



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

MODELAMIENTO DEL FENÓMENO APELOTONAMIENTO DE BUSES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

JACQUELINE GRACE ARRIAGADA FERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE
FERNANDO ORDOÑEZ PIZARRO
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ
MARTIN TRÉPANIER

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL Y AL GRADO DE MAGÍSTER EN GES-
TIÓN DE OPERACIONES
POR: JACQUELINE GRACE ARRIAGADA FERNÁNDEZ
FECHA: 2016
PROF. GUÍA: SRA. MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

MODELAMIENTO DEL FENÓMENO APELTONAMIENTO DE BUSES

El apelotonamiento de Buses (caso extremo de irregularidad de intervalo entre buses consecutivos) es un fenómeno conocido y relevante para operadores, usuarios y reguladores de servicios de buses de alta frecuencia. El efecto de este fenómeno es tal que los buses tienden a agruparse en dos o más, lo cual afecta la calidad del servicio y la eficiencia operacional. En este trabajo se describe el fenómeno apelotonamiento de buses mediante un indicador de tipo continuo y otro de tipo discreto. Usando datos disponibles de la operación del sistema de transporte público, en específico del sistema de localización automática de vehículos (AVL por sus siglas en inglés) y del sistema de cobro automático de tarifa (AFC por sus siglas en inglés) de la ciudad de Santiago (Chile) y Gatineau (Canadá), se construyeron mapas de apelotonamiento de buses y se calibraron modelos de regresión lineal para explicar el fenómeno.

Se aplicó una transformación de Box-Cox a los indicadores continuo y discreto para obtener variables con distribución de probabilidad normal y así generar estimaciones más certeras de los modelos, dicha transformación es una función inversa de los indicadores, por lo que las variables dependientes miden la regularidad de los buses. Luego se desarrollaron dos tipos de modelos: uno con el indicador continuo transformado y otro con el indicador discreto transformado como variable dependiente.

Las variables independientes corresponden a los factores que han sido detectados como aquellos que incrementan o disminuyen la intensidad del apelotonamiento de buses. Estos factores se pueden agrupar en los que están relacionados a semáforos, infraestructura de la vía, operación de los buses y entorno de los buses. El resultado de estimaciones de los modelos permite concluir que los factores que aumentan la irregularidad de los intervalos entre buses son: el largo de la ruta, frecuencia programada alta, despacho irregular de buses, flota no homogénea (combinación de buses articulados y no articulados), alta demanda y variabilidad de ésta, buses desviados, demora uniforme vehicular en semáforos, intersecciones con bloqueo de tráfico, distancia entre paraderos alta, vía con vehículos estacionados. Por otro lado aquellos factores que resultaron disminuir el apelotonamiento de buses son: presencia de vía exclusiva, presencia de corredor segregado, actividad (detenerse o no detenerse) homogénea entre buses consecutivos y coordinación de semáforos.

Luego de obtener resultados coherentes con los registrados en la literatura se puede decir que los indicadores utilizados en este trabajo permiten medir el problema de apelotonamiento de buses en diferentes sistemas de transporte público y además los sistemas de tecnología AVL y AFC permiten la utilización de un gran volumen de datos a bajo costo para el estudio de la regularidad de buses.

Dedicado a mis padres

Agradecimientos

Quiero agradecer a las dos personas que hicieron posible este logro: mis padres. Ellos me enseñaron la constancia, la fortaleza y el esfuerzo por sobre todas las cosas. Gracias mamá por entender, apoyar y motivar cada idea y paso que he dado a lo largo de mi vida. Gracias papá por estar siempre presente en todos los procesos de vida por los que he pasado, siempre motivándome. Con ustedes a mi lado siento seguridad, amor y apoyo.

También agradezco a mis tres hermanas (Macarena, Nicole y Catalina) por ser pilares de apoyo y alegría. Gracias Catalina por enseñarme que todo es posible y que se debe luchar por los sueños. Gracias Nicole por enseñarme a ver más allá de los límites y a valorar el esfuerzo. Gracias Macarena por tu contención, lealtad y amor incondicional.

Como no agradecerte Alexis Sierra, eres la persona que llegó a llenar mi vida de alegría, esperanza y amor.

Felipe, muchas gracias por acompañarme en este largo proceso universitario, por contenerme y aconsejarme cada vez que lo necesité. Gracias por los lindos momentos y el amor que me muestras en cada una de tus actitudes.

Por último quiero agradecer a la profesora Marcela por haberme guiado en cada una de las dudas que tuve durante mi trabajo de tesis, por su apoyo en los objetivos que me propuse, principalmente, el intercambio en Montreal y el desarrollo de TranSapp.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Contexto	2
1.2.1. Sistema de transporte público en Santiago	2
1.2.2. Sistema de transporte público en Gatineau	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Irregularidad de buses y consecuencias	4
2.1.1. Irregularidad de buses que operan por frecuencia	5
2.1.2. Irregularidad de buses que operan por itinerario programado	5
2.2. Factores que afectan el apelsonamiento de buses	7
2.3. Soluciones para el apelsonamiento de buses	11
2.4. Medidas de apelsonamiento de buses	11
2.4.1. Indicadores discretos	12
2.4.2. Indicadores continuos	13
2.4.2.1. Indicadores continuos de tipo estadísticos	14
2.4.2.2. Indicadores continuos de tipo percentil extremo	16
2.5. Conclusiones	16
3. Generación y análisis de datos	19
3.1. Caso Santiago	19
3.1.1. Descripción del caso de estudio	19
3.1.2. Generación de datos para los buses	22
3.1.2.1. Expediciones e intervalos de tiempo	22
3.1.2.2. Frecuencia o flujo de buses programado	29
3.1.2.3. Velocidad comercial	29
3.1.2.4. Subidas y bajadas	32
3.1.2.5. Incidentes	34
3.1.2.6. Tipo de bus	35
3.1.2.7. Tiempo de semáforos	35
3.2. Caso Gatineau	36
3.2.1. Descripción del caso de estudio	36
3.2.2. Generación de datos para los buses	40
3.2.2.1. Expediciones e intervalos de tiempo	40
3.2.2.2. Frecuencia o flujo de buses programado	44
3.2.2.3. Subidas y bajadas	44

4. Modelación	48
4.1. Variables dependientes	48
4.2. Variables independientes	55
4.2.1. Variables independientes: semáforos	55
4.2.2. Variables independientes: infraestructura de la vía	57
4.2.3. Variables independientes: operación de los buses	58
4.2.4. Variables independientes: entorno de los buses	60
5. Resultados y análisis	63
5.1. Modelación caso Santiago	63
5.1.1. Modelos para los servicio 506 y 506e	63
5.1.2. Modelos para los servicios 506, 506e y 206	71
5.2. Modelación caso Gatineau	78
5.2.1. Modelos para Rapibus	79
5.3. Análisis de parámetros	82
5.3.1. Semáforos	82
5.3.2. Infraestructura de la vía	82
5.3.3. Operación de los buses	83
5.3.4. Entorno de los buses	84
5.3.5. Importancia relativa de los parámetros	85
6. Conclusiones y recomendaciones	88
6.1. Conclusiones	88
6.2. Recomendaciones prácticas	92
6.3. Recomendaciones metodológicas y trabajo futuro	93
Bibliografía	94
Anexos	96
A. Validaciones por tipo de usuario	97
A.1. Tramo de Rapibus en dirección norte	97
A.2. Tramo de Rapibus en dirección sur	99
B. Modelos	101
B.1. Modelo autoregresivo con servicios 506 y 506e	101
B.2. Primera estimación de modelos con servicios 506 y 506e	101

Índice de Tablas

2.1. Factores que afectan el apelsonamiento de buses	9
2.2. Referencia valores IPO e IPH. Adaptado de Byon <i>et al.</i> (2011).	14
2.3. Cuadro esquemático valores IPO e IPH. Adaptado de Li <i>et al.</i> (2013)	15
2.4. Resumen de indicadores de confiabilidad	18
3.1. Zonas paga	20
3.2. Tramos de los servicios 506 y 506e	21
3.3. Tramos del servicio 206	22
3.4. Tabla cruce_paraderos	22
3.5. Registros y expediciones filtradas	25
3.6. Cortes espacio-temporales filtrados	25
3.7. Registro frecuencias de DTPM	29
3.8. Definición de rango de condición de servicio. Fuente: Cortés <i>et al.</i> (2011)	30
3.9. Número de registros de incidentes entre 15-04-2013 y 19-04-2013	35
3.10. Datos provenientes del sistema AFC en Gatineau	41
3.11. Tramo de expedición 84 e instantes de pasadas por paraderos	41
3.12. Error de la aproximación de distancia recorrida en cada paradero	42
3.13. Registros y expediciones filtradas	42
4.1. Descripción estadística de indicadores y sus transformaciones en caso Santiago	55
4.2. Descripción estadística de indicadores y sus transformaciones en caso Gatineau	55
4.3. Porcentaje de casos indicados por variables independientes de tipo dummy relacionadas a semáforos	57
4.4. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a semáforos del caso Santiago	57
4.5. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a semáforos del caso Gatineau	57
4.6. Porcentaje de casos indicados por variables independientes de tipo dummy relacionadas a infraestructura de la vía	58
4.7. Descripción estadística de la variable independiente de la variable distancia entre paraderos caso Santiago	58
4.8. Descripción estadística de la variable independiente de la variable distancia entre paraderos caso Gatineau	58
4.9. Porcentaje de casos indicados por las variables de distribución de tipo de buses	59
4.10. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la operación de los buses caso Santiago	60

