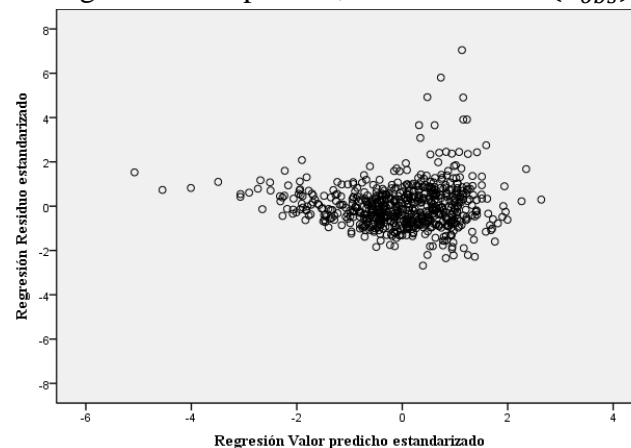


Figura 5.18: Diagrama de dispersión, Indicador  $STD(h_{obs})$ , periodo 2



La modelación preliminar realizada para el periodo comprendido entre las 6.30 y 8.29 horas, para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, se presenta en la Tabla 5.4. Cabe recordar que para los indicadores CV y Reg\_IPO han sido usadas técnicas de mínimos cuadrados ordinarios, mientras que para el indicador STD se lleva a cabo una regresión lineal robusta que ha entregado coeficientes equivalente a los obtenidos a partir de MCO (ver Anexo A.2), pero con diferencias en el valor t de Student.

Con respecto a las variables estadísticamente significativas para el periodo operacional estudiado (aparecen en negrilla), la frecuencia programada, el largo de la ruta en la expedición de retorno, las empresas operadoras Buses Vule, Express de Santiago y Metbus, la presencia del cabezal en el depósito y el número de servicios-sentido por cabezal obtienen valores para el estadístico t de Student mayores a 1,96 o bien, menores a  $-1,96$ , para los tres indicadores involucrados en la estimación (CV, STD y Reg\_IPO).

Tabla 5. 4: Estimación preliminar de modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO, periodo 2

Variables	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD
	Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)
	Modelo 1.2	Modelo 2.2	Modelo 3.2	Modelo 4.2	Modelo 5.2
Frecuencia programada	<b>0,022 (13,24)</b>	<b>0,021 (13,01)</b>	<b>-0,02 (-13,25)</b>	<b>-0,019 (-13,0)</b>	<b>-0,244 (-11,77)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	<b>-0,003 (-2,04)</b>	-0,001 (-0,7)	<b>0,003 (2,02)</b>	0,001 (0,65)	-0,035 (-1,78)
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	<b>0,001 (3,61)</b>	-	<b>-0,001 (-3,66)</b>	-
Largo de la ruta, expedición de retorno	<b>0,003 (3,52)</b>	-	<b>-0,002 (-3,46)</b>	-	<b>0,042 (3,1)</b>
Inversiones Alsacia	0,04 (1,45)	0,039 (1,41)	-0,042 (-1,67)	-0,04 (-1,61)	0,38 (1,49)
Subus Chile	<b>0,065 (2,73)</b>	<b>0,077 (3,25)</b>	<b>-0,058 (-2,71)</b>	<b>-0,069 (-3,22)</b>	0,317 (1,34)
Buses Vule	<b>-0,057 (-2,6)</b>	<b>-0,056 (-2,53)</b>	<b>0,053 (2,65)</b>	<b>0,051 (2,57)</b>	<b>-0,549 (-2,96)</b>
Express de Santiago	<b>0,087 (3,61)</b>	<b>0,101 (4,24)</b>	<b>-0,088 (-4,05)</b>	<b>-0,098 (-4,57)</b>	<b>0,998 (3,74)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,071 (-2,77)</b>	<b>-0,069 (-2,62)</b>	<b>0,062 (2,71)</b>	<b>0,062 (2,62)</b>	<b>-0,853 (-3,67)</b>
Redbus Urbano	-0,001 (-0,03)	0,006 (0,26)	-0,002 (-0,1)	-0,008 (-0,38)	0,37 (1,55)
Punto de regulación ubicado en el cabezal	0,026 (1,52)	0,024 (1,41)	-0,024 (-1,61)	-0,022 (-1,45)	<b>0,366 (2,44)</b>
Cabezal ubicado al interior del depósito	<b>-0,061 (-4,84)</b>	<b>-0,055 (-4,47)</b>	<b>0,058 (5,18)</b>	<b>0,053 (4,8)</b>	<b>-0,431 (-3,32)</b>
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	-0,003 (-1,27)	-0,004 (-1,36)	0,003 (1,23)	0,003 (1,32)	-0,043 (-1,63)
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,007 (5,26)</b>	<b>0,007 (4,81)</b>	<b>-0,007 (-5,31)</b>	<b>-0,006 (-4,97)</b>	<b>0,059 (4,45)</b>
Constante	<b>0,332 (8,72)</b>	<b>0,311 (7,91)</b>	<b>0,798 (23,27)</b>	<b>0,819 (23,07)</b>	<b>5,964 (13,89)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,406	0,398	0,413	0,406	0,311
Error	0,139	0,138	0,125	0,124	1,504
Durbin-Watson	1,74	1,76	1,75	1,76	1,74

La frecuencia programada, al igual que en la modelación anterior, afectará a la variabilidad de intervalos al inicio de la ruta, aumentándola en el caso que se considere como indicador al CV y reduciéndola en los modelos con STD.

Por otro lado, la variable explicativa velocidad comercial de la expedición de retorno resulta significativa para algunos de los modelos estimados en los que se tiene valores del estadístico t de Student alrededor de  $\pm 2$ , o bien con significancia estadística al 90% ( $t = -1,78$ ;  $p\text{-valor} = 0,076$ ). Sin embargo, al incluir de forma simultánea la velocidad comercial con la variable explicativa demanda media por bus, la primera pierde significancia. Los signos de los coeficientes responden a lo esperado, de acuerdo lo visto en la literatura, ya que mientras mayor es la velocidad



comercial el tiempo de viaje se reduce, la probabilidad de regresar al cabezal de forma impuntual disminuye, mejorando la regularidad de las salidas de buses.

El largo de la ruta de la expedición de retorno es una de las variables que, a diferencia de los modelos estimados entre 5.30 y 6.29 horas, obtiene significancia estadística con intervalo de confianza al 95%, en los modelos con CV, STD y Reg\_IPO, para el periodo de 6.30 a 8.29 horas. Según los signos de los parámetros, mientras más larga sea la ruta que recorre el bus mayor es la variabilidad de los intervalos al inicio del servicio, dado que los vehículos se ven expuestos a mayores agentes externos que podrían retrasar su retorno al cabezal. De igual forma, la demanda media por bus resulta significativa en los modelos preliminares donde fue incorporada y con el signo esperado, aumentando la variabilidad de los despachos. Cabe señalar que no han sido estimados modelos que incluyan simultáneamente las variables largo de ruta y demanda media por bus, debido a que se encontró una alta correlación entre ellas que podría afectar la validez de los contrastes de significación.

