

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

Javiera Godachevich¹, Alejandro Tirachini
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Email: javiera.godachevich@mop.gov.cl, alejandro.tirachini@ing.uchile.cl

RESUMEN

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 apilotonamiento de buses en ruta. Este trabajo tiene como finalidad determinar los factores que inciden en la regularidad de los despachos, a partir de estimaciones de modelos de regresión multivariada. Para ello, se utilizan datos de la operación de Transantiago. Se encuentran variables estadísticamente significativas en explicar la irregularidad entre intervalos, se analizan los efectos en la operación y diseño de líneas de buses.

Palabras clave: regularidad, despacho de buses, calidad de servicio, Transantiago

Bus headway variability at dispatching is a very relevant issue that has not been properly analysed in the existing literature, despite the large influence of irregular dispatching on bus bunching on-route. In this paper, we obtain the variables that are statistically significant in explaining bus headway variability at the beginning of the routes, using multivariate linear regression. To this end, we use large databases of the Transantiago public transport system. Once relevant variables are obtained, we analyse effects for the design and operation of the public transport network.

Keywords: reliability, bus dispatching, quality of service, Transantiago

¹ Actualmente en el Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile

1. INTRODUCCIÓN

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 en las ciudades chilenas. En comparación al automóvil particular, su uso debe ser incentivado ya que el transporte público permite aprovechar de mejor forma el espacio vial, es menos costoso para un alto volumen de pasajeros y ambientalmente es más eficiente, dada su menor emisión de contaminantes locales por pasajero-kilómetro, al menos en periodos punta.

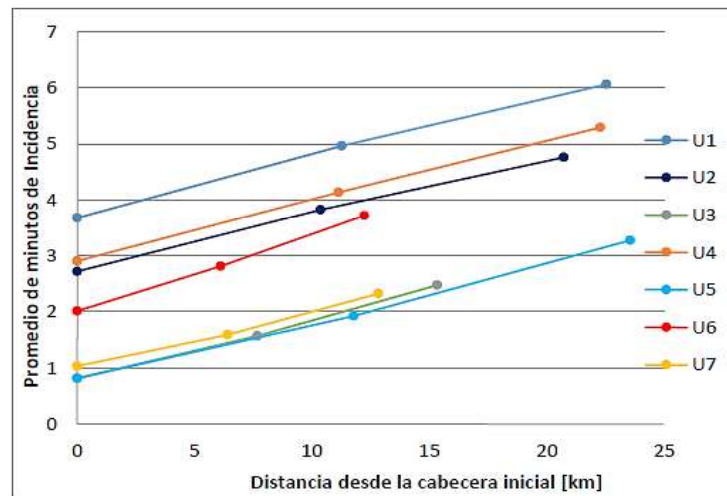
Los servicios de buses muchas veces se ven afectados por diversos fenómenos que deterioran la operación del sistema y con ello, la experiencia de viaje del usuario. Uno de éstos es la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos, la cual tiende a juntar vehículos de un mismo servicio (efecto conocido como apelsonamiento). Producto de ello, se afecta la confiabilidad y aumenta 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 apelsonamiento de buses, se pueden destacar: 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 (Figliozzi yFeng, 2012; Moreira-Matias et al., 2012; Arriagada, 2016). Una de las variables que más contribuye a aumentar el apelsonamiento en ruta es la irregularidad en el despacho de buses desde el cabezal (Hammerle et al., 2005; Moreira-Matias et al., 2012; Arriagada, 2016; Danes, 2016).

Cham (2006) identifica a la variabilidad de los intervalos en los terminales como una de las principales fuentes de servicios poco confiables. De acuerdo a lo planteado, las causas de esta desviación del intervalo respecto al programa son una combinación de una pobre supervisión en el terminal y del comportamiento del conductor, 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, se señala el incremento de las subidas en paraderos aguas abajo y el aumento en los tiempos de detención, lo cual incrementa el tiempo de viaje. A su vez, 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.

Por otro lado, 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 en ruta, expone la relación existente entre la variabilidad de los intervalos y la distancia recorrida desde el cabezal de inicio del servicio, para las siete empresas que operan en la ciudad (ver Figura 1).