4.11. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la operación de los buses caso Gatineau	60
4.12. Procentaje de casos indicados por la variable congestión	61
4.13. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la demanda en el caso Gatineau	62
4.14. Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la demanda e incidentes en el caso Santiago	62
5.1. Estimación inicial de modelos de servicios 506 y 506e	66
5.2. Estimación final de modelos de servicios 506 y 506e	69
5.3. Modelos autoregresivos de servicios 506 y 506e	71
5.4. Estimación inicial de modelos de servicios 506, 506e y 206	73
5.5. Estimación final de modelos de servicios 506, 506e y 206	75
5.6. Modelos finales modificados de servicios 506, 506e y 206	78
5.7. Estimaciones iniciales de Rapibus	79
5.8. Estimaciones finales de Rapibus	81
5.9. Importancia relativa de factores que afectan el apelonamiento de buses	87

Índice de Ilustraciones

3.1. Ruta servicio 506-506e	20
3.2. Ruta servicio 206	20
3.3. Avenida Manuel Antonio Matta, Santiago, Chile	21
3.4. Gráfico de trayectoria 506	24
3.5. Gráfico de trayectoria 506e	25
3.6. Intervalo promedio 506	27
3.7. Coeficiente de variación 506	27
3.8. Intervalo promedio 506e	27
3.9. Coeficiente de variación 506e	28
3.10. Intervalo promedio 206	28
3.11. Coeficiente de variación 206	28
3.12. Diagrama tiempo-espacio para las trayectorias de buses. Fuente: Cortés <i>et al.</i> (2011)	30
3.13. Velocidad servicio 506	31
3.14. Velocidad servicio 506e	31
3.15. Velocidad servicio 206	32
3.16. Total subidas por servicio	33
3.17. Total subidas servicio 506	33
3.18. Total subidas servicio 506e	34
3.19. Total subidas servicio 206	34
3.20. Porcentaje de buses articulados por servicio	35
3.21. Frecuencia programada por servicio en tramo dirección sur	36
3.22. Frecuencia programada por servicio en tramo dirección norte	37
3.23. Paraderos del Rapibus, Gatineau	37
3.24. Ruta servicio 100	38
3.25. Ruta servicio 200	38
3.26. Ruta servicio 400	38
3.27. Ruta servicio 800	39
3.28. Tipo de paradero según cantidad de sectores de detención	40
3.29. Intervalo promedio dirección norte	43
3.30. Intervalo promedio dirección sur	43
3.31. Coeficiente de variación de intervalo dirección norte	44
3.32. Coeficiente de variación de intervalo dirección sur	44
3.33. Desviación estandar de intervalo dirección norte	44

3.34. Desviación estandar de intervalo dirección sur	44
3.35. Validaciones por semana y periodo de una hora	46
3.36. Validaciones por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas	46
3.37. Validaciones por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas	47
4.1. Resultado de simulación de indicadores discretos	50
4.2. Resultado de simulación de indicadores continuos	50
4.3. Indicador discreto de apelsonamiento de buses para los servicios 506 y 506e	52
4.4. Indicador continuo de apelsonamiento de buses para los servicios 506 y 506e	52
4.5. Indicador continuo y discreto del servicio 206	53
4.6. Indicador continuo y discreto del tramo Rapibus en Gatineau	53
5.1. Probabilidad acumulada residuales del modelo indicador continuo	64
5.2. Densidad de residuos del modelo indicador continuo	64
5.3. Probabilidad acumulada residuales del modelo indicador discreto	65
5.4. Densidad de residuos del modelo indicador discreto	65
A.1. Validaciones de adultos por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas	97
A.2. Validaciones de estudiantes por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas	98
A.3. Validaciones de adultos mayores por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas	98
A.4. Validaciones de adultos por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas	99
A.5. Validaciones de estudiantes por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas	99
A.6. Validaciones de adultos mayores por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas	100

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El apelotonamiento de buses es un fenómeno que ocurre como consecuencia de la inestabilidad (variabilidad) de los intervalos de tiempo entre buses consecutivos. Cuando un bus está retrasado o adelantado en sus horarios, incrementa/reduce el intervalo con el bus que le antecede y lo opuesto ocurre con el bus que le sigue, generando así desviaciones en el intervalo esperado (promedio) y el efecto de apelotonamiento de buses.

Tanto para buses que operan por itinerario como por frecuencia, el apelotonamiento de buses genera un desbalance entre el número de pasajeros que suben a un bus después de intervalos largos y cortos. Esto implica un uso ineficiente de la flota de buses, reducción en la capacidad del sistema de buses y el aumento del tiempo de espera de los pasajeros (Welding, 1957; Strathman *et al.*, 2003). Luego, el apelotonamiento de buses es un fenómeno que afecta los intereses de los pasajeros, de los operadores de buses, por la poca eficiencia operacional que genera, y de los reguladores, por la baja calidad de servicio que entrega a los pasajeros, provocando una posible disminución en el uso de transporte público.

Dada la importancia del tiempo de espera en la calidad de servicio de transporte público y la expansión tecnológica con la cual se ha visto beneficiada el área de transporte público, varios estudios se han enfocado en entender el fenómeno de irregularidad de buses, ya sea usando datos de diferentes sistemas tecnológicos de transporte, usualmente incluyendo datos de Localización de sistemas AVL (Automated Vehicle Location)¹ y APC (Automated passenger Counting)² (Moreira-Matias *et al.*, 2012; Albright y Figliozzi, 2012), o mediante modelos de simulación estocástica (Bellei y Gkoumas, 2010; Zhang y Li, 2013). De acuerdo a estos y otros estudios algunos de los factores más relevantes en el apelotonamiento de buses son: desviación del intervalo programado al inicio de la ruta (Moreira-Matias *et al.*, 2012), número de pasajeros que suben y bajan de los buses (TRB, 2003; Bellei y Gkoumas, 2010; Moreira-Matias *et al.*, 2012; Albright y Figliozzi, 2012; Zhang y Li, 2013), largo de la ruta y

¹Sistema tecnológico de posicionamiento de vehículos basado en GPS.

²Sistema tecnológico de conteo de pasajeros.

número de paraderos (TRB, 2003), frecuencia programada de los buses (Moreira-Matias *et al.*, 2012; Zhang y Li, 2013), distancia desde el inicio de la ruta (Bellei y Gkoumas, 2010), condiciones del tráfico (incluyendo incidentes y congestión) (TRB, 2003; Zhang y Li, 2013), trato preferencial del tránsito (pistas exclusivas para buses o sistema TSP (Transit Signal Priority)) (TRB, 2003; Albright y Figliozzi, 2012), uso de elevador de silla de ruedas (TRB, 2003; Albright y Figliozzi, 2012), comportamiento o habilidades del conductor (TRB, 2003) y mantenimiento de los buses (TRB, 2003).

Para mitigar el problema de irregularidad de buses, varias estrategias de control han sido propuestas, como la retención de buses en paraderos, ajuste de velocidad, salto de paradero, tiempos limitados de subida de pasajeros y una combinación de estas estrategias. Algunos autores han estudiado y/o desarrollado programas para conocer cuánto tiempo los buses deben ser retenidos en los paraderos (Daganzo, 2009; Bartholdi y Eisenstein, 2012; Chen *et al.*, 2013b; Lizana *et al.*, 2014).

El objetivo general de este estudio es contribuir al entendimiento del fenómeno apelonamiento de buses por medio de la identificación de factores que incrementan y disminuyen la intensidad del problema. Para esto se desarrollan modelos de regresión lineal utilizando datos de sistemas AVL, APC y AFC (Automated Fare Collection)³ de las ciudades Santiago de Chile y Gatineau de Canadá.

La estructura de la tesis aborda en primer lugar una revisión del estado del arte con respecto a factores que han sido identificados en relación con el problema estudiado y también la manera de poder cuantificar la intensidad el apelonamiento de buses. La recopilación de esta información se puede observar en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se realiza un análisis de los datos de ambas ciudades con el objetivo de entender las características de las localidades, apuntando específicamente a entender y obtener estadísticamente mediciones de los factores identificados en el Capítulo 2. En el Capítulo 4 se presenta la modelación o metodología propuesta para medir las diferentes variables independientes y dependientes. El Capítulo 5 el lector podrá encontrar los resultados obtenidos de los modelos de regresión lineal con el respectivo análisis de parámetros. Finalmente en el Capítulo 6 se encuentran las recomendaciones prácticas, metodológicas y conclusiones finales del trabajo desarrollado.

1.2. Contexto

1.2.1. Sistema de transporte público en Santiago

La ejecución del sistema de transporte público con buses de Santiago, capital de Chile, está a cargo de siete empresas operadoras privadas. El Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) es el ente controlador o regulador del sistema de transporte y tiene la misión de asegurar el correcto funcionamiento del transporte público y el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos por la sociedad.