Con respecto a las variables tipo dummy que buscan capturar el desempeño de las empresas al inicio de la ruta, se señala que Buses Vule, Express de Santiago y Metbus presentan diferencias estadísticamente significativas con STP en los modelos de la Tabla 5.4, mientras que Subus Chile obtiene valores de t de Student que superan el umbral requerido en los modelos con CV y Reg\_IPO como indicadores de variabilidad de intervalos. Las empresas restantes (Inversiones Alsacia y Redbus Urbano) no resultan significativas, es decir, no se pueden determinar diferencias entre su operación y la de STP para el periodo estudiado, no obstante, se debe notar que en los modelos con indicador Reg\_IPO Inversiones Alsacia obtiene significancia estadística con intervalo de confianza al 90%.

La existencia del punto de control de regularidad en el cabezal tiene significancia estadística solo en el modelo que utiliza a la STD como indicador de variabilidad, donde se puede notar que el signo obtenido no concuerda con la influencia esperada, ya que mientras más se controle los intervalos de tiempo entre buses en cercanías del cabezal donde se inicia el servicio, se espera un mayor cumplimiento del programa de despachos y una menor variabilidad.

Por otro lado, la variable distancia recorrida entre el depósito y el primer paradero deja de ser significativa en los modelos anteriores para el periodo de 6.30 a 8.29 horas. Ello se explica en el hecho de que para el periodo en cuestión, la mayor parte de los servicios-sentido del sistema se han posicionado en sus respectivos cabezales y solo un 33% de los recorridos debe retornar frecuentemente al depósito (ver Tabla 4.10, periodo 2), por lo cual la distancia recorrida pierde relevancia en la operación al inicio de la ruta.

La presencia del cabezal al interior del depósito obtiene significancia estadística al 95% para las estimaciones con CV, STD y Reg\_IPO como variables dependientes, a diferencia de la modelación entre 5.30 y 6.29 horas donde no resultó ser una variable relevante para explicar el fenómeno en estudio. Además, el signo de sus parámetros concuerda con lo esperado, mostrando que la regularidad en los despachos para los servicios-sentido que cuentan con su cabezal ubicado en el depósito mismo se ve favorecida, ya que se evitan conflictos con el entorno urbano y quejas de las comunidades aledañas, por la congestión y el ruido que puede significar el iniciar un recorrido en puntos críticos de la ciudad.

Finalmente, la variable explicativa número de servicios-sentido por cabezal continúa siendo significativa para todos los modelos preliminares estimados y los respectivos coeficientes presentan el signo esperado, mostrando que mientras más servicios compartan el espacio establecido para iniciar sus recorrido, más difícil resulta cumplir con el intervalo programado entre salidas consecutivas.

Los modelos finales a partir de los indicadores CV, STD y Reg\_IPO, para el periodo comprendido entre las 6.30 y las 8.29 horas en la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, se exponen en la Tabla 5.5. Para ello, se han excluido de los modelos preliminares variables explicativas sin significancia estadística. Al igual que en las estimaciones anteriores, las variables frecuencia programada, largo de la ruta de la expedición de retorno, empresas Buses Vule, Express de Santiago, Metbus, presencia del cabezal al interior del depósito y número de servicios-sentido por cabezal son estadísticamente significativas al 95%, independiente de la medida de variabilidad pura utilizada.

Tabla 5. 5: Estimación final de modelos con indicadores CV, STD y Reg\_IPO, periodo 2

Variables	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD
	Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)		Coeficientes (t-stat)
	Modelo 6.2	Modelo 7.2	Modelo 8.2	Modelo 9.2	Modelo 10.2
Frecuencia programada	<b>0,022 (13,34)</b>	<b>0,022 (13,11)</b>	<b>-0,02 (-13,34)</b>	<b>-0,019 (-13,1)</b>	<b>-0,243 (-11,4)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	<b>-0,003 (-2,05)</b>	-	<b>0,003 (2,03)</b>	-	-0,035 (-1,84)
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	<b>0,001 (4,15)</b>	-	<b>-0,001 (-4,19)</b>	-
Largo de la ruta, expedición de retorno	<b>0,003 (3,73)</b>	-	<b>-0,003 (-3,68)</b>	-	<b>0,046 (3,83)</b>
Inversiones Alsacia	0,038 (1,68)	0,03 (1,33)	-0,038 (-1,86)	-0,03 (-1,51)	-
Subus Chile	<b>0,065 (3,5)</b>	<b>0,069 (3,92)</b>	<b>-0,056 (-3,38)</b>	<b>-0,06 (-3,79)</b>	-
Buses Vule	<b>-0,056 (-3,51)</b>	<b>-0,059 (-3,69)</b>	<b>0,053 (3,7)</b>	<b>0,056 (3,85)</b>	<b>-0,81 (-5,89)</b>
Express de Santiago	<b>0,086 (4,59)</b>	<b>0,091 (5,08)</b>	<b>-0,083 (-4,94)</b>	<b>-0,088 (-5,43)</b>	<b>0,681 (3,3)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,068 (-3,29)</b>	<b>-0,074 (-3,5)</b>	<b>0,062 (3,3)</b>	<b>0,068 (3,57)</b>	<b>-1,129 (-5,63)</b>
Punto de regulación ubicado en el cabezal	-	-	-	-	<b>0,348 (2,36)</b>
Cabezal ubicado al interior del depósito	<b>-0,06 (-4,83)</b>	<b>-0,055 (-4,53)</b>	<b>0,058 (5,19)</b>	<b>0,053 (4,88)</b>	<b>-0,455 (-3,54)</b>
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,008 (5,5)</b>	<b>0,007 (5,17)</b>	<b>-0,007 (-5,65)</b>	<b>-0,007 (-5,31)</b>	<b>0,055 (4,37)</b>
Constante	<b>0,348 (11,84)</b>	<b>0,311 (17,75)</b>	<b>0,78 (29,5)</b>	<b>0,815 (51,45)</b>	<b>6,206 (15,27)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,405	0,398	0,411	0,405	0,311
Error	0,139	0,138	0,125	0,124	1,505
Durbin-Watson	1,73	1,75	1,74	1,75	1,71

Por otro lado, la velocidad comercial continúa siendo significativa y de signo esperado para los modelos con indicadores CV y Reg\_IPO, o bien presenta significancia estadística con intervalo de confianza al 90% ( $t=-1,84$ ;  $p\text{-valor}=0,066$ ) al considerar como variable explicada a la STD. De igual forma, la demanda media por bus presenta valores para el estadístico t de Student que superan el umbral requerido, en los modelos finales donde ha sido incluida como variable explicativa.