Figura 1: Variabilidad de los intervalos en los operadores de Transantiago, medido a partir de los minutos de incidencia. Fuente: (García, 2016)



El análisis muestra que las significativas diferencias en variabilidad de intervalos que se observan entre las empresas operadoras (medidas por los “minutos de incidencia”, indicador de variabilidad a lo largo de la ruta definido en las ecuaciones 8 y 9), están dadas por la mayor o menor regularidad en el despacho desde el cabezal inicial, ya que una vez en ruta, el aumento de la variabilidad de intervalos sigue aproximadamente el mismo patrón para los siete operadores (García, 2016). Es decir, se muestra que la regularidad en el despacho es crucial para el problema del apelonamiento de buses. No obstante, si bien existen modelos que explican la variabilidad de intervalos en ruta para Santiago (Arriagada, 2016; Danes, 2016), en la literatura no se ha explicado con modelos estadísticos cuáles son los factores que causan variabilidad en los intervalos de tiempo al inicio de la ruta, a pesar de la relevancia de este problema.

La principal contribución de esta investigación es la determinación de las variables que explican la irregularidad observada en los despachos de buses. Para ello se desarrollan y estiman modelos de regresión lineal múltiple, usando datos de la operación del sistema de transporte público, 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.

La estructura del trabajo considera en primer lugar la metodología realizada para recopilar y generar los datos que se utilizan en la modelación. Luego, en la Sección 3 se detallan las variables explicativas e indicadores de variabilidad incorporados en este estudio. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos de la modelación y el análisis respectivo de cada parámetro estimado, lo cual permite identificar las variables explicativas estadísticamente significativas. Por último, se exponen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del trabajo, implicancias para política pública y recomendaciones de trabajos futuros.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

En esta investigación se usan datos de la operación del sistema de transporte público de Santiago, en la semana laboral que inició el lunes 14 de Marzo de 2016 y finalizó el viernes 18 de Marzo

del mismo año. Éstos fueron obtenidos a partir de los dispositivos GPS ubicados en los vehículos de Transantiago y las transacciones de pago realizadas por los usuarios mediante la tarjeta inteligente. Ambos sistemas en conjunto permiten conocer 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 la expedición o bien, el perfil de carga del servicio.

El presente trabajo está enfocado en estudiar la variabilidad de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos al inicio de la ruta, para dos periodos de operación. El *Periodo 1-Transición Nocturna* comprende entre las 5:30 y las 6:29 horas, y se caracteriza por el inicio de la operación diaria de la mayoría de los servicios-sentido del sistema. Por otro lado, el *Periodo 2-Punta Mañana* comprende entre las 6:30 y las 8:29 horas, se caracteriza por una mayor demanda y congestión vehicular que el periodo anterior.

Para cada servicio-sentido del sistema se determinan intervalos de tiempo entre buses consecutivos de un mismo recorrido al inicio de la ruta, utilizando los instantes de pasada de los vehículos por el primer paradero de la respectiva ruta, ya que se desconoce el instante exacto del despacho desde el cabezal de inicio. Sin embargo, el primer paradero del servicio se posiciona generalmente próximo al cabezal, e incluso en algunos casos su ubicación coincide.

Se consideró un total de 579 servicios-sentido circulando por la ciudad de Santiago, 17.907 expediciones y 14.900 intervalos entre buses consecutivos que pasan por el primer paradero, para el periodo entre las 5:30 y las 6:29 horas. Por otro lado, para el periodo Punta Mañana (6:30 a 8:29 horas) se dispuso finalmente de 679 servicios-sentido, 48.203 expediciones y 44.476 intervalos.

El tiempo de viaje (t_{ik}) de la expedición k del servicio-sentido i , con $k \in \{1, \dots, n_i\}$, fue calculado a partir de la hora de inicio y hora de término respectiva, donde ambos datos son proporcionados gracias a los dispositivos GPS en buses. Respecto de la velocidad comercial (V_i) del servicio-sentido i , expresada en la ecuación (1), se requiere conocer el largo de la ruta recorrida (l_i), el total de expediciones realizadas (n_i) por el servicio-sentido i en el periodo estudiado y el tiempo de viaje de cada expedición (t_{ik}).

$$V_i = \frac{l_i}{\sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{t_{ij}}{n_i} \right)} = \frac{n_i \cdot l_i}{\sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}} \quad (1)$$

El único 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 reconocer el lugar, día, hora y bus donde se hizo la validación. El cruce de datos entre el posicionamiento GPS del bus y la transacción realizada por el usuario al pagar su viaje, entrega información sobre el número de subidas de pasajeros al vehículo en cualquiera de los paraderos correspondientes a la ruta.