³Sistema tecnológico de recolección automática de tarifa basado en tarjetas inteligentes.

Existen más de 350 rutas de buses diferentes y cerca de 6.000 buses operando diariamente. Además todos los buses cuentan con sistema de posicionamiento global (GPS), que permite obtener información detallada de las actividades realizadas por los buses. La generación de datos de cada dispositivo GPS se realiza cada 30 segundos durante la operación de los buses, lo que equivale a 80.000.000 de registros de posición durante una semana.

El sistema de pago con tarjetas inteligentes o tarjetas bip! es el único sistema de pago de la tarifa disponible en buses y el más utilizado en metro (97 % de las transacciones totales del sistema). Cada pasajero tiene que hacer una transacción acercando su tarjeta al dispositivo de pago, cuando ingresa al bus, zona paga (sistema que permite al pasajero pagar cuando entra al paradero durante periodos de alta demanda) o metro, lo que le permite hacer dos transbordos dentro de las dos horas siguientes al pago.

En esta ciudad el sistema de transporte enfrenta a diario un alto nivel de demanda (6.000.000 de validaciones diarias en día laboral) y por ende la frecuencia de buses es bastante alta en horarios de alta demanda, permitiendo así observar a menudo el fenómeno de apelo-tonamiento de buses. Para combatir este problema DTPM utiliza una medida de regularidad de intervalos de tiempo entre buses de un mismo servicio, la cual penaliza directamente a las empresas operadoras que exceden un cierto umbral de intervalos de tiempo observados entre autobuses consecutivos. Sin embargo esta medición de intervalo de tiempo se realiza en tres puntos (generalmente ubicados al inicio, al medio y al final de la ruta) del recorrido de los servicios, evidenciando una falta de control de regularidad constante en la ruta (Lizana *et al.*, 2014).

1.2.2. Sistema de transporte público en Gatineau

El sistema de transporte público de Gatineau, Canadá, se compone únicamente de buses y la operación de estos está a cargo de Société de transport de l'Outaouais (STO), operador público que provee transporte a lo largo de los distintos distritos municipales de la ciudad de Gatineau, además de la mayoría de las rutas de conexión entre la ciudad de Gatineau, Québec y el distrito central de negocios de Ottawa, Ontario (Chu y Chapleau, 2008).

La ciudad tiene cerca de 300.000 habitantes, los cuales tienen a disposición cerca de 66 rutas de buses diferentes y 300 buses operando en el sistema. Además todos los buses est n equipados con un lector de tarjetas inteligentes, un cobrador automático (permite el pago de pasajero mediante dinero efectivo) y sistema AVL que utiliza dispositivos GPS (Chu y Chapleau, 2008). El sistema de pago es en su mayoría con tarjetas inteligentes (el 80 % de los usuarios aproximadamente).

Los buses operan mediante itinerario programado y en general a un bajo nivel de frecuencia, lo cual genera que la puntualidad de los buses sea un problema más relevante que la regularidad de estos. No obstante, en el año 2013 se termin  de construir el Rapibus, BRT (Bus Rapid Transit) de Gatineau, que consta de 12 kilómetros de largo y 10 paraderos, por el cual circulan buses con alta frecuencia y con itinerarios programado que en general no son respetados. Por ende la regularidad de los intervalos entre estos buses en el tramo rapibus se vuelve un tema más interesante de analizar.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

La irregularidad en los tiempos de viaje de buses ha sido estudiada desde hace varios años, puesto que es un problema frecuente para los sistemas de transporte. En este capítulo se presenta el problema y se explica su relevancia en la calidad de servicio que perciben los usuarios. Luego se recopilan aquellos factores que han sido identificados en la literatura como causantes del apaltonamiento de buses, aquellas soluciones que han desarrollado algunos autores con el objetivo de realizar gestión del problema en la ruta y a tiempo real y finalmente se identifican aquellos indicadores que permiten medir este problema.

2.1. Irregularidad de buses y consecuencias

La irregularidad de buses se entiende como el efecto en que la variabilidad de los intervalos entre buses que van en una misma dirección, genera algunos intervalos más largos y otros más cortos que el intervalo programado (Guenthner y Hamat, 1988; Chen *et al.*, 2013a). Este problema es causado por la desviación en los intervalos de tiempo entre buses que van en una misma dirección, pues cuando algún bus se retrasa o se adelanta en sus horarios, disminuirá el intervalo de tiempo con el bus que le sigue o le antecede respectivamente. Se identifican las siguientes causas en la desviación de intervalos de tiempo entre buses (Gershenson y Pineda, 2009):

1. Los vehículos andan más rápido de lo esperado. Esto es fácil de rectificar, puesto que se puede forzar a los conductores a realizar una detención más larga de lo requerido en una parada de bus.
2. Los vehículos andan más lento de lo esperado. Esto es difícil de rectificar, puesto que muchas de las causas de estas situaciones son externas a los vehículos.

Los servicios de buses pueden operar de dos maneras diferentes, mediante itinerarios programados (baja frecuencia de buses) o mediante frecuencias programadas (alta frecuencia de buses). En sistemas con itinerario programado se informa a usuarios los horarios de pasada de buses por paraderos, lo cual les permite programar sus horarios de llegada a estos, mientras que en sistemas que operan por frecuencia no se informan los horarios de pasada de los buses,

lo cual genera que los pasajeros presenten llegadas aleatorias a paraderos.

2.1.1. Irregularidad de buses que operan por frecuencia

En el caso de servicios que operan por frecuencia, los pasajeros no pueden programar sus horarios de llegadas a paraderos, por lo que se supone que llegan con una distribución de probabilidad uniforme. Luego la irregularidad de los buses, genera que los pasajeros presenten más probabilidad de llegar en el intervalo mayor que en el menor, por ende la mayoría de los pasajeros suben al bus que llega retrasado, experimentando frustración tanto por el atraso del bus como por la incomodidad de irse en un bus lleno de personas. Este bus atrasado además se mueve a una menor velocidad comercial debido al tiempo que toman las subidas y bajadas del incremento de pasajeros, generando así un tiempo de viaje más lento de lo esperado (Pilachowski, 2009).

El modelo de tiempo de espera que supone que la llegada de pasajeros es aleatoria (Welding, 1957; Holroyd y Scraggs, 1966; Osuna y Newell, 1972) y que permite explicar la relación directa entre el tiempo de espera promedio por persona y la variabilidad del intervalo de tiempo entre buses, se muestra en la ecuación (2.1) donde w es el tiempo de espera promedio por pasajero, h el intervalo de tiempo entre buses, $E(h)$ intervalo promedio entre buses y $Var(h)$ la varianza del intervalo.

$$w = \frac{E(h)}{2} + \frac{Var(h)}{2E(h)} \quad (2.1)$$

2.1.2. Irregularidad de buses que operan por itinerario programado

Si los buses tienden a adherirse al itinerario programado, los pasajeros tenderán a programar sus llegadas al paradero justo antes de la llegada del bus. Luego llegadas de buses con intervalos de tiempos irregulares, permiten observar un bus retrasado recogiendo a pasajeros, no solamente que esperaban dicho bus sino que también a aquellos que llegan temprano para alcanzar el siguiente bus, como resultado el vehículo se retrasa cada vez más, más pasajeros deben continuar esperando y se va con más pasajeros a bordo que el vehículo que le sigue. Además la variabilidad del intervalo contribuye a una alta proporción de aleatoriedad de la demanda, pues muchos pasajeros son menos capaces de planificar sus llegadas a los paraderos para coincidir con la llegada del bus, lo cual se expresa mediante la ecuación (2.2) (Turnquist, 1978).

$$a = b_0 + b_1E(h) + b_2CV + e \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) a es la proporción de pasajeros que llega de manera no aleatoria, $E(H)$ es el intervalo de tiempo promedio entre buses, CV es el coeficiente de variación del

intervalo de tiempo entre buses, e es el término de error y $b_0, b_1 > 0, b_2 < 0$ son constantes. En base a esto el modelo que caracteriza el tiempo de espera de los pasajeros (Turnquist, 1978), según se muestra en la ecuación (2.3), considera que hay pasajeros que tienen llegadas aleatorias y otros tienen llegadas no-aleatoria o programadas.

$$E(w) = aE(w_n) + (1 - a)E(w_r) \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3) $E(w)$ es el tiempo de espera promedio de todos los pasajeros, $E(w_n)$ es el tiempo de espera promedio para los pasajeros que programan sus llegadas y $E(w_r)$ es el tiempo de espera promedio para los pasajeros que llegan de manera aleatoria a los paraderos, el cual es representado en la ecuación (2.1).

Los tiempos de espera para los pasajeros que programan sus llegadas son menores que para aquellos que llegan de manera aleatoria (O'flaherty y Mangan, 1900), con esto se puede concluir que el modelo reflejado en la ecuación (2.3) indica que el aumento de la proporción de pasajeros que no es capaz de programar sus llegadas contribuye a aumentar el tiempo de espera de los pasajeros de manera más intensa que un aumento de los pasajeros que programa su llegada al paradero. En resumen el apaltonamiento de buses que operan por itinerario programado, genera que los pasajeros sean menos capaces de programar sus llegadas y por ende deban aumentar su tiempo de espera.