Con respecto a la variable tipo dummy asociada al punto de control de regularidad en el cabezal, ésta solo es incluida en el modelo final que considera como indicador a la STD, presentando significancia estadística. El signo del parámetro obtenido es contra intuitivo, ya que se esperaría que al controlar los intervalos de tiempo entre buses en un punto cercano al cabezal, mejor sea la regularidad al inicio de la ruta, sin embargo los resultados de la estimación no muestran esta influencia. Lo anterior señala que el control de regularidad en el cabezal se correlaciona con aquellos casos donde existe una mayor variabilidad de intervalos en el primer paradero. Esto se debe a que cuando la variable binaria toma el valor cero, se desconoce el lugar donde efectivamente se encuentra el punto de control.

Por último, la variable tipo dummy asociada al desempeño al inicio de la ruta de la empresa operadora Inversiones Alsacia no logra ser significativamente distinta de cero para el periodo analizado, en modelaciones que utilizan medidas de variabilidad pura (CV, STD y Reg\_IPO). No obstante, se debe notar que alcanza un nivel de significancia del 90% en dos de los modelos finales expuestos en la Tabla 5.5. Con respecto a la empresa Subus Chile, se obtienen altos valores para el estadístico t de Student en las estimaciones con CV y Reg\_IPO como variables dependientes.

Paralelamente, se estima para la semana en cuestión un modelo entre las 6.30 y las 8.29 horas que incluye como variable explicada a los minutos de incidencia promedio. Se utiliza la regresión robusta con el fin de evitar heterocedasticidad y correlación de los errores. En la Tabla 5.6 se presentan los parámetros obtenidos y los respectivos valores del estadístico t de Student, donde solo fueron incorporadas como variables explicativas aquellas que resultaron ser estadísticamente significativas (en negrilla), o bien con un nivel de significancia superior al 85%.

Cabe recordar que esta variable dependiente captura en mayor medida el cumplimiento del programa de despachos, a diferencia de los indicadores CV, STD y Reg\_IPO que son medidas puras de variabilidad de intervalos. En este caso, la modelación para el periodo 6.30 a 8.29 horas con el indicador Minc entrega que aumentos en las variables frecuencia programada, velocidad comercial y presencia de cabezal en el depósito (estadísticamente significativa al 85%,  $p\text{-valor}=0,119$ ) favorecen el cumplimiento del intervalo programado entre salidas desde el cabezal.

Por otro lado, el largo de la ruta, número de líneas por cabezal y la ubicación del punto de control de regularidad en las cercanías del inicio del servicio, son variables explicativas que resultaron significativas en esta modelación donde aumentos en ellas implicarían un menor cumplimiento del programa de despachos. Con respecto al comportamiento de la variable tipo dummy asociada al punto de control de regularidad en el cabezal, el signo de su coeficiente estimado nuevamente es contra intuitivo, al igual como ocurrió en la modelación con STD para el periodo 6.30 a 8.29 horas.

Tabla 5. 6: Estimación final modelo con indicador Minc, periodo 2

Variables	Indicador Minc
	Coefficientes (t-stat) Modelo 11.2
Frecuencia programada	<b>-0,028 (-3,75)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	<b>-0,017 (-2,06)</b>
Largo de la ruta, expedición de retorno	<b>0,016 (3,48)</b>
Inversiones Alsacia	<b>0,213 (2,23)</b>
Buses Vule	<b>-0,344 (-5,46)</b>
Express de Santiago	<b>0,443 (3,61)</b>
Metbus	<b>-0,412 (-5,37)</b>
Redbus Urbano	0,123 (1,49)
Punto de control de regularidad ubicado en el cabezal	<b>0,199 (3,0)</b>
Cabezal ubicado al interior del depósito	-0,092 (-1,56)
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,022 (3,35)</b>
Constante	<b>0,822 (4,65)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,191
Error	0,663
Durbin-Watson	1,73

Finalmente, al observar los coeficientes de las variables tipo dummy que buscan capturar el desempeño de las empresas operadoras al inicio de la ruta, se nota que Inversiones Alsacia, Express de Santiago, Buses Vule y Metbus presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto al operador STP en el modelo con indicador Minc, para la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016 entre las 6.30 y las 8.29 horas. Los operadores restantes (Subus Chile y Redbus Urbano) no resultan significativos en el modelo expuesto en la Tabla 5.6, es decir, no es posible determinar diferencias entre su operación y la de STP para el periodo estudiado.

### 5.3. Análisis de parámetros

A continuación serán analizados los coeficientes de las variables que conforman los modelos finales estimados, para ambos periodos en estudio. Para ello, se utilizarán las categorías establecidas en el capítulo de modelación. Finalmente se ordenan las variables explicativas de acuerdo a la importancia relativa de sus parámetros.

### **5.3.1. Operación y diseño de la red**

En primer lugar la frecuencia programada es una de las variables explicativas más relevantes en la modelación de regularidad en el despacho de los buses, ya que presenta significancia estadística para ambos periodos estudiados. Su impacto sobre la variabilidad de intervalos dependerá del indicador que se utilice. Por un lado, al considerar como variable dependiente al coeficiente de variación (o bien al indicador Reg\_IPO), se obtiene que en servicios-sentido con mayor frecuencia programada es más probable evidenciar despachos irregulares desde el cabezal de inicio. Por otro lado, el análisis cambia cuando la variable explicada es la desviación estándar o los minutos de incidencia, ya que mientras menor sea la frecuencia programada para un respectivo servicio mayores valores toman los indicadores, es decir, las salidas irregulares son favorecidas. Lo anterior se explica en la forma en cómo se determinan estas medidas de variabilidad, ya que tal como se explicó previamente la frecuencia programada actúa de manera distinta en el cálculo de ellos.

Con respecto a las variables restantes que buscan capturar efectos de la operación y diseño de la red, solo la demanda media por bus está presente en los modelos finales del periodo 5.30 a 6.29 horas. Sin embargo, para el segundo periodo estudiado (6.30 a 8.29 horas) tanto el largo de la ruta, como la velocidad comercial y la demanda media por bus resultan ser variables estadísticamente significativas en los modelos donde fueron incorporadas. Estas tres afectan la puntualidad con la que retorna el bus al cabezal, por ende, se espera que tengan una mayor implicancia en la regularidad de los despachos en periodos del día caracterizados por el alto flujo vehicular y una gran demanda, como ocurre en la Punta Mañana. Por lo tanto, aquellos servicios con rutas más largas y demandas mayores contribuyen a aumentar la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, mientras que aumentos de la velocidad comercial favorecen la regularidad y el cumplimiento programado de salidas.