La demanda media por bus para el servicio-sentido i (DM_i) se obtiene a partir de la ecuación (2), la cual depende del total de subidas registradas al servicio (Sub_i), la duración t de la recolección de datos (una hora para el periodo 1 y dos horas para el periodo 2) y la frecuencia programada

(f_{prog}). Se ha establecido como valor mínimo 5 [pax/bus] y como máximo 150 [pax/bus]. Se debe tener en consideración que los datos de subidas de pasajeros por paradero no han sido corregidos por evasión al pago del pasaje, la cual en Transantiago alcanza actualmente cerca de un 30%.

$$DM_i = \frac{\text{Sub}_i}{t \cdot f_{\text{prog}}} \quad (2)$$

Los cabezales y depósitos son elementos importantes del sistema a la hora de evaluar el cumplimiento de los operadores en el inicio de la ruta. En particular, antecedentes como ubicación geográfica de cabezales, puntos de regulación, primeros paraderos y depósitos fueron recopilados.

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 término respectivamente a la ruta. El cabezal puede estar ubicado en un espacio físico, como en un terminal de buses o en su depósito asignado, sin embargo, se encuentran mayormente en la vía pública a metros del primer paradero del servicio. En lo que respecta a la infraestructura, cada operador dispone de depósitos que están ubicados estratégicamente de acuerdo a los recorridos, 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. Se debe señalar que la asignación de servicios a depósitos no se conoce con exactitud, razón por la cual se complementó la información con catastros previos realizados tanto por el regulador como por los operadores del sistema. A su vez, se buscó minimizar 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”).

Un elemento de interés por conocer es la distancia recorrida entre el depósito y el primer paradero del recorrido, obtenida mediante el software Google Earth. Se localiza el depósito y el primer paradero respectivo, y se determina la distancia de la más probable ruta entre tales puntos. Otras características operacionales de los servicios del sistema, como lo son la frecuencia de buses programada y el largo de ruta, fueron obtenidas a partir de la información histórica del plan operacional del primer semestre de 2016, dispuesta por el regulador de Transantiago, el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM, 2016).

3. 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 (3). En ella, Y representa a la variable explicada, X_i las variables explicativas, A corresponde al intercepto, B_i son los coeficientes de regresión asociados a cada variable explicativa y ϵ es un error aleatorio.

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_kX_k + \epsilon \quad (3)$$

3.1. Variables Explicadas

En este trabajo, para efectos de modelación se han seleccionado como variables dependientes los siguientes indicadores que tienen como finalidad representar la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, específicamente cuando los buses son despachados desde el cabezal respectivo.

- *Desviación estándar de los intervalos de tiempo observados entre buses consecutivos de un mismo servicio-sentido al pasar por el primer paradero asignado*, denotado como $STD(h_{obs})$. Se caracteriza por ser una medida simétrica de variabilidad que es simple de obtener.

$$STD(h_{obs}) = STD\left(\frac{1}{f_{obs}}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (h_{obsj} - \overline{h_{obs}})^2}{N}} \quad (4)$$

- *Coefficiente de variación de los intervalos de tiempo observados entre buses consecutivos de un mismo servicio-sentido al pasar por el primer paradero asignado*, denotado como $CV(h_{obs})$. Es un indicador de variabilidad comúnmente utilizado en la literatura.

$$CV(h_{obs}) = \frac{STD(h_{obs})}{\overline{h_{obs}}} = STD(h_{obs}) \cdot \overline{f_{obs}} \quad (5)$$

- *Índice por observación*, denotado como IPO, corresponde a un indicador continuo de tipo estadístico basado en la relación entre el tiempo de espera observado por los pasajeros y el tiempo de espera promedio. Se caracteriza por capturar casos de variabilidad de intervalos menos notorios. Depende del intervalo observado entre buses (h_{obs}), del intervalo programado entre buses (h_{prog}) y del número de observaciones realizadas (N) (Arriagada, 2016).

$$IPO = \frac{\sum_{j=1}^N \left(\frac{h_{obsj}}{h_{prog}}\right)^2}{N} \quad (6)$$

El indicador IPO está relacionado directamente con el coeficiente de variación (CV) de los intervalos observados, mediante la ecuación (7). Notar que este indicador alcanza su mínimo valor igual a uno cuando no existe variabilidad en los intervalos (Arriagada, 2016).

$$IPO = CV^2 + 1 \quad (7)$$

- *Minutos de incidencia*, denotado por Minc, corresponde a la medida de variabilidad usada por el regulador de Transantiago. Se define como la suma de los excesos entre los intervalos observados (h_{obs}) y el tiempo aceptable establecido para el periodo respectivo (TA) (MTT, 2012). Lo anterior es descrito en las ecuaciones (8) y (9).