Finalmente tanto para itinerarios programados como para buses que operan por frecuencia, el apaltonamiento reduce la capacidad de los buses que puede ser utilizada por los pasajeros, aumenta la subida de pasajeros al vehículo que llega después de un intervalo largo generando uso ineficiente de la flota de buses e incrementa el tiempo de espera de los pasajeros.

El fenómeno es más grave aun cuando son más de dos buses los que están en situación de apaltonamiento, pues los pasajeros experimentarán un tiempo de espera aun mayor, ya que el próximo bus al apaltonamiento, tendrá una alta probabilidad de copar su capacidad máxima y por ende los usuarios tendrán que esperar nuevamente el siguiente bus, hasta que el problema se disipe. Por esto es importante notar que la gravedad del apaltonamiento de buses no viene dado únicamente por la adherencia a los horarios o intervalos programados, sino que también es función del número de vehículos que se encuentran en dicho fenómeno (Byon *et al.*, 2011).

La mayoría de las veces, el apaltonamiento es considerado un problema operacional en buses del mismo servicio, sin embargo en una vía donde pasan dos o más servicios diferentes, el apaltonamiento puede ocurrir con buses de diferentes servicios y que tienen un recorrido en común (Chen *et al.*, 2013a).

El apaltonamiento de buses afecta el nivel de confiabilidad que tienen los usuarios en los servicios de transporte público, pues la variabilidad de los intervalos disminuye la consistencia del servicio y por ende empeora la percepción que tienen los pasajeros con respecto a este.

Se hace notar que el apaltonamiento de buses es más grave en aquellos buses que operan por frecuencia, pues en rigor la espera es una variable aleatoria que tiene como máximo valor el intervalo de tiempo observado, consecuentemente mientras más atrasado esté un bus

mayor será el tiempo de espera. Pasajeros que utilizan buses que operan bajo itinerario y que conocen los horarios de estos, tendrán que esperar sólo el retraso del bus más un tiempo pequeño, que les permita asegurarse de llegar a la hora a su destino. Por esto, así como la regularidad de buses es importante en líneas de alta frecuencia, la puntualidad de buses toma alta relevancia en líneas de baja frecuencia como medida de desempeño.

2.2. Factores que afectan el apelsonamiento de buses

Entre los factores que influyen en la irregularidad de buses se han identificado: el número de pasajeros (subidas y bajadas) en cada parada (Barnett, 1974), la fracción de semáforos del camino en los cuales el bus debe parar (Barnett, 1974; Lee *et al.*, 2012), la congestión del tránsito (Barnett, 1974; Lee *et al.*, 2012), el comportamiento de los conductores de buses (Barnett, 1974; Lee *et al.*, 2012) y la variabilidad de la llegada de pasajeros a los paraderos (Lee *et al.*, 2012). La variación del intervalo de tiempo entre buses es una consecuencia obvia de la variabilidad del tiempo de viaje, pero la relación entre estos dos indicadores de confiabilidad no es directa ni fácil de modelar (Strathman y Hopper, 1993). Luego, aquellos factores que influyen en la variabilidad del tiempo de viaje presentan influencia en el apelsonamiento de buses. En consecuencia factores que influyen en la variación del tiempo de viaje también son considerados; entre otros se menciona experiencia y comportamiento del conductor (Strathman y Hopper, 1993; Yetiskul y Senbil, 2012), sensibilidad del horario programado a las condiciones de la ruta (Strathman y Hopper, 1993), largo de la ruta (Strathman y Hopper, 1993), número de paraderos y espaciamiento de estos (Strathman y Hopper, 1993), volumen y variabilidad de bajadas y subidas (Strathman y Hopper, 1993; Yetiskul y Senbil, 2012), congestión de tránsito (Strathman y Hopper, 1993), incidentes de tránsito (Strathman y Hopper, 1993), tiempo meteorológico (Strathman y Hopper, 1993), interrupciones por autos estacionados (Strathman y Hopper, 1993), tipo de vehículos y su diseño (Yetiskul y Senbil, 2012) y administración y operación del tránsito (Yetiskul y Senbil, 2012).

Por otra parte se identifican los siguientes factores que afectan la confiabilidad y por ende la variabilidad en el intervalo de tiempo entre buses (TRB, 2003):

- *Condiciones del tráfico:* congestión del tránsito, retrasos por señales del tránsito, maniobras de estacionamiento, incidentes, entre otros.
- *Construcciones en la carretera y mantenimientos en la pista:* generan retrasos y fuerzan el deterioro de la ruta normal.
- *Calidad de mantención y del vehículo:* podría generar que un vehículo quede fuera de servicio.
- *Disponibilidad de vehículos y conductores:* refleja si hay suficientes vehículos para operar los viajes programados (algunos vehículos pueden estar en mantención y otros fuera de servicio por diversas razones) y si hay suficientes conductores disponibles para operar esos vehículos.
- *Trato preferencial del tránsito:* vía exclusiva de buses o condiciones de prioridad en señales de tránsito para conductores que estén retrasados en su viaje.

- *Horario alcanzable*: refleja si la ruta puede ser operada bajo condiciones de tráfico y demanda de pasajeros usuales, con suficiente escala de tiempo proporcionado a los conductores y suficiente recuperación de tiempo que permita que la mayoría de los viajes lleguen a tiempo, incluso cuando ellos llegan tarde al final de la ruta.
- *Uniformidad de la demanda de los pasajeros*: entre vehículos sucesivos y día a día, para un servicio dado.
- *Diferencias en las habilidades de los conductores*: si están familiarizados con la ruta y la adherencia al horario.
- *Elevador de silla de ruedas y uso de rampa*: incluyendo la frecuencia de despliegue de la rampa y el tiempo requerido para asegurar la silla.
- *Largo de la ruta y número de paradas*: incrementa la exposición del vehículo a eventos que lo puedan retardar.
- *Estrategias de control de operaciones*: utilizados para reaccionar a los problemas de confiabilidad.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de trabajos, que han identificado diversas variables que afectan ya sea la variabilidad del intervalo de tiempo, del tiempo de viaje o la puntualidad de llegada de los buses. Esta tabla incluye resultados de nueve estudios, de los cuales uno fue nombrado anteriormente, en donde además de resaltar los factores identificados y apoyar los ya nombrados, se detalla el contexto en que fueron realizadas las investigaciones, el método utilizado para el desarrollo de estas y el tipo de relación encontrada entre la variable estudiada y los factores identificados.

Tabla 2.1: Factores que afectan el apelotonamiento de buses

Autor	Variable estudiada	Datos utilizados	Herramienta o método	Relación directa	Relación inversa
Bellei y Gkonmas (2010)	Apelotonamiento de buses	Un servicio de bus que opera por frecuencia.	Modelo de simulación estocástica	Distancia entre paraderos, distancia avanzada en la ruta, tiempo de viaje, subidas de pasajeros e intervalo de despacho.	
Moreira-Matias <i>et al.</i> (2012)	Apelotonamiento de buses	Sistema AVL del operador de transporte público de Porto (Portugal) de dos servicios de buses que operan por frecuencia.	Minería de datos	Desviación del intervalo programado en el comienzo de la ruta, frecuencia de buses, subidas de pasajeros y apelotonamiento en paraderos anteriores.	
Lee <i>et al.</i> (2012)	Apelotonamiento de buses	Sistema de tarifa inteligente de un servicio en Singapur que opera por frecuencia.	Análisis de distribución de intervalo y modelo de simulación estocástica	Distancia avanzada en la ruta	
Zhang y Li (2013)	Apelotonamiento de buses	Un servicio de bus que opera por frecuencia.	Modelo de simulación de llegada de buses	Congestión, demanda de pasajeros, intervalo programado (o frecuencia), variación en intervalo programado.	
Surprenant-Legault y El-Genedy (2011)	Variabilidad del tiempo de viaje	Sistema AVL de dos servicios de buses en Montreal, Canadá, que operan por itinerario programado.	Comparación y análisis de datos antes y después de implementación de vía reservada a buses		Vía reservada a buses en horarios punta.
Albright y Fighiozzi (2012)	Apelotonamiento de buses en dos expediciones consecutivas	Sistema AVL y APC de dos servicios de buses en Portland, EE.UU, que opera por itinerario programado.	Modelo de regresión lineal	Subidas y bajadas de pasajeros, uso de elevadores de silla de ruedas en el primer bus. Uso de Prioridad de Señales de Tránsito (TSP) en el segundo bus.	Subidas y bajadas de pasajeros, uso de elevadores de silla de ruedas en el segundo bus. Uso de TSP en el primer bus.
Diab y El-Genedy (2013)	Variabilidad del tiempo de viaje	Sistema AVL y APC de dos servicios de bus en Montreal, Canadá, que operan por itinerario programado.	Modelo de regresión lineal	Sistema de tarifa tarjeta inteligente, vía de bus exclusiva, variación de subidas y bajadas de pasajeros en buses regulares y articulados.	Buses articulados
Mazloumi <i>et al.</i> (2009)	Variabilidad del tiempo de viaje	Sistema AVL de un servicio de bus en Melbourne, Australia, que opera por frecuencia.	Modelo de regresión lineal	Largo de la ruta, número de paraderos, número de semáforos, horarios punta mañana, subidas y bajadas y congestión.	
Yetiskul y Senbil (2012)	Variabilidad del tiempo de viaje	Tarjeta de pago magnética y de tarjeta de inicio y fin de servicio del transporte público de Ankara, Turquía, de buses que operan por frecuencia.	Modelo lineal generalizado	Número de paraderos, subidas y bajadas de pasajeros, periodos de punta tarde, periodos de medio día y congestión.	Buses modernos