### **5.3.2. Desempeño de la empresa operadora**

En los modelos que incluyen como variables dependientes a CV, STD o Reg\_IPO, las empresas Subus Chile, Express de Santiago y Metbus son las únicas que poseen diferencias estadísticamente significativas con respecto al operador STP para ambos periodos estudiados, en la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016. Por un lado, Buses Vule está presente en los modelos finales del periodo 2, alcanzando un nivel de significancia del 95% para cada uno de ellos. Por otro lado, Inversiones Alsacia y Redbus Urbano no aparecen en ninguna estimación final, por lo que se deduce que sus desempeños en lo que respecta a la regularidad de los despachos no son estadísticamente distintos al del operador STP.

Al incluir como variable dependiente a los minutos de incidencia, las empresas operadoras Inversiones Alsacia, Express de Santiago, Buses Vule y Metbus poseen diferencias estadísticamente significativas con el operador STP, solo para el periodo desde las 6.30 a las 8.29 horas. Subus Chile y Redbus Urbano realizan un desempeño similar a STP en lo que respecta al cumplimiento del intervalo programado entre salidas, durante la semana analizada.

En la Tabla 5.7 se resumen los resultados capturados por la modelación con CV, STD o Reg\_IPO a partir de una clasificación de las unidades de negocio que tiene como finalidad reflejar el desempeño mostrado al inicio de la ruta, específicamente la regularidad con la que salen sus servicios desde el cabezal respectivo, para los periodos 5.30-6.29 y 6.30-8.29 horas. Las empresas son agrupadas en tres categorías: peor, similar o mejor desempeño que STP.

Tabla 5. 7: Desempeño de operadores, indicadores CV, STD y Reg\_IPO

<b>Desempeño con respecto a STP</b>	<b>Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas</b>	<b>Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas</b>
Peor	Subus Chile	Express de Santiago
	Express de Santiago	Subus Chile
Similar	Inversiones Alsacia	Inversiones Alsacia
	Redbus Urbano	Redbus Urbano
	Buses Vule	-
Mejor	Metbus	Buses Vule
	-	Metbus

De igual forma, los resultados capturados por la modelación con Minc para el periodo 6.30-8.29 horas permiten realizar una clasificación de las empresas operadoras, de acuerdo a su desempeño mostrado en el cumplimiento de los despachos programados, en comparación con el operador STP (ver Tabla 5.8). En este caso, se obtuvo que Inversiones Alsacia y Express de Santiago fueron las empresas con peor desempeño al inicio de la ruta durante el periodo analizado, mientras que Metbus y Buses Vule logran un mayor cumplimiento del programa en cabezales, situación que concuerda con lo mostrado en la Figura 1.1.

Tabla 5. 8: Desempeño de operadores, indicador minutos de incidencia

<b>Desempeño con respecto a STP</b>	<b>Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas</b>
Peor	Express de Santiago
	Inversiones Alsacia
Similar	Subus Chile
	Redbus Urbano
Mejor	Metbus
	Buses Vule

### 5.3.3. Operación e infraestructura de cabezales y depósitos

Dentro de las variables explicativas que buscan capturar efectos de la operación e infraestructura de cabezales y depósitos, el número de servicios-sentido por cabezal es la única estadísticamente significativa en cada uno de los modelos finales obtenidos, para ambos periodos estudiados. Los signos de los parámetros señalan que mientras mayor sea el número de servicios asignados al cabezal de inicio, más difícil resulta el control operacional y el cumplimiento de las

salidas programadas, incrementando la variabilidad de los intervalos de tiempo entre despachos consecutivos. Esta relación se evidencia diariamente, sobre todo en aquellos servicios-sentido que inician sus recorridos en puntos críticos de la ciudad afectados por la congestión del sector, los reclamos y el poco espacio disponible para detenerse, ya sea por una baja capacidad o porque los sitios están ocupados, lo cual dificulta las medidas de gestión que puedan ser tomadas.

La distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio es significativa en los modelos finales que utilizan como indicadores CV y Reg\_IPO, para el periodo entre las 5.30 y las 6.29 horas. Sin embargo, para el segundo periodo analizado (Punta Mañana) no presenta significancia estadística y por ende, no se encuentra incorporada en las estimaciones de las Tablas 5.5 y 5.6

Lo anterior se debe a que el periodo de Transición Nocturna se caracteriza por dar inicio a la operación de la mayor parte de los servicios-sentido que forman el sistema, por lo tanto, los buses abandonan los depósitos y se dirigen a posicionarse en los cabezales respectivos. Luego, si la distancia que deben recorrer es extensa, la probabilidad de llegar retrasado al punto de inicio del servicio se incrementa y con ello la variabilidad de los intervalos. Por otro lado, entre las 6.30 y las 8.29 horas solo un tercio de los recorridos deben retornar al depósito. Con ello, la regularidad con la que se despacha depende de la operación en el cabezal mismo y lo que suceda en el depósito tiene menor relevancia.

La variable tipo dummy asociada a la ubicación del cabezal en el depósito es estadísticamente significativa al 95% solo para los modelos finales correspondientes al periodo 6.30-8.29 horas, que incorporan como variables dependientes a CV, STD o Reg\_IPO. Para el modelo final con indicador Minc, la variable tiene significancia estadística con intervalo de confianza al 85% ( $t=1,56$ ;  $p\text{-valor}=0,119$ ). Los resultados obtenidos señalan que mientras más servicios-sentido cuentan con el cabezal posicionado en el depósito mismo, la variabilidad de los intervalos entre despachos se ve reducida debido a que es más factible controlar y gestionar la operación en sitios con mayor capacidad de acopio.

Finalmente, la variable tipo dummy asociada a la presencia del punto de control de regularidad en el cabezal solo alcanza la significancia estadística en los modelos finales del periodo 6.30 a 8.29 horas que incluyen como indicadores a STD o Minc, donde los signos de los coeficientes obtenidos no concuerdan con la influencia esperada.

#### **5.3.4. Importancia relativa de los parámetros**

Con el objetivo de valorar la importancia relativa de cada variable explicativa respecto a la variable estudiada, serán utilizados los coeficientes de regresión estandarizados, los cuales se basan en puntuaciones típicas permitiendo efectuar comparaciones entre ellos. En general, mientras mayor sea el valor del coeficiente estandarizado (en valor absoluto), más peso tiene la respectiva variable independiente en la modelación de variabilidad de intervalos al inicio de la ruta. A partir de las estimaciones finales, en las Tablas 5.9 y 5.10 se presentan los resultados obtenidos para cada periodo en estudio en función de los indicadores utilizados.