$$Minc_i = \text{Max}\{0; h_{obs_i} - TA_i\} \quad (8)$$

$$TA_i = h_{prog_i} + Hol_i = h_{prog_i} + \text{Max}\{3; \text{Min}\left\{\left(0,4 \cdot h_{prog_i}\right); 10\right\}\} \quad (9)$$

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

Tabla 1: Coeficientes transformación Box-Cox

Periodos estudiados	Coefficiente
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 denotado en adelante como Reg_IPO, queda finalmente definido como se muestra en la ecuación (10) para el periodo de 5:30 a 6:29 horas y en la ecuación (11) entre las 6:30 y 8:29 horas donde, en este caso, el máximo valor que podrá alcanzar será uno y corresponde al caso de regularidad de intervalos perfecta.

$$\text{Reg_IPO}_1 = \frac{1}{\text{IPO}^{3,32}} \quad (10)$$

$$\text{Reg_IPO}_2 = \frac{1}{\text{IPO}^2} \quad (11)$$

En la Tabla 2 se exponen estadísticos descriptivos de los indicadores de regularidad medidos al inicio de la ruta, para ambos casos abordados.

Tabla 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			

Cabe señalar que los indicadores STD, CV y Reg_IPO son medidas de variabilidad pura, es decir, reflejan qué tanto difieren entre sí 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 de forma constante el umbral permitido, con lo cual se aumentan sistemáticamente los tiempos de espera de los usuarios con respecto al tiempo de espera programado. Los indicadores de variabilidad pura no logran reflejar tal conflicto. 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 sí.

3.2. 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 aspectos de la operación y del diseño de la red. Éstas son: frecuencia programada, intervalo programado (inverso de la frecuencia), velocidad comercial, demanda media por bus y largo de la ruta. Específicamente, la velocidad comercial tiene la finalidad de representar efectos de congestión e incidentes en la vía, mientras que la demanda media por bus pretende reflejar la carga de pasajeros y tiempos de detención en paradero. 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.

Respecto del segundo grupo de variables que representan el desempeño de la empresa operadora y su nivel de cumplimiento de regularidad en el inicio de un respectivo servicio-sentido, se consideraron siete variables binarias, una por cada empresa perteneciente a Transantiago (Alsacia, Subus, Vule, Express, Metbus, Redbus y STP), las cuales valen uno si el servicio-sentido i está a cargo de la respectiva unidad de negocios j , y cero en caso contrario, tal como se observa en la ecuación (12), donde j toma valores entre 1 y 6. 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. Por lo tanto, los coeficientes beta que acompañan a estas variables dummy serán interpretados como la diferencia entre la regularidad ofrecida al inicio de la ruta por STP y por el operador respectivo.

$$\delta_j = \begin{cases} 1 & \text{si el servicio es operado por la empresa } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (12)$$

El último grupo de variables explicativas tiene como finalidad recoger efectos de la operación realizada específicamente en los puntos donde se inician los servicios y caracterizar la infraestructura disponible en los sitios donde esto ocurre. Para comprender el fenómeno estudiado, se debe notar que cada día, generalmente horas previas a que inicien los periodos punta, los buses son sacados desde los depósitos y posicionados en los respectivos cabezales. Una vez allí, los buses son despachados y dirigidos hacia el primer paradero del servicio-sentido. No obstante, existen servicios-sentido que cuentan con sus 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 otro lado, tal como se mencionó anteriormente, en el caso de Transantiago se definen a lo largo de la ruta ciertos puntos donde se controla la regularidad del intervalo programado. Generalmente el primero de ellos se ubica en el cabezal, no obstante, esto no se cumple para todos los servicios-sentido, ya que el punto de control inicial podría llegar a ubicarse incluso 900 metros aguas abajo del cabezal. Luego, la regulación realizada al inicio de la ruta queda representada por una variable binaria, la cual toma 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 (13).

$$\delta_{\text{reg}} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto de control de regularidad se ubica en el cabezal} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (13)$$

La presencia del cabezal en un lugar físico como el depósito se representa a través de una variable tipo dummy, la cual toma valor uno en aquellos casos donde el punto de inicio del servicio-sentido se ubica al interior del depósito y cero en caso contrario.

$$\delta_{\text{cab}} = \begin{cases} 1 & \text{si el cabezal se ubica al interior del depósito} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (14)$$

El trayecto recorrido desde el depósito al cabezal puede verse impactado por 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). Esta situación puede originar que el bus se retrase en su arribo al cabezal, afectando la planificación horaria y con ello, el cumplimiento de salidas programadas. En particular, mientras mayor sea el trayecto que recorra el bus entre el sitio y el cabezal, mayor es la probabilidad de que el vehículo se vea impactado por agentes externos y con ello, la espera del usuario en el primer paradero aumente. La variable distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero de un cierto servicio-sentido busca capturar tales efectos que condicionan la regularidad de los intervalos al inicio de la ruta.