Del resumen anterior se observa que no existe claridad sobre la influencia que tienen los periodos punta tarde en el fenómeno estudiado, pues mientras que Strathman y Hopper (1993) han detectado una influencia directa en el porcentaje de llegadas atrasadas o adelantadas, Yetiskul y Senbil (2012) detectaron que en estos periodos se aprecia menos variabilidad del tiempo de viaje, lo cual contradice el resultado del estudio de los investigadores anteriores. Strathman y Hopper (1993) explican que en horarios punta tarde es más probable que las llegadas sean retrasadas o adelantadas que en horarios punta de la mañana, esto se debe a que los pasajeros tienen mayor flexibilidad en la tarde que en la mañana; más aun, en las tardes las personas suelen ir de compras o a lugares de recreación, por lo que consecuentemente, los planificadores enfrentan una mayor variación en la condiciones del tránsito en horarios punta de la tarde. Yetiskul y Senbil (2012) no explican las posibles causas de su resultado con respecto a los horarios punta tarde.

Llama la atención los resultados obtenidos por Diab y El-Geneidy (2013) con respecto al efecto inverso que generan los buses articulados en la variación del tiempo de viaje. Los datos arrojan que el coeficiente de variación del tiempo de viaje en buses articulados es 2.8 % menos que buses regulares; sin embargo este valor no puede ser interpretado directamente, puesto que el modelo desarrollado por los mismos autores incluye el coeficiente de variación de actividad de pasajeros en buses articulados, variable que captura el incremento en la variación del tiempo de viaje en buses articulados. Tomando esto en cuenta, el efecto marginal de buses articulados en la variación del tiempo de viaje es una disminución de 1.9 %. Además la presencia de buses articulados en el corredor genera un efecto en los otros buses, que hace que el coeficiente de variación de la desviación del tiempo de viaje disminuya en 0.99 %, sin tener efecto significativo en la variación del tiempo de viaje. Finalmente, los buses articulados son más lentos pero generan una menor variación en el tiempo de viaje comparado con los buses regulares.

Es relevante entender el efecto que genera el sistema de prioridad de semáforos (TSP) en la irregularidad de buses, el cual puede ser de tipo pasivo o activo. El sistema de prioridad pasivo consiste en la optimización de tiempos de semáforos y coordinación entre estos para un plan predeterminado fijo, con el objetivo de minimizar demoras y detención de los vehículos. Por otro lado el sistema de prioridad activo optimiza tiempos de semáforos según las características del tráfico en cada momento, en función de la información capturada por sensores instalados en las calles que detectan presencia de vehículos. Existen varios tipos de sistemas de prioridad activo, uno de estos es el Sistema de Tráfico Adaptativo Coordinado Sydney (SCATS) que fue desarrollado en Australia en 1970 y que actualmente utiliza cámaras de video que operan en condiciones de tiempo real.

Slavin *et al.* (2013) estudiaron la variación de intervalo de una avenida de Portland, EE.UU. con datos de los sistemas AVL, contador de pasajeros y Wavetronix (dispositivos que se instalan en semáforos y son utilizados para monitorear volumen del tránsito). Los análisis estadísticos de datos antes y después de implementación de SCATS, arrojaron que no hay mejoras significativas en la desviación y variabilidad del intervalo después de la implementación de SCATS. Diab y El-Geneidy (2013) encontraron que los buses equipados con TSP activo (dispositivo que detecta si un bus se encuentra atrasado, situación en que se alarga el tiempo verde o se corta el tiempo rojo según sea necesarios para dar prioridad al bus) son más rápidos que los otros buses en 1.4 segundos (0.3 %) por segmento de viaje, sin embargo

ellos no tienen efecto significativo en la variación del tiempo de viaje y en la variación de la desviación del tiempo de viaje, no obstante la presencia de estos buses equipados con TSP activo a lo largo del corredor generaron impacto generalizado en los otros buses, en los que el tiempo de viaje disminuyó en 1.37 segundos (0.3%) por segmento de viaje e incrementaron un 0.5% la variación del tiempo de viaje, y un 0.6% la variación de la desviación del tiempo de viaje de estos.

2.3. Soluciones para el apelsonamiento de buses

Para mitigar el problema del apelsonamiento de buses existen varias estrategias de control, como por ejemplo retención de buses en los paraderos, ajuste de velocidades de buses, salto de paraderos, límites de horario de embarque, y una combinación de estas estrategias individuales. En general, la solución utilizada por los operadores de buses es agregar tiempos de holgura en el horario planificado, para facilitar la retención de buses en paraderos o puntos de control. Sin embargo, esta medida no garantiza el buen desempeño en la operación, puesto que una disrupción larga en los intervalos de tiempo entre buses podría desestabilizar el sistema.

La estrategia de retención de buses en los paraderos es la más utilizada y fácil de implementar y se puede basar en tres enfoques: retención de acuerdo a horario predefinido o itinerario, retención de acuerdo a intervalos regulares de tiempo entre buses y retención de acuerdo a intervalos dinámicos, se van ajustando en base a la situación en que se encuentre el sistema completo del servicio. El primer grupo es utilizado para servicios con intervalos largos (10 minutos o más), mientras que el segundo y tercer grupo es utilizado para servicios con alta frecuencia, es decir, intervalos pequeños (menor a 10 minutos). En el marco de estos enfoques varios investigadores han realizados estudios y/o desarrollos de software con el objeto de conocer el tiempo que debe ser retenido un bus en los paraderos, utilizando información en tiempo real de los intervalos entre buses (Daganzo, 2009; Bartholdi y Eisenstein, 2012; Chen *et al.*, 2013a; Lizana *et al.*, 2014).

2.4. Medidas de apelsonamiento de buses

Debido a lo relevante que es el fenómeno apelsonamiento de buses para un sistema de transporte público, existen varios estudios que han medido dicho problema con diferentes metodologías e indicadores, entre los cuales se distinguen indicadores discretos e indicadores continuos.

Se entiende por indicadores discretos, aquellos que se basan en una variable que toma un valor determinado cuando el intervalo observado es mayor o igual a un cierto porcentaje del intervalo programado o cuando el intervalo observado se encuentra dentro de un intervalo dado en base al intervalo programado, mientras que los intervalos continuos se enfocan en el tiempo esperado por los pasajeros en los paraderos y/o en la razón entre el intervalo observado y el intervalo promedio.

2.4.1. Indicadores discretos

Bellei y Gkoumas (2010) mostraron, mediante simulación estocástica, cómo algunas características de un modelo de sistema de tránsito están relacionadas al fenómeno apelotonamiento de buses. Para esto utilizaron un indicador discreto por paradero, y_{mn} , definido en la ecuación (2.4), y luego calcularon i_n como el porcentaje de veces en que el indicador discreto toma valor uno, ver ecuación (2.5).

$$y_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{si } h_{mn} \leq \frac{h^*}{4} \\ 0 & \text{si } h_{mn} > \frac{h^*}{4} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$i_n = \frac{\sum_m y_{mn}}{n_n} * 100 \quad (2.5)$$

Donde h_{mn} es el intervalo de tiempo observado entre el bus $m - 1$ y el bus m en el paradero n , h^* es el intervalo de tiempo programado y n_n el número total de intervalos observados en cada paradero.

Por otro lado Moreira-Matias *et al.* (2012) utilizaron el mismo indicador y_{mn} con el fin de identificar los lugares de Porto (Portugal) más propensos al apelotonamiento de buses. Sin embargo, no utilizaron una proporción de los casos de apelotonamientos por cada paradero como los investigadores anteriores, sino que estudiaron el fenómeno por cada par de expediciones consecutivas, definiendo que una expedición m presenta apelotonamiento de buses si en algún paradero n , $y_{mn} = 1$ y si además existe algún paradero próximo a n en que el intervalo presentado entre la expedición m y $m - 1$ es mayor o menor al intervalo presentado en el paradero n .

También se han sugerido otros indicadores discretos que proponen un rango en el intervalo de tiempo entre buses, como por ejemplo el porcentaje de intervalos que se encuentran dentro del intervalo programado $+2$ y -2 minutos (Trompet *et al.*, 2011). En esta línea DTPM utiliza dos indicadores de regularidad (Núñez Sepúlveda, 2015), el índice de cumplimiento de regularidad según incidentes (ICR-I), utilizado para servicios que operan por frecuencia, y el indicador de regularidad según puntualidad en ruta (ICR-P), este último utilizado para evaluar el desempeño de aquellos servicios que operan con itinerario programado (frecuencia de buses menor o igual a 5 buses por hora).