Tabla 5. 9: Coeficientes estandarizados en modelos finales, periodo 5.30 a 6.29 horas

Variables	Indicador CV Coeficientes estandarizados		Indicador Reg_IPO Coeficientes estandarizados		Indicador STD Coeficientes estandarizados
	Modelo 6.1	Modelo 7.1	Modelo 8.1	Modelo 9.1	Modelo 10.1
Frecuencia programada	0,355	0,303	-0,346	-0,3	-0,387
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,043	-	0,041	-	-
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	0,107	-	-0,104	0,067
Subus Chile	0,307	0,339	-0,302	-0,328	0,274
Express de Santiago	0,182	0,216	-0,194	-0,237	0,142
Buses Metropolitana (Metbus)	-0,094	-0,127	0,096	0,126	-0,161
Redbus Urbano	-0,053	-	0,053	-	-
Cabezal ubicado al interior del depósito	-	-	-	0,071	-
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	0,103	0,065	-0,09	-	-
Número de servicios-sentido por cabezal	0,179	0,195	-0,184	-0,205	0,098

Tabla 5. 10: Coeficientes estandarizados en modelos finales, periodo 6.30 a 8.29 horas

Variables	Indicador CV Coeficientes estandarizados		Indicador Reg_IPO Coeficientes estandarizados		Indicador STD Coeficientes estandarizados	Indicador Minc Coeficientes estandarizados
	Modelo 6.2	Modelo 7.2	Modelo 8.2	Modelo 9.2	Modelo 10.2	Modelo 11.2
Frecuencia programada	0,428	0,422	-0,425	-0,419	-0,467	-0,134
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,066	-	0,065	-	-0,072	-0,085
Demanda media por bus, expedición de retorno	-	0,14	-	-0,141	-	-
Largo de la ruta, expedición de retorno	0,137	-	-0,134	-	0,213	0,188
Inversiones Alsacia	0,059	0,048	-0,065	-0,054	-	0,082
Subus Chile	0,134	0,146	-0,128	-0,14	-	-
Buses Vule	-0,129	-0,139	0,135	0,144	-0,185	-0,193
Express de Santiago	0,17	0,184	-0,182	-0,196	0,135	0,216
Buses Metropolitana (Metbus)	-0,12	-0,131	0,12	0,132	-0,198	-0,177
Punto de regulación ubicado en el cabezal	-	-	-	-	0,063	0,089
Cabezal ubicado al interior del depósito	-0,158	-0,146	0,169	0,156	-0,118	-0,059
Número de servicios-sentido por cabezal	0,172	0,163	-0,176	-0,167	0,125	0,12



Teniendo conocimiento de la relevancia de cada variable en las modelaciones finales y su significancia estadística, a modo de resumen se exponen en la Tabla 5.11 los factores identificados como influyentes en la regularidad con la que se despacha los buses desde el cabezal, para ambos periodos en estudio. Ellos son agrupados en sus respectivas categorías y ordenados de manera descendiente en importancia.

Tabla 5. 11: Variables significativas por periodo, orden descendiente de importancia

<b>Categoría</b>	<b>Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas</b>	<b>Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas</b>
Operación y diseño de la red	Frecuencia programada	Frecuencia programada
	Demanda media por bus, expedición de retorno	Largo de la ruta, expedición de retorno
	-	Demanda media por bus, expedición de retorno
	-	Velocidad comercial, expedición de retorno
Desempeño de la empresa operadora	Subus Chile	Express de Santiago
	Express de Santiago	Buses Vule
	Metbus	Subus Chile
	-	Metbus
	-	Inversiones Alsacia
Operación e infraestructura de cabezales y depósitos	Número de servicios-sentido por cabezal	Número de servicios-sentido por cabezal
	Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	Cabezal ubicado al interior del depósito

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones finales

En la presente investigación han sido estudiados los factores que inciden en la regularidad de los despachos de buses desde el cabezal de inicio, para la ciudad de Santiago de Chile. Para ello, fueron utilizados datos correspondientes a la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016, que contienen información de la posición del vehículo en la ruta, obtenida gracias a los dispositivos GPS que poseen, y del número de pasajeros que suben por cada paradero asignado al servicio, la cual está sujeta a que el usuario realice el pago del pasaje mediante su tarjeta Bip!.

El estudio de variabilidad de los intervalos de tiempo al inicio de la ruta fue efectuado a partir de la técnica de regresión lineal múltiple, donde los modelos estimados consideraron cuatro variables dependientes: coeficiente de variación (CV), desviación estándar (STD), minutos de incidencia (Minc) e índice por observación modificado (denotado como Reg\_IPO en el desarrollo de la memoria), éste último es una función del coeficiente de variación. Por un lado, las dos primeras han sido usadas comúnmente en la literatura como medidas de varianza de intervalos, mientras que la variable dependiente Reg\_IPO no es del todo conocida pero tiene la ventaja de aproximarse a una distribución normal. Por otro lado, el indicador Minc se caracteriza por ser una de las medidas usada actualmente por el regulador de Transantiago. Para representar a los indicadores de variabilidad propuestos, se determinan los intervalos entre buses consecutivos que pasan por el primer paradero.

La modelación de variables fue abordada para dos periodos del día. El primer caso estudiado es conocido como periodo de Transición Nocturna y comprende entre las 5.30 a 6.29 horas, donde gran parte de los servicios-sentido del sistema inician su operación. El segundo periodo, la Punta Mañana, abarca desde las 6.30 a las 8.29 horas. Éste se caracteriza por la alta demanda, congestión vehicular y un gran número de viajes realizados con destinos trabajo y estudio.

En primer lugar, se concluye que es posible determinar las variables que afectan en la regularidad observada en los despachos de buses a partir de modelos de regresión multivariada. Para ello, se verifican los supuestos requeridos para usar mínimos cuadrados ordinarios y aquellos modelos que no los cumplen son estimados mediante la técnica de regresión robusta. A su vez, se identifica si las variables explicativas contribuyen a aumentar o disminuir la variabilidad de los intervalos de tiempo entre salidas desde el cabezal.

Basándose en la bondad de ajuste de los modelos estimados (valores de  $R^2$  ajustado), se puede afirmar que éstos son más útiles para determinar qué factores influyen en el fenómeno estudiado que para tratar de predecir la varianza de los intervalos al usar otro conjunto de variables explicativas. Por lo tanto, el objetivo principal de la investigación se cumple.

Los resultados obtenidos en esta memoria tienen gran utilidad en el desarrollo de medidas de planificación y gestión enfocadas en mejorar la operación del transporte público de la ciudad, ya que fuera de Chile son escasos los estudios que tratan de explicar las causas de la irregularidad de buses al inicio de la ruta, fenómeno que ha sido reconocido en la literatura como uno de los que contribuye en el apaltonamiento de buses. Es más, ésta corresponde a la primera investigación en Chile enfocada en determinar los factores que inciden en la variabilidad de los intervalos entre salidas desde el cabezal. Luego, despachar de forma regular puede traer como consecuencia una menor variabilidad de los intervalos de tiempo a lo largo de la ruta, una reducción en los tiempos de espera de los usuarios y una mayor percepción de confiabilidad hacia el servicio.