Con respecto a la infraestructura de los sitios donde se inicia la operación, ésta será representada con la variable explicativa número de servicios-sentido por cabezal, la cual busca capturar efectos de tamaño y capacidad. Se espera que mientras mayor sea el número de servicios que comparten un cabezal, sobre todo si éste se ubica en la vía pública, más difícil resulte cumplir con la programación de despachos. A su vez, el tiempo de permanencia del bus en el punto de inicio de la ruta se ve influenciado por la existencia de congestión en la zona, por el número de sitios disponibles para detención del vehículo, por conflictos con los residentes del sector, entre otros.

Tabla 3: Estadísticos descriptivos variables explicativas

Variables explicativas	Unidad	Periodo 1: 5.30 a 6.29 horas				Periodo 2: 6.30 a 8.29 horas			
		Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media	N
Frecuencia programada	[buses/h]	1	25	6,1	579	1,5	25	7,7	679
Intervalo programado	[min]	2,4	60	12,3	579	2,4	40	9,4	679
Velocidad comercial	[km/h]	10,2	50,9	23	546	7,7	43,8	16,3	655
Demanda media por bus	[pax/bus]	5	82,1	25,5	458	6	150,6	48,2	638
Largo de ruta	[km]	4	57,3	17,7	549	2,4	57,3	17,2	655
Distancia recorrida depósito-primer paradero	[km]	0	42,2	4,5	579	0	24,6	0,7	679
Nº de servicios por cabezal	[-]	1	18	4,3	579	1	18	4,1	679

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizaron estimaciones de modelos de regresión lineal múltiple utilizando los softwares SPSS y STATA, los cuales permitieron obtener los coeficientes de cada variable incluida, estudiar sus

signos y la significancia estadística. En primer lugar, se verificaron los supuestos de regresión lineal múltiple para garantizar la validez de los modelos planteados (para detalles ver Godachevich, 2017).

En las estimaciones que incluyen como variable dependiente al coeficiente de variación (CV) o al índice por observación modificado (Reg_IPO), se utilizó la técnica de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) dado que todas las condiciones se cumplen. Por otro lado, en modelos que consideran como medida de variabilidad a la desviación estándar (STD) o a los minutos de incidencia (Minc), se efectuó una regresión lineal robusta para evitar fuentes de heteroscedasticidad y correlación de los errores, problema que fue detectado en estimaciones iniciales (Godachevich,2017). Respecto de la significancia individual de las variables, ésta fue determinada mediante el estadístico t de Student y el p-valor de la prueba, considerando un nivel de confianza del 95%.

En la Tabla 4 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. A su vez, en la Tabla 5 se exponen los resultados correspondientes al periodo comprendido entre las 6:30 y las 8:29 horas. En negrilla se muestran las variables que han resultado significativas estadísticamente, mientras que las celdas vacías representan a las variables que no fueron incorporadas en los modelos.

Tabla 4: Estimación final de modelos, periodo 1

Variables	Coeficientes (t-stat)					
	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD	Indicador Minc
	Modelo 1.1	Modelo 2.1	Modelo 3.1	Modelo 4.1	Modelo 5.1	Modelo 6.1
Frecuencia programada	0,019 (9,74)	0,017 (7,69)	-0,022 (-9,43)	-0,02 (-7,63)	-0,191 (-9,54)	
Intervalo programado						-0,017 (-5,08)
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,001 (-1,23)		0,002 (1,17)			-0,007 (-2,04)
Demanda media por bus, expedición de retorno		0,001 (2,73)		-0,001 (-2,73)	0,007 (1,53)	
Inversiones Alsacia						0,278 (1,55)
Subus Chile	0,149 (8,06)	0,158 (8,61)	-0,175 (-7,88)	-0,184 (-8,3)	1,155 (5,04)	0,272 (3,59)
Express de Santiago	0,088 (4,8)	0,105 (5,51)	-0,112 (-5,07)	-0,138 (-6,21)	0,623 (3,28)	0,211 (2,58)
Buses Metropolitana (Metbus)	-0,049 (-2,56)	-0,065 (-3,23)	0,06 (2,59)	0,097 (2,94)	-0,746 (-3,93)	
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	0,003 (2,88)	0,002 (1,58)	-0,004 (-2,47)			
Número de servicios-sentido por cabezal	0,007 (5,23)	0,008 (5,23)	-0,009 (-5,33)	-0,01 (-5,43)	0,035 (2,54)	
Constante	0,252 (7,9)	0,207 (10,56)	0,794 (20,66)	0,829 (37,38)	4,516 (23,3)	0,612 (5,45)
R-cuadrado Ajustado	0,381	0,385	0,374	0,382	0,22	0,045
Error	0,135	0,134	0,163	0,161	1,363	0,732