Para calcular el ICR-I primero se define un tiempo aceptable para el servicio-sentido j en el periodo p expresado en minutos (TA_{jp}).

$$TA_{jp} = I_{jp}^{prog} + Hol_{jp}^{ICR-I} \quad (2.6)$$

Donde I_{jp}^{prog} es el intervalo estipulado en el programa de operación para el servicio-sentido en el período p , y Hol_{jp}^{ICR-I} se muestra en la ecuación (2.7).

$$Hol_{jp}^{ICR-I} = Max(3; \min(0, 4 * I_{jp}^{prog}; 10)) \quad (2.7)$$

Es decir, el menor valor que puede tomar Hol_{jp}^{ICR-I} es tres y el mayor valor es diez, considerando que Hol_{jp}^{ICR-I} es creciente con el intervalo programado hasta cierto punto y luego es constante.

Luego se define un incidente ($Inc_{jp}^i(c_{ij})$) para el intervalo observado $I_{jp}^{i,obs}$ de un servicio-sentido, período y punto de control c_{ij} como se muestra en la ecuación (2.8).

$$Inc_{jp}^i(c_{ij}) = Max(0; I_{jp}^{i,obs} - TA_{jp})^{1,5} \quad (2.8)$$

Cuando $Inc_{jp}^i(c_{ij}) = 0$ se considera que no hubo incidente en el intervalo observado i . El indicador ICR-I corresponde al número de intervalos observados sin incidentes dividido por el número total de intervalos observados en el periodo de medición. Se hace notar que el descuento en el pago a los operadores está dado en función de la sumatoria de incidentes ($Inc_{jp}^i(c_{ij})$) y no según el indicador ICR-I.

Para calcular ICR-P es necesario determinar un itinerario de paso por punto de control en la ruta. Se contrasta el tiempo observado de pasada de cada bus por cada punto de control con el tiempo establecido en el itinerario.

Los instantes de paso programados, $g_{jb}^{prog}(c_{ij})$, se definen en un programa de operación para cada expedición programada b en el servicio-sentido j , en el punto de control c_{ij} .

El desfase efectivo, $d_b(c_{ij})$, de un instante de paso programado para una expedición b del servicio-sentido j en el punto de control c_{ij} , se muestra en la ecuación (2.9).

$$d_b(c_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_{jb}^{obs}(c_{ij}) \in \{g_{jb}^{prog}(c_{ij}) - 2; g_{jb}^{prog}(c_{ij}) + 4\} \\ g_{jb}^{obs}(c_{ij}) - g_{jb}^{prog}(c_{ij}) & \text{si } g_{jb}^{obs}(c_{ij}) \notin \{g_{jb}^{prog}(c_{ij}) - 2; g_{jb}^{prog}(c_{ij}) + 4\} \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde $g_{jb}^{obs}(c_{ij})$ es el siguiente instante a $g_{jb}^{prog}(c_{ij})$ en donde se observa el paso de un bus por el punto de control c_{ij} .

El ICR-P corresponde al número de desfases efectivos igual a cero, dividido por el total de instantes de paso programados analizados en el periodo de medición. Al igual que en el caso anterior, los descuentos en el pago a los operadores se realizan en función de la suma de desfases ($d_b(c_{ij})$) y no en función del indicador ICR-P.

2.4.2. Indicadores continuos

Los indicadores continuos se pueden dividir en indicadores estadísticos e indicadores de percentil extremo. Los indicadores de tipo estadísticos se basan principalmente en el intervalo

de tiempo observado, que está dado por la operación de las expediciones, mientras que los indicadores de percentil extremo, se utilizan para medir la percepción de los usuarios con respecto a la variabilidad de los intervalos.

2.4.2.1. Indicadores continuos de tipo estadísticos

Byon *et al.* (2011) propusieron dos indicadores de apelsonamiento de buses, índice por hora (IPH) e índice por observación (IPO), ambos basados en el ratio de tiempo de espera relativo de los pasajeros.

$$IPH = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{h_i}{h^*})^2}{0,5hora} \quad (2.10)$$

$$IPO = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{h_i}{h^*})^2}{N} \quad (2.11)$$

En los indicadores IPH e IPO, h_i representa el intervalo i observado entre buses; h^* el intervalo programado entre buses; N el número de observaciones realizadas. Para obtener estos indicadores, se basaron en que el sistema de transporte público de Santiago, para la mayoría de los servicios, no define itinerario en las programaciones, pero si define intervalos de tiempo entre buses, por ende los usuarios no saben la hora de llegada de los buses pero si tienen claro la frecuencia de estos. Luego si se supone que los pasajeros llegan al paradero con una distribución de probabilidad uniforme, el tiempo de espera promedio de un usuario será la mitad del intervalo de tiempo entre buses. Asumiendo que la tasa de llegada al paradero de los pasajeros es k por unidad de tiempo, el tiempo de espera de todos los individuos será $(h/2) * h * k$, luego calculando el ratio de tiempo relativo de espera (RWTR) se obtiene el resultado mostrado en la ecuación (2.12).

$$RWTR = \sum_{i=1}^N \frac{\frac{h^2}{2} * k}{\frac{h^{*2}}{2} * k} = \sum_{i=1}^N (\frac{h}{h^*})^2 \quad (2.12)$$

Para contextualizar estos indicadores Byon *et al.* (2011) desarrollaron una tabla de referencias (Tabla 2.2), en la cual se supone $h^* = 10$ minutos y se evalúan tres casos en un tiempo de 60 minutos.

Tabla 2.2: Referencia valores IPO e IPH. Adaptado de Byon *et al.* (2011).

Caso	IPH	IPO
Todos los buses llegan en tiempo estipulado	12	1
Dos grupos de buses en apelsonamiento	36	3
Todos los buses en apelsonamiento	72	6

Li *et al.* (2013) calcularon y analizaron los indicadores propuestos por Byon *et al.* (2011) en diferentes situaciones y valores de intervalo programado (cinco, tres, dos y un minuto) en un espacio temporal de 30 minutos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Cuadro esquemático valores IPO e IPH. Adaptado de Li *et al.* (2013)

	Casos	$h^* = 5$	$h^* = 3$	$h^* = 2$	$h^* = 1$
IPH	Todos los buses llegan en tiempo estipulado	12	20	30	60
	2 grupos de buses en apelsonamiento	36	100	225	900
	Todos los buses en apelsonamiento	72	200	450	1800
IPO	Todos los buses llegan en tiempo estipulado	1	1	1	1
	2 grupos de buses en apelsonamiento	3	5	7,5	15
	Todos los buses en apelsonamiento	6	10	15	30

Li *et al.* (2013) observaron que en la situación en que todos los buses cumplen con el intervalo programado, el IPH es diferente para intervalos programados diferentes, sin embargo todos los resultados debiesen ser iguales ya que no hay apelsonamiento de buses. Por otro lado en el caso en que los buses llegan a la hora, el IPH, en intervalo programado de un minuto, es 60, mientras que en situación en que los buses llegan de pares, cuando el intervalo programado es cinco minutos el IPH es 36, generándose una contradicción, ya que indica que en la primera situación el apelsonamiento es más intenso que en la segunda condición. Finalmente Li *et al.* (2013) concluyen que el índice IPH es cuestionable como medición de apelsonamiento de buses, no así el indicador IPO, puesto que presenta resultados razonables para diferentes intervalos programados.

Por otro lado el coeficiente de variación ha sido utilizado como indicador de variabilidad de intervalo por varios investigadores (Lomax *et al.*, 2003; Zhang y Li, 2013; Slavin *et al.*, 2013), puesto que este representa una buena interpretación porcentual de la variabilidad de los datos, es decir, de la variabilidad de los intervalos de tiempo observados entre buses. En esta línea también se encuentra la desviación estándar de la diferencia entre el intervalo de tiempo observado e intervalo de tiempo programado. La ventaja de esta última es que tiene una distribución normal (Trompet *et al.*, 2011).

El tiempo de espera en exceso también es un indicador de confiabilidad, utilizado por Transport for London, y representa la espera adicional que experimentan los pasajeros debido a la irregularidad de buses. El tiempo de espera en exceso (w_{exceso}) para servicios que operan por frecuencia, está dado por la fórmula (2.13), donde $E(w)$ es el tiempo promedio que los pasajeros deben esperar y w_{ideal} es el tiempo que esperarían los pasajeros si es que el intervalo observado fuese el intervalo programado, este último valor es calculado con la fórmula de tiempo de espera utilizado por Welding (1957); Holroyd y Scraggs (1966); Osuna y Newell (1972).

$$w_{exceso} = E(w) - w_{ideal} \quad (2.13)$$

Por otro lado para servicios que operan por itinerario, los pasajeros llegan con una cierta

anticipación al paradero con el objetivo de no perder el bus, pues el llegar atrasados les significa esperar un intervalo completo. Furth y Muller (2006) definen como V a la diferencia entre la hora de pasada real y la programada, luego el tiempo en exceso queda definido como se muestra en la ecuación (2.14), donde V_A es el percentil A de V en el cual el usuario llega al paradero. Furth y Muller (2006) sugieren que el usuario habitualmente llegaría en el percentil 2, es decir, el pasajero llegaría atrasado al paradero aproximadamente una vez cada 50 viajes.

$$w_{exceso} = E(V) - V_2 \quad (2.14)$$

2.4.2.2. Indicadores continuos de tipo percentil extremo

Hasta ahora, varios de los indicadores continuos de irregularidad de buses se basan en medidas de tiempo de espera de los pasajeros, puesto que este valor está directamente relacionado con el apolonamiento de buses. Referente a esto, Furth y Muller (2006) sugieren que las medidas tradicionales de tiempo de espera se enfocan en valores medios, mientras que la percepción de los pasajeros está basada en valores extremos, los cuales son altamente dependientes de la confiabilidad del servicio. Indicadores tradicionales de confiabilidad de servicio (por ejemplo coeficiente de variación) son medidas de la calidad de la operación, es decir, ellos no expresan el impacto de la confiabilidad en los pasajeros. Consecuentemente el tiempo de espera es subestimado y la confiabilidad del servicio sobrevaluado.