La frecuencia programada y el número de líneas por cabezal resultaron ser significativas y de gran relevancia entre las variables que inciden en la regularidad de los despachos de buses, para ambos periodos estudiados. Por un lado, el efecto que genera la frecuencia en el fenómeno estudiado depende del indicador que se utilice en la modelación y como éste se defina. Se detectó que servicios-sentido con altas frecuencias evidencian mayor variabilidad en sus intervalos al inicio de la ruta cuando la variable dependiente es el CV o Reg\_IPO, mientras que modelos con STD (una medida absoluta de variabilidad) o Minc mostraron que aumentos en la frecuencia programada favorecen la mantención de intervalos. Cambiar la frecuencia tiene un efecto directo en el tiempo de espera de las personas, por ende al tomar decisiones respecto a la frecuencia de servicio se deben considerar elementos que van más allá de las variables explicadas utilizadas. Luego, resulta preferible concentrar los recursos en controlar de manera eficiente el cumplimiento del intervalo programado existente entre despachos.

Por otro lado, los parámetros estimados señalan que en cabezales con un mayor número de servicios-sentido compartiendo la infraestructura disponible se evidencia mayor irregularidad en las salidas, ya que mantener un bus detenido en la vía pública con la finalidad de cumplir el intervalo programado puede generar conflictos con el entorno, más aún si el espacio resulta escaso. Esto deja en evidencia la dificultad que implica operar y gestionar cabezales con baja capacidad de acopio.

La modelación ha entregado factores que presentan significancia estadística exclusivamente en el periodo de las 5.30 a las 6.29 horas. En particular, la distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero de un cierto servicio-sentido es una de las variables que resulta relevante en la regularidad ofrecida al despachar, donde mientras mayor sea el trayecto que recorran los buses para posicionarse en los puntos donde inicia su operación, mayor es la variabilidad de los intervalos. Lo anterior se debe a que la lejanía de depósitos aumentan la probabilidad de llegar retrasado al cabezal ya que los vehículos se encuentran más tiempo sometidos a factores externos a la operación, como por ejemplo congestión e incidentes en la vía, que aumentan la variabilidad de los tiempos de viaje (Durán, 2016).

Estos resultados llevan a pensar que la variable distancia pueda ser influyente en la regularidad en otros periodos del día donde los buses también dejan los depósitos y se dirigen hacia los cabezales de inicio. Luego, la Pre Punta Tarde (14.00 a 17.29 horas) posiblemente se

comporte de forma similar al periodo de Transición Nocturna (5.30 a 6.29 horas), solo que la congestión y el número de buses circulando debería ser mayor.

Las variables explicativas largo de la ruta, demanda media por bus y velocidad comercial, todas asociadas a la expedición de retorno, generan un mayor impacto en la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta en periodos con alta demanda, como en el caso 6.30 a 8.29 horas. Con respecto a las dos primeras, servicios-sentido que presentan rutas más largas o un mayor número de pasajeros promedio por bus están más propensos a evidenciar irregularidad en los despachos. Lo anterior se debe a que estos factores aumentan el tiempo en la ruta, incidiendo en el regreso de los buses al cabezal y por ende, en el cumplimiento de los horarios programados si es que la holgura permitida se ha subestimado. Por otro lado, aumentos en la velocidad comercial favorecen el mantenimiento del intervalo entre salidas.

La presencia del cabezal al interior del depósito resultó ser estadísticamente significativa (o bien con un nivel de significancia superior al 85%) en los modelos finales donde fue considerada, para el periodo 6.30 a 8.29 horas. De acuerdo a los parámetros obtenidos, mientras más servicios-sentido inician su operación en el depósito menor es la variabilidad de los intervalos entre despachos. Esto se debe a la mayor capacidad de acopio que poseen dichos sitios en comparación con el espacio que se dispone en cabezales ubicados en la vía pública, lo cual permite a los operadores retener a los buses por más tiempo y con ello, controlar de mejor manera las salidas programadas.

La ubicación del punto de control de regularidad en el cabezal es significativa en dos de los modelos finales, para el periodo Punta Mañana. Los signos obtenidos para los respectivos coeficientes son contra intuitivos, ya que se esperaría que mientras más cercano al inicio del servicio se encuentre el punto de control de intervalos mejor sea la regularidad de los despachos, sin embargo, el resultado obtenido es contrario. Luego, el control en cabezal se correlaciona con los casos donde existe mayor variabilidad en el primer paradero.

Finalmente, las modelaciones efectuadas entregan diferencias significativas entre los distintos operadores con respecto a la regularidad ofrecida al inicio de la ruta, en la semana laboral del 14 al 18 de Marzo de 2016. En los modelos con indicadores de variabilidad pura (CV, STD y Reg\_IPO), las empresas operadoras Subus Chile y Express de Santiago presentaron un desempeño inferior al del operador STP en ambos periodos estudiados, mientras que Metbus tuvo un cometido superior. A su vez, no se evidencian diferencias estadísticamente significativas entre la empresa STP, Inversiones Alsacia y Redbus Urbano. Con respecto a Buses Vule se tiene que entre las 6.30 y 8.29 horas su desempeño estuvo por sobre STP, mientras que en el periodo anterior fue similar.

Paralelamente, al usar a los minutos de incidencia como variable explicada en la modelación del periodo Punta Mañana, se obtiene que Inversiones Alsacia y Express de Santiago presentan un peor desempeño que STP, mientras que Metbus y Buses Vule alcanzaron un mayor cumplimiento del intervalo programado. Por otro lado, no existen diferencias estadísticamente significativas entre el operador STP, Subus Chile y Redbus Urbano.

Por lo tanto, la incorporación de los minutos de incidencia como indicador de regularidad al inicio de la ruta permite comprobar mediante un modelo econométrico que existen diferencias significativas entre el desempeño de Inversiones Alsacia, Express de Santiago y las restantes

empresas operadoras para el periodo 6.30-8.29 horas, al igual como se observa en la Figura 1.1. Sin embargo, entre las 5.30 y las 6.29 horas el conjunto de variables explicativas propuestas en la presente investigación no logran explicar satisfactoriamente la varianza de los minutos de incidencia, razón por la cual el modelo 11.1 estimado con este indicador no es considerado dentro del análisis del periodo de Transición Nocturna.

En resumen, a continuación se presenta una lista de las variables explicativas que aumentan la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, clasificadas en las categorías definidas previamente:

#### Operación y diseño de la red

- Frecuencia programada, cuando los modelos utilizan los indicadores CV o Reg\_IPO
- Demanda media por bus, expedición de retorno
- Largo de la ruta, expedición de retorno

#### Operación e infraestructura de cabezales y depósitos

- Número de servicios-sentido por cabezal
- Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio

Por otro lado, los factores que favorecen la regularidad entre despachos desde el cabezal son las siguientes:

#### Operación y diseño de la red

- Frecuencia programada, cuando los modelos utilizan los indicadores STD o Minc
- Velocidad comercial, expedición de retorno

#### Operación e infraestructura de cabezales y depósitos

- Cabezal ubicado al interior del depósito

## 6.2. Recomendaciones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten generar una serie de propuestas a ser consideradas por el regulador del sistema y los operadores, sobre todo en reestructuraciones futuras del diseño y operación de la red e infraestructura, con la finalidad de mejorar la regularidad de los intervalos al inicio de la ruta. Dichas recomendaciones se señalan a continuación:

- Redefinir los incentivos existentes a los operadores, de forma tal de establecer un mayor control del programa en cabezales por parte del regulador y con ello, obtener un mejor desempeño de las empresas.