Tabla 5: Estimación final de modelos, periodo 2

Variables	Coeficientes (t-stat)					
	Indicador CV		Indicador Reg_IPO		Indicador STD	Indicador Minc
	Modelo 1.2	Modelo 2.2	Modelo 3.2	Modelo 4.2	Modelo 5.2	Modelo 6.2
Frecuencia programada	0,022 (13,34)	0,022 (13,11)	-0,02 (-13,34)	-0,019 (-13,1)	-0,243 (-11,4)	-0,028 (-3,75)
Velocidad comercial, expedición de retorno	-0,003 (-2,05)		0,003 (2,03)		-0,035 (-1,84)	-0,017 (-2,06)
Demanda media por bus, expedición de retorno	0,001 (4,15)		-0,001 (-4,19)			
Largo de la ruta, expedición de retorno	0,003 (3,73)	-	-0,003 (-3,68)		0,046 (3,83)	0,016 (3,48)
Inversiones Alsacia	0,038 (1,68)	0,03 (1,33)	-0,038 (-1,86)	-0,03 (-1,51)		0,213 (2,23)
Subus Chile	0,065 (3,5)	0,069 (3,92)	-0,056 (-3,38)	-0,06 (-3,79)		
Buses Vule	-0,056 (-3,51)	-0,059 (-3,69)	0,053 (3,7)	0,056 (3,85)	-0,81 (-5,89)	-0,344 (-5,46)
Express de Santiago	0,086 (4,59)	0,091 (5,08)	-0,083 (-4,94)	-0,088 (-5,43)	0,681 (3,3)	0,443 (3,61)
Buses Metropolitana (Metbus)	-0,068 (-3,29)	-0,074 (-3,5)	0,062 (3,3)	0,068 (3,57)	-1,129 (-5,63)	-0,412 (-5,37)
Redbus Urbano						0,123 (1,49)
Punto de regulación ubicado en el cabezal					0,348 (2,36)	0,199 (3,0)
Cabezal ubicado al interior del depósito	-0,06 (-4,83)	-0,055 (-4,53)	0,058 (5,19)	0,053 (4,88)	-0,455 (-3,54)	-0,092 (-1,56)
Número de servicios-sentido por cabezal	0,008 (5,5)	0,007 (5,17)	-0,007 (-5,65)	-0,007 (-5,31)	0,055 (4,37)	0,022 (3,35)
Constante	0,348 (11,84)	0,311 (17,75)	0,78 (29,5)	0,815 (51,45)	6,206 (15,27)	0,822 (4,65)
R-cuadrado Ajustado	0,405	0,398	0,411	0,405	0,311	0,191
Error	0,139	0,138	0,125	0,124	1,505	0,663
Durbin-Watson	1,73	1,75	1,74	1,75	1,71	1,73

4.1. 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 3.

4.1.1. 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, ya que el indicador CV puede ser expresado como la multiplicación entre la desviación estándar de los intervalos reales y la frecuencia media observada (ver ecuación (5)), donde ésta última se relaciona directamente con la frecuencia programada. 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 debe a que el indicador STD descrito en la ecuación (4) presenta una relación directa con el intervalo observado.

Con respecto a las variables restantes, 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 variables 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.

4.1.2. 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.

De igual forma, 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 las Tablas 6 y 7 se resumen los resultados capturados por la modelación con CV, STD, Reg_IPO y Minc, 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 durante los periodos estudiados. Las empresas son agrupadas en tres categorías: peor, similar o mejor desempeño que STP.

Respecto del indicador Minc, se debe notar que solo se han considerado los resultados entregados por el modelo 6.2 correspondiente al periodo 6:30-8:29 horas, ya que el valor del R^2 ajustado del modelo 6.1 es bajo, por lo que se deduce que ese conjunto de variables independientes no permite explicar satisfactoriamente la varianza en los minutos de incidencia para el periodo 5:30 a 6:29 horas. En este caso, según se señala en la Tabla 7, Inversiones Alsacia y Express de Santiago fueron las empresas con peor desempeño al inicio de la ruta durante el periodo 2, mientras que Metbus y Buses Vule logran un mayor cumplimiento del programa en cabezales, situación que concuerda con lo mostrado en la Figura 1.