Por lo anterior algunos investigadores sugieren utilizar el percentil 95 del tiempo de espera, que puede ser interpretado como una medida de tiempo de espera presupuestado por el pasajero, considerando que cuando se planifica un viaje, cuyo tiempo está sujeto a variabilidad, los pasajeros deben permitir más tiempo para esperar que el tiempo de espera promedio, y así no llegar tarde al destino. En base a esto Núñez Sepúlveda (2015) propone utilizar el percentil 95 del tiempo de espera observado dividido por el intervalo promedio, para indicar la percepción en cuanto a variabilidad de los intervalos de buses que operan por frecuencia. Furth y Muller (2006) definen el tiempo de espera potencial, que puede ser utilizado como indicador también, como diferencia entre el tiempo de espera presupuestado y el tiempo de espera promedio, luego la ecuación (2.15) y (2.16) definen el tiempo de espera potencial para buses que operan por frecuencia y por itinerario programado respectivamente.

$$w_{potencial} = w_{95} - E(w) \quad (2.15)$$

$$w_{potencial} = V_{95} - E(V) \quad (2.16)$$

2.5. Conclusiones

La importancia dada al fenómeno apolonamiento de buses en el área de transporte público radica en el bajo nivel de confiabilidad que este puede generar en los usuarios, pues

a mayor variabilidad de intervalos entre buses mayor es la inconsistencia o inseguridad que tendrán los pasajeros con respecto al tiempo de viaje en sus principales componentes (tiempo de espera en paradero y tiempo de viaje en vehículo), es decir, la variabilidad de intervalos y la confiabilidad presentan una relación inversa.

Otro aspecto no menos importante es el uso ineficiente de vehículos que genera el fenómeno en cuestión, pues si más pasajeros se suben al primer bus del apelsonamiento, este tendrá un uso mayor a la otra máquina y por lo tanto un mayor costo mecánico. Por otro lado, al hacer el recorrido más lento, le dificulta al operador cumplir con la frecuencia ofrecida. Por esto la variabilidad de intervalos es de interés para las empresas o instituciones operadoras del transporte.

En general la literatura con respecto a variabilidad de intervalos sostiene una serie de factores que causan este contexto, donde se reconoce como uno de los más importantes la variabilidad en la demanda, puesto que tanto la cantidad de los pasajeros como su comportamiento puede generar una mayor o menor (incluso nula en caso de no haber demanda) detención del bus en la parada y por ende un atraso o adelanto, respectivamente, en los intervalos programados. También es bastante considerado el avance del bus en ruta, puesto que a medida que este avanza se expone a mayor aleatoriedad en las condiciones del entorno que podrían afectar su regularidad.

Pese a que algunos autores han realizado estudios sobre la significancia de cada uno de estos factores en el fenómeno de apelsonamiento de buses, en Santiago y Ottawa no se ha indagado cuál es el peso relativo de estos en dicho fenómeno. No obstante se han realizado esfuerzos de investigación y operación para tomar estrategias que permitan reducir esta situación. Con esto se abren las puertas para poder desarrollar trabajos de investigación que permitan entender cuáles son los factores de mayor relevancia en la irregularidad de buses de DTPM y STO y por consiguiente analizar diversas medidas que permitan prevenir este fenómeno. Pues pese a que las soluciones para varias causas del apelsonamiento de buses pueden ser diferentes, una aproximación a estas causas permitirá a los operadores implementar estrategias de mejoramiento.

Para completar los factores identificados en la literatura se realizó una entrevista a personal del Centro de Monitoreo de Vehículos de DTPM, los cuales sumaron las siguientes variables a la investigación ya mostrada:

- *Tipo de paradero:* Se ha notado que los paraderos que tienen dispositivos para las tarjetas bip! reducen el tiempo de permanencia del bus en el paradero, puesto que los usuarios solo deben ascender al bus generando un flujo de personas más dinámico. Con esto el atraso de buses en horas de alta demanda se ve menos afectado, el tiempo de detención de buses es más homogéneo ante la variación en demanda y por tanto se reduce la probabilidad que dos buses se junten en dicho lugar.
- *Semáforos aislados:* Por lo general cuando hay problemas de congestión, DTPM hace las gestiones pertinentes para poder aumentar el tiempo de luz verde a las pistas por donde pasa transporte público y que están más congestionadas. Sin embargo existen semáforos que no pueden ser manipulados en sus tiempos (semáforos aislados), ya que no pertenecen a la red de optimización, ya sea por construcción o por falla de este.

Los indicadores observados en el estado del arte se pueden dividir en dos grupos, aquellos que tienen como objetivo capturar el desempeño operacional de la regularidad de buses y aquellos que tienen como objetivo medir el impacto de la variabilidad de los intervalos en la confiabilidad que perciben los usuarios, a estos últimos se suelen asociar aquellos que intentan capturar experiencia extrema del pasajero en base a su tiempo de espera en el paradero, como por ejemplo el percentil 95 del tiempo de espera. Otra división presente en los indicadores es en base al tipo de operación de los buses (que puede ser por frecuencia o itinerario programado), como se ve por ejemplo en aquellos utilizados por DTPM que define dos indicadores de regularidad según tipo de operación. La tabla 2.4 muestra los indicadores estudiados en la revisión bibliográfica y su clasificación en cuanto a objetivo de medición y uso según tipo de operación de buses. Por otro lado resalta la ventaja que presentan los indicadores discretos en cuanto al bajo costo de comprensión del fenómeno, de construcción y cálculo. Esto hace que dicho indicador sea alcanzable por personas que no necesariamente son entendidas en temas estadísticos.

Se hace notar que la mayoría de los indicadores de apelotonamiento de buses identificados en la literatura hacen uso del intervalo programado, lo cual implica que la medición considera el cumplimiento de frecuencia además de la regularidad. Para aislar el efecto de cumplimiento de flujo de buses se debe utilizar el intervalo promedio en vez del intervalo programado. No obstante, en los casos analizados por los autores que utilizan indicadores continuos, se tiene que el intervalo promedio es igual al intervalo programado, por lo que en ese caso los indicadores no se ven afectados por la frecuencia de los buses.

Finalmente, el apelotonamiento de buses puede ser considerado entre buses de un mismo servicio o de diferentes servicios con todo o parte del recorrido igual. En este estudio se considera el apelotonamiento de buses como el efecto dado por buses de un mismo servicio y en un mismo sentido en Santiago de Chile y el caso de líneas comunes en Gatineau de Canadá.

Tabla 2.4: Resumen de indicadores de confiabilidad

Indicador	Operación de buses por itinerario programado	Operación de buses por frecuencia	Objetivo de medición
Y_mn	No	Si	Calidad de la operación
ICR-I	No	Si	Calidad de la operación
ICR-P	Si	No	Calidad de la operación
IPH	No	Si	Calidad de la operación
IPO	No	Si	Calidad de la operación
Coefficiente de variación de intervalo	No	Si	Calidad de la operación
w_exceso	Si	Si	Calidad de la operación
Percentil 95 del tiempo de espera	No	Si	Percepción del usuario
w_potencial	Si	Si	Percepción del usuario

Capítulo 3

Generación y análisis de datos

Los datos utilizados en este trabajo son del sistema de transporte público de Santiago y Gatineau. Los datos provienen del sistema de posicionamiento (registros GPS) y transacciones de pago (AFC) en el caso de Santiago y de los sistemas APC y AFC en el caso de Gatineau.

En Santiago todos los buses están equipados con dispositivos GPS, que registran el tiempo y la posición del vehículo, cada 30 segundos (Cortés et al. 2011). Esto permite estimar los intervalos entre pasadas de buses consecutivos.

Inicialmente los datos obtenidos de la ciudad de Gatineau, vienen del sistema de conteo de pasajeros, que permite identificar el instante de subida de pasajeros al bus por cada paradero, no obstante solo un tercio de los buses está equipado con el dispositivo de conteo, por lo que no es posible obtener los intervalos de tiempo entre buses consecutivos. Debido a esto se utiliza la información de subidas de pasajeros que está disponible del sistema de pago AFC para obtener los intervalos de pasadas.