- Poner énfasis en la ubicación de los depósitos y en la infraestructura de los cabezales. En particular, es deseable que los puntos donde se inicia la operación se posicionen en el mismo depósito si es que la distancia que deben recorrer los buses hasta el primer paradero es pequeña. En caso contrario, se propone que los depósitos sean construidos en zonas con mayor acceso y cercanía al entorno urbano, tal que la demanda existente sea mayor y con ello se justifique el diseño de servicios que inicien su operación en puntos próximos al depósito. Ésta medida permite reducir los kilómetros en vacío.
- Cuando el depósito se ubica lejos del cabezal, generalmente en zonas periféricas donde no existe una demanda relevante que justifique extender el servicio hasta allí, se propone la implementación de terminales de paso con capacidad media, en puntos de la ciudad donde un gran número de líneas inician o finalizan sus recorridos. Es decir, se debe velar por la implementación de infraestructura de dimensiones menores a las de un depósito, pero que a diferencia de un punto de regulación ubicado en la vía pública, se pueda realizar el control de despachos evitando efectos del entorno donde se localiza el cabezal.
- Paralelamente, se debe limitar el número de servicios-sentido por cabezal, con el objetivo de que el espacio disponible en la vía pública sea compartido por menos líneas. Esto permite aumentar la capacidad de acopio y el margen de tiempo que el vehículo puede estar detenido.
- Diseñar servicios-sentido que circulen por vías prioritarias para el transporte público en periodos de alta demanda, ya que se ha mostrado que el entorno en el cual circulan los buses incide en el tiempo que les toma retornar al cabezal y por ende, en el cumplimiento del programa de despachos. Bajo la misma línea, se sugiere incorporar nuevas pistas solo buses, vías exclusivas, corredores segregados y diversas medidas enfocadas en dar facilidades al transporte público, para alcanzar mayores velocidades comerciales.
- Aumentar el número de zonas pagas en periodos punta, con el objetivo de reducir los tiempos de detención en paraderos. Por otro lado, para aplanar las horas punta y con ello disminuir el promedio de pasajeros por bus, se proponen medidas de gestión de demanda como el establecimiento de horarios alternativos y flexibles para el trabajo y estudio.
- Diseñar servicios-sentido con rutas más cortas.

### **6.3. Limitaciones del trabajo y líneas futuras de investigación**

Los resultados obtenidos en la presente investigación dependen en gran medida de la riqueza de los datos utilizados y de cómo éstos fueron tratados en la modelación. Para representar la regularidad de los intervalos en el cabezal de inicio se usaron cuatro medidas: coeficiente de variación, desviación estándar e índice por observación modificado y minutos de incidencia. Los tres primeros son indicadores netos de variabilidad, es decir, reflejan que tanto difieren entre si los intervalos observados, ignorando otros aspectos operacionales como la existencia de un intervalo programado entre salidas desde el cabezal.

Por otro lado, los minutos de incidencia toman en cuenta el cumplimiento del programa de despachos, dado que son contabilizados cada vez que se supera el umbral permitido. Sin embargo, esta medida no refleja el mantenimiento del intervalo observado a lo largo del periodo estudiado. Producto de lo antes expuesto, una línea de investigación futura sería definir un indicador capaz de representar la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta sujeto al cumplimiento del plan operacional y probarlo como variable dependiente en los modelos de regresión lineal múltiple.

Con respecto a las variables propuestas para explicar el fenómeno en estudio, cabe recalcar que la demanda media por bus fue obtenida ignorando los efectos que genera la evasión en Transantiago, la cual ronda actualmente el 30%. Ello se debe a que el número de subidas por bus se determina a partir de las validaciones con la tarjeta Bip!, por lo tanto, si un usuario no paga su pasaje el sistema no es capaz de reconocer que ha abordado el bus y la variable explicativa planteada resulta subestimada. Por otro lado, al incorporar la demanda en el problema como un promedio de los pasajeros que suben al bus, se deja de lado la variabilidad a lo largo de la ruta que caracteriza a esta variable. Es por ello que se sugiere evaluar nuevas metodologías para modelar el efecto de la demanda, por ejemplo, calcular el coeficiente de variación de subidas y bajadas a los buses.

Paralelamente, cabe recordar que la distancia recorrida desde el depósito al primer paradero fue medida usando Google Earth, donde la información asociada a la asignación de los servicios-sentido a cada depósitos no es conocida, por ende, fue realizada intuitivamente minimizando los kilómetros en vacío y teniendo en consideración restricción de capacidad. Producto de lo antes expuesto es que se recomienda verificar la asignación de servicios a depósito estimada, mediante visitas a terreno o conversaciones directas con los operadores.

A su vez, existe información que no fue posible obtener mediante las bases de datos disponibles y que podría ser importante a la hora de determinar los factores que inciden en la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta. Ésta tiene relación con el estado de los vehículos, la existencia de fallas mecánicas que retrasen los despachos, capacidad de depósitos y cabezales, ausentismo de los conductores que impidan iniciar la operación a tiempo, entre otros. Por lo tanto, se propone complementar los datos con mediciones efectuadas en terreno.

Finalmente, con el objetivo de validar los resultados obtenidos y aumentar la variabilidad de la información disponible, se plantean las siguientes sugerencias metodológicas para futuras investigaciones. En primer lugar, se deben probar los modelos utilizando datos de otros periodos del día, como por ejemplo la Punta Tarde o las horas previas. Por otro lado, se propone mantener los periodos estudiados pero usar los datos correspondientes a otras semanas laborales.