Tabla 6: Desempeño de operadores, indicadores CV, STD y Reg_IPO

Desempeño con respecto a STP	Periodo 1: 5:30 a 6:29 horas	Periodo 2: 6:30 a 8:29 horas
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

Tabla 7: Desempeño de operadores, indicador minutos de incidencia

Desempeño con respecto a STP	Periodo 2: 6:30 a 8:29 horas
Peor	Express de Santiago
	Inversiones Alsacia
Similar	Subus Chile
	Redbus Urbano
Mejor	Metbus
	Buses Vule

4.1.3. Operación e infraestructura de cabezales y depósitos

El número de servicios-sentido por cabezal es la única variable estadísticamente significativa en cada uno de los modelos finales estimados, 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 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 incorpora en las estimaciones de la Tabla 5. 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. Esta situación puede verse acentuada si se evidencian constantes atrasos por parte de los conductores. Por otro lado, entre las 6:30 y las 8:29 horas solo un tercio de los recorridos deben retornar al depósito (Godachevich, 2017). 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 no alcanza a tener significancia estadística al 95% de confianza ($t=1,56$; $p\text{-valor}=0,119$). 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.

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. En ellos, los signos de los coeficientes obtenidos son contra intuitivos, 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.

Finalmente, con el objetivo de valorar la importancia relativa de cada variable explicativa, se utilizaron los coeficientes de regresión estandarizados, los cuales permiten efectuar comparaciones entre ellos (ver detalles en Godachevich, 2017). A modo de resumen, en la Tabla 8 se exponen 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.

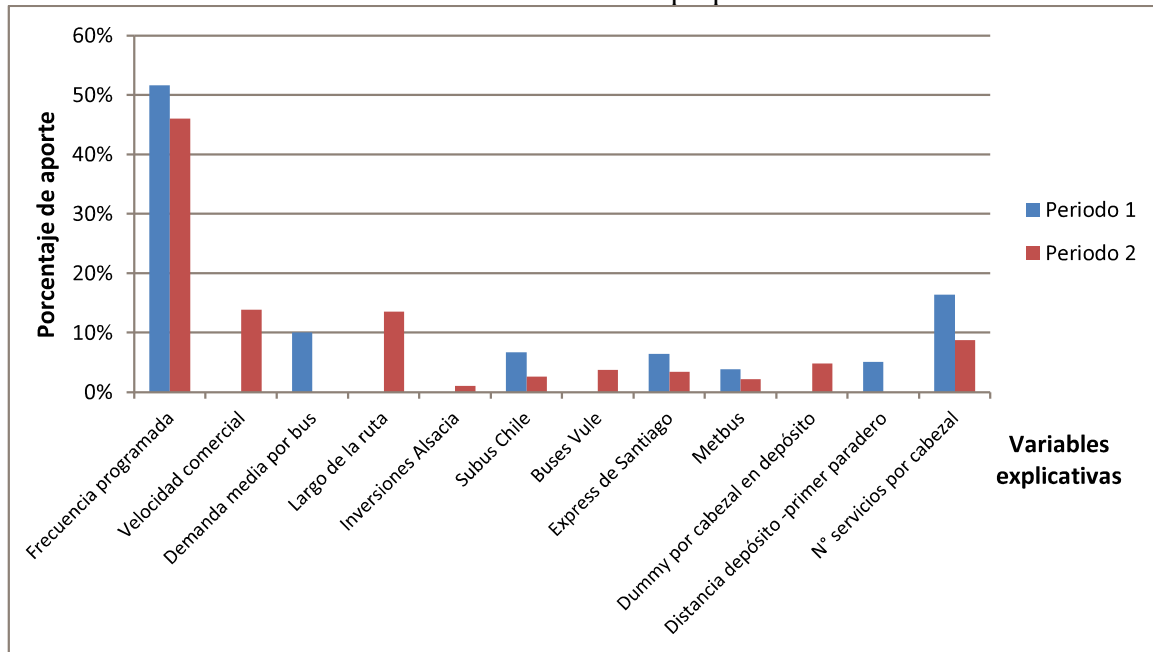
Tabla 8: Variables significativas por periodo, orden descendiente de importancia

Categoría	Periodo 1: 5:30 a 6:29 horas	Periodo 2: 6:30 a 8:29 horas
Operación y diseño de la red	Frecuencia programada Demanda media por bus, expedición de retorno	Frecuencia programada 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 Metbus	Express de Santiago Buses Vule Subus Chile Metbus Inversiones Alsacia
Operación e infraestructura de cabezales y depósitos	Número de servicios-sentido por cabezal Distancia recorrida desde el depósito hasta el primer paradero del servicio	Número de servicios-sentido por cabezal Cabezal ubicado al interior del depósito

A su vez, se ha determinado para todo servicio-sentido, en ambos periodos estudiados, el efecto de cada variable explicativa identificada sobre la irregularidad de los despachos. Luego, se

obtuvo un valor promedio entre los servicios considerados, el cual es presentado en la siguiente figura que ilustra el efecto porcentual de cada atributo sobre la variabilidad de los intervalos al inicio de la ruta, representada mediante el indicador CV.