# Bibliografía

- Abkowitz, M. D. (1978). Transit service reliability. Reporte UMTA-MA-06-0049-78-1. U.S. Department of Transportation Systems Center, Cambridge, Mass.
- Arriagada, J. (2016). *Modelamiento del fenómeno apelsonamiento de buses* (Tesis de Magister en Gestión de Operaciones). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Bowman, L. A. y Turnquist, M. A. (1981). Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research A: General*, 15(6), 465-471.
- Cham, L. C. (2006). *Understanding bus service reliability: A practical framework using AVL/APC data* (Tesis de Master en Ciencias en Transportes). Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Washington, D.C.
- Chen, Q., Adida, E. y Lin, J. (2013). Implementation of an iterative headway-based bus holding strategy with real-time information. *Public Transport*, 4(3), 165-186.
- Cortés, C. E., Sáez, D., Milla, F., Núñez, A. y Riquelme, M. (2010). Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization. *Transportation Research C: Emerging Technologies*, 18(5), 757-769.
- Daganzo, C. F. (2009). A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research B*, 43(10), 913-921.
- Diab, E., Badami, M. y El-Geneidy, A. (2015). Bus transit service reliability and improvement strategies: Integrating the perspectives of passengers and transit agencies in North America. *Transport Reviews*, 23(3), 292-328.
- Directorio de Transporte Público Metropolitano. (2016). Ranking calidad de servicio de empresas concesionarias de Transantiago. Recuperado de <http://www.dtpm.gob.cl/archivos/Ranking%20Calidad%20de%20Servicio%20de%20Empresas%20Concesionarias%20de%20Transantiago%20n15.pdf>.
- Directorio de Transporte Público Metropolitano. (2016). Programa de operación primer semestre de 2016. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/plan-operacional-historico2/24-programas-de-operacion/763-pops2016>.
- Directorio de Transporte Público Metropolitano. (2016). Indicadores de calidad de Servicio. Recuperado de <http://www.dtpm.cl/index.php/2013-04-24-14-10-40/2013-04-29-20-26-21>.



- Durán, E. (2016). *Caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje en la ciudad de Santiago* (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- El-Geneidy, A., Horning, J. y Krizek, K. (2011). Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicular locator systems. *Journal of Advanced Transportation*, 45 (1), 66-79.
- Figliozi, M. A., Feng, W. (2012). A study of headway maintenance for bus routes: Causes and effects of “bus bunching” in extensive and congested service áreas. OTREC-RR-12-09. Portland, Oregon: *Transportation Research Education Center*.
- García, D. (2016). *Modelo mixto de diseño operacional para el inicio de un recorrido de buses* (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería). Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile.
- Hammerle, M., Haynes, M. y McNeil, S. (2005). Use of automatic vehicle location and passenger count data to evaluate bus operations: Experience of the Chicago Transit Authority, Illinois. *Transportation Research Record*, 1903, 27-34.
- Lizana, P., Muñoz, J. C., Giesen, R., y Delgado, F. (2014). Bus control strategy application: Case study of Santiago transit system. *Procedia Computer Science*, 32, 397-404.
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2012). Contrato ad referéndum de concesión de uso de vías para la prestación de servicios de transporte público urbano remunerado de pasajeros mediante buses entre Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones y Subus Chile S.A., Anexo 6: Aseguramiento de la calidad en la ejecución de los servicios.
- Moreira-Matias, L., Ferreira, C., Gama, J., Mendes-Moreira, J., y de Sousa, J. F. (2012). Bus bunching detection by mining sequences of headway deviations. En *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects*, pp. 77-91. Springer Berlin Heidelberg.
- Murillo, C. y González, B. (2000). Validación del modelo de regresión: Contrastes de especificación incorrecta y contrastes de especificación. En *Manual de Econometría*.
- Murphy, K., Becker, A. J. y Wade, J. (2016). Causes of bus service unreliability at the first time point: Mining the data.
- Núñez Sepúlveda, C.L. (2015). *Cálculo de indicadores de calidad de servicio para el sistema de transporte público de Santiago a partir de datos pasivos* (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Transporte). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Osuna, E. y Newell, G. (1972). Control strategies for an idealized public transportation system. *Transportation Science*, 6(1), 52-72.

- Peek, G. J. y Van Hagen, M. (2002). Creating synergy in and around stations: Three strategies for adding value. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1793, 1-6.
- Strathman, J. G. y Hopper, J. R. (1993). Empirical analysis of bus transit on-time performance. *Transportation Research A*, 27(2), 93-100.
- Strathman, J. G., Dueker, K. y Kimpel, T. (1999). Automated bus dispatching, operations control, and service reliability: Baseline analysis. *Transportation Research Record*, 1666, 28-36.
- Strathman, J. G., Kimpel, T., Dueker, K., Gerhart, R. L. y Callas, S. (2001). Bus transit operations control: Review and an experiment involving tri-met's automated bus dispatching system. *Journal of Public Transportation*, 4, 1-26.
- Strathman, J. G. y Kimpel, T. J. (2003). Headway deviation effects on bus passenger loads: Analysis of tri-met's archived AVL-APC data. Technical report, Portland State University Center for Urban Studies, No. PR126.
- Tabachnick, B. G. y Fidell, L. S. (2012). *Using multivariate statistics, 6th edition*. Boston: Pearson.
- Vela, F. (2010). Normalidad de los errores. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D. F.

# Anexo A

## Modelos

### A.1. Primera estimación de modelo con STD, periodo 5.30 a 6.29 horas

Modelo preliminar estimado a partir de la técnica de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), para el periodo de Transición Nocturna.

<b>Variables</b>	<b>Indicador STD Coeficientes (t-stat)</b>
Frecuencia programada	<b>-0,189 (-8,44)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	-
Demanda media por bus, expedición de retorno	0,006 (1,4)
Inversiones Alsacia	0,032 (0,1)
Subus Chile	<b>1,077 (4,07)</b>
Buses Vule	-0,166 (-0,67)
Express de Santiago	<b>0,559 (2,09)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,782 (-2,81)</b>
Redbus Urbano	-0,006 (-,02)
Punto de control de regularidad ubicado en el cabezal	0,057 (0,27)
Cabezal ubicado al interior del depósito	-0,12 (-0,83)
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	-
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,037 (2,37)</b>
Constante	<b>4,557 (13,62)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,215
Error	1,368
Durbin-Watson	2,02

## A.2. Primera estimación de modelo con STD, periodo 6.30 a 8.29 horas

Modelo preliminar estimado a partir de la técnica de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), para el periodo Punta Mañana.

<b>Variables</b>	<b>Indicador STD</b> Coeficientes (t-stat)
Frecuencia programada	<b>-0,244 (-13,56)</b>
Velocidad comercial, expedición de retorno	<b>-0,035 (-2,05)</b>
Demanda media por bus, expedición de retorno	-
Largo de la ruta, expedición de retorno	<b>0,042 (5,01)</b>
Inversiones Alsacia	0,38 (1,27)
Subus Chile	0,317 (1,22)
Buses Vule	<b>-0,549 (-2,3)</b>
Express de Santiago	<b>0,998 (3,8)</b>
Buses Metropolitana (Metbus)	<b>-0,853 (-3,07)</b>
Redbus Urbano	0,37 (1,47)
Punto de control de regularidad ubicado en el cabezal	<b>0,366 (2,01)</b>
Cabezal ubicado al interior del depósito	<b>-0,431 (-3,18)</b>
Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	-0,043 (-1,54)
Número de servicios-sentido por cabezal	<b>0,059 (3,82)</b>
Constante	<b>5,964 (14,48)</b>
R-cuadrado Ajustado	0,311
Error	1,504
Durbin-Watson	1,74