Figura 2: Efecto porcentual de cada variable explicativa sobre la irregularidad en el despacho.
Fuente: Elaboración propia.



5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudian factores que inciden en la regularidad de los despachos de buses desde el cabezal de inicio, para la ciudad de Santiago de Chile, a partir de la técnica de regresión lineal múltiple. Para ello, se utilizan cuatro medidas de variabilidad de intervalos: coeficiente de variación, desviación estándar, índice por observación modificado, al cual se le aplicó una transformación de Box-Cox con la finalidad de normalizar su distribución de probabilidad, y minutos de incidencia. 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 (Transición Nocturna), 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 (Punta Mañana), 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.

El trabajo desarrollado permite 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. En particular, se sugiere poner énfasis en la ubicación de los depósitos y en la infraestructura de los cabezales. Es deseable que los puntos donde se inicia la operación se posicionen en los mismos depósitos 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.

Por otro lado, si 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 inicien o finalicen 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. Los beneficios obtenidos a partir de esta proposición deben ser contrarrestados con los costos asociados para evaluar su factibilidad. 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.

Se encontró que el largo de las rutas y la velocidad comercial son variables significativas en explicar la variabilidad en los intervalos iniciales en el período Punta Mañana, lo que indica que es más difícil mantener la regularidad en rutas más largas y congestionadas, trasladando esa complicación a los siguientes despachos. Esto tiene implicancias en la determinación de largos de rutas, beneficios de tener infraestructura dedicada para buses (pistas solo bus, corredores de buses) y en los requerimientos en regularidad de intervalos que se debe hacer a los operadores, los que deben tomar en consideración características específicas de las rutas, como las señaladas. La creación de servicios más cortos depende de un análisis costo – beneficio determinado por el patrón de demanda y su distribución espacial, por lo que el operador deberá comparar los beneficios de ofrecer una mayor regularidad al inicio del servicio con los costos asociados al aumento en el tiempo de espera y número de trasbordo.

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. Dadas las limitaciones que poseen las variables dependientes consideradas en este trabajo, una línea de investigación futura que se propone es definir y probar en los modelos un indicador que cumpla con dos condiciones simultáneas: Capaz de representar varianza de los intervalos y de tomar en cuenta la existencia de un programa de despachos, el cual establezca umbrales mínimos y máximos para el tiempo entre buses consecutivos.

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 sugerencias metodológicas para futuras investigaciones. Se sugiere probar los modelos utilizando datos de otros periodos del día, como por ejemplo de la Punta Tarde o las horas previas a la Punta Tarde. También se plantea como alternativa mantener los periodos estudiados pero usar los datos correspondientes a otras semanas laborales. Por último, se propone estudiar los efectos de la irregularidad en el despacho en fines de semana, dado que los días no laborales presentan una menor congestión y demanda, por lo cual el desempeño del operador al inicio del servicio podría resultar más significativo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el proyecto Fondecyt “Social effects and quality of service valuation of public transport services” (11130227) y el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (CONICYT FBO816). Los autores agradecen al Directorio de Transporte Público Metropolitano por la disponibilidad de los datos para esta investigación, a través de un convenio de colaboración con la Universidad de Chile. Los autores agradecen a Diego García por información provista sobre la caracterización de cabezales de servicios del sistema Transantiago.

REFERENCIAS

Arriagada, J. (2016). **Modelamiento del fenómeno apelonamiento de buses**. Tesis de Magister en Gestión de Operaciones, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.

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.

Danes, C. (2016). **¿De qué factores depende la evolución de la regularidad de los intervalos de un servicio de buses? Caso Transantiago**. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile.

Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM). (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>.

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.

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 areas. 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 Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile.

Godachevich, J. (2017). **Modelación de variables que afectan la regularidad en el despacho de buses**. Memoria de Título de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 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.

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT). (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*. Springer Berlin Heidelberg. pp. 77-91.

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.