3.1. Caso Santiago

3.1.1. Descripción del caso de estudio

En este trabajo se utilizan datos de los servicios 506 y su variante expreso 506e, entre el 15 de abril de 2013 y 19 de abril de 2013 y del servicio 206 entre los días 15 y 17 de abril de 2013, (los demás días de esa semana fueron omitidos por presencia de feria en segmentos de calle por los que transita el servicio normalmente).

El servicio 506 opera durante todo el día y toda la noche todos los días de la semana, mientras que el servicio 506e opera durante horarios de alta demanda (entre las 6:30 y las 9:30 horas y entre las 17:30 y las 21:30 horas) de lunes a viernes. Ambos servicios comparten el mismo camino y los datos utilizados corresponden a los del sentido poniente a oriente (ver Figura 3.1). El largo de la ruta de estos servicios es de 32,6 km, en donde el servicio 506 tiene

82 paraderos y el 506e 43 paraderos. La distancia promedio entre paraderos es de 393 metros para el servicio regular y 758 metros el servicio expreso.

Por otro lado el servicio 206 opera todos los días de la semana entre 5:30AM y 0:40AM, con un largo de ruta de 20,7 km, sirviendo a 58 paraderos que presentan una separación promedio de 354 metros. Los datos utilizados de este servicio corresponden a los del sentido sur a norte (ver Figura 3.2).

Figura 3.1: Ruta servicio 506-506e

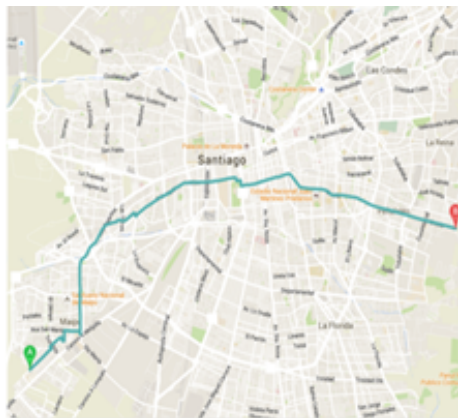
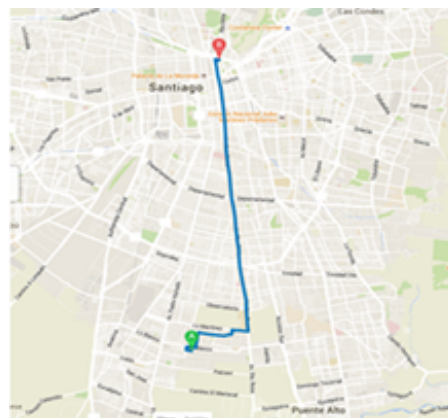


Figura 3.2: Ruta servicio 206



Tres de los paraderos de los servicios 506 y 506e y dos paraderos del servicio 206, están equipados con dispositivos de pago extravehicular, los cuales operan como estaciones de bus durante los horarios de alta demanda (zonas paga). Las zonas paga están ubicadas en puntos de alta afluencia de pasajeros como estaciones de metro, las cuales contribuyen especialmente durante los horarios de mayor demanda. En la Tabla 3.1.1 se presenta la ubicación de las zonas pagas utilizadas por los servicios en estudio.

Tabla 3.1: Zonas paga

Servicio	Zona paga	Horario
506, 506e	Metro Parque O'Higgins	6:30-10:00/17:00-20:00
506, 506e	Metro Irarrázaval	17:00-21:30
506, 506e	Metro Grecia	16:30-22:00
206	Metro Santa Lucía	17:30-20:30
206	Metro Santa Rosa	6:00-9:00

Con respecto a la infraestructura, se diferencian cuatro tipos de prioridad a buses: tráfico mixto, pistas sólo bus, corredor segregado y vía exclusiva. Los segmentos de tráfico mixto no consideran ningún tipo de prioridad al transporte público sobre vehículos particulares, luego la calle es compartida. Las pistas sólo bus están localizadas a la derecha de la calle, y son de exclusividad para vehículos de transporte público. Estas no presentan segregación física, y está permitido que vehículos privados entren a estas vías cuando necesitan doblar a la derecha, por lo que no siempre son respetadas. Los segmentos de corredor segregado corresponden

Figura 3.3: Avenida Manuel Antonio Matta, Santiago, Chile



a vías centrales segregadas físicamente de dos pistas o una pista con adelantamiento en los paraderos, en donde pueden circular solamente buses del transporte público. Las vías exclusivas son pistas restringidas solo para la circulación de vehículos del transporte público, estas operan de lunes a viernes (excepto festivos) entre las 7:30 a las 10:00 hrs y entre las 17:00 y 21:00 hrs. En particular los servicios 506-506e utilizan tipos de prioridad correspondientes a tráfico mixto, pistas sólo bus y corredor segregado, mientras que el servicio 206 utiliza los tipos de prioridad tráfico mixto, corredor segregado y vía exclusiva. Se hace notar que en el segmento de dos pistas sólo bus, que utiliza el servicio 506 y su variante 506e, se permite oficialmente el estacionamiento de vehículos en horarios valle (ver Figura 3.3). Esto impide que los buses tengan disposición total de ambas pistas, por lo que los tramos de dos pistas sólo bus son más bien una pista sólo bus con adelantamiento en paraderos.

En la Tabla 3.2 se observa el tipo de prioridad de vía del servicio 506 y 506e, el largo de esta, el número de intersecciones semaforizadas ubicadas en dicho tramo y la comuna en la cual se ubica. Lo mismo se muestra para el servicio 206 en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2: Tramos de los servicios 506 y 506e

Tramo	Prioridad de vía	N intersecciones semaforizadas	Largo [km]	Comuna
1	Tráfico mixto	4	4,3	Maipú
2	Corredor segregado	7	1,6	Maipú
3	Una pista sólo bus	15	3,4	Maipú
4	Corredor segregado	2	0,7	Maipú
5	Tráfico mixto	1	2,5	Maipú
6	Tráfico mixto	12	4,3	Estación central
7	Tráfico mixto	14	3,8	Santiago
8	Dos pista sólo bus ¹	7	1,6	Santiago
9	Dos pista sólo bus ¹	3	0,5	Ñuñoa
10	Corredor segregado	24	5,3	Ñuñoa
11	Corredor segregado	12	3,8	Peñalolén
Total		101	31,8	

¹Una pista sólo bus con adelantamiento en paradero

Tabla 3.3: Tramos del servicio 206

Tramo	Prioridad de vía	N intersecciones semaforizadas	Largo [km]	Comuna
1	Tráfico mixto	1	4,7	La pintana
2	Corredor segregado	5	1,9	La pintana
3	Corredor segregado	9	2	La granja
4	Tráfico mixto	11	2,4	La granja
5	Corredor segregado	16	4,9	San Joaquín
6	Tráfico mixto/ Vía exclusiva	25	4,8	Santiago
Total		67	20,7	

3.1.2. Generación de datos para los buses

En esta sección se identifican y describen estadísticamente los datos utilizados en el presente estudio.

3.1.2.1. Expediciones e intervalos de tiempo

En la base de datos disponible se encuentra la tabla “Cruce_paraderos”, la cual contiene información (obtenida de los datos de GPS) referente a los instantes de pasada de cada bus por los paraderos del servicio que operan, que en adelante llamaremos “registros”. En la Tabla 3.4 se presentan los campos contenidos en “Cruce_paraderos”.

Tabla 3.4: Tabla cruce_paraderos

Nombre	Descripción
cod_par	Código del paradero
Serviciosentido	Código del servicio-sentido
patente	Patente del bus
tiempo_cruce	Tiempo en que el bus cruza el paradero

Estos datos permiten identificar los diferentes viajes que hizo un bus, mediante un número de expedición por cada recorrido operado, pues se sabe por código de paradero el inicio y fin de cada viaje.

Para el servicio 506 se obtiene un total de 991 expediciones y 77.583 registros, mientras que para el servicio 506e se obtienen 7.772 registros y 195 expediciones. Para el servicio 206 se obtienen 630 expediciones y un total de 30.031 registros.

Con el objetivo de obtener intervalos de tiempo más certeros, se aplicó una serie de filtros a los datos contenidos en la tabla identificada recientemente. Estos filtros se pueden clasificar en:

Distancia recorrida por la expedición: Se eliminaron aquellas expediciones que recorren menos de 1,7 kilómetros en la ruta, lo que equivale a un límite de siete paraderos para los servicios 506 y 206 y cuatro paraderos para el servicio 506e. Este hecho (camino recorrido menor a 1,7 km) se puede explicar por errores de uso de la tecnología que registra el inicio del servicio, donde se ha iniciado un servicio erróneo, o por fallo del bus que impide concretar el recorrido. Notar que para el servicio 506, las expediciones eliminadas no consideran aquellas que partieron el día 14 y terminaron el día 15 de abril, puesto a que es posible que en este último día hayan recorrido menos de 1,7 kilómetros si el resto del recorrido del servicio se encuentra en el día anterior.

Por paradero: Se eliminaron los registros de los primeros dos y últimos dos paraderos de cada recorrido, con el objetivo de borrar todo ruido en los datos debido al mal uso de la tecnología relacionada al inicio y fin del servicio. Pues, los conductores son encargados de dar inicio y fin a los servicios, no obstante se ha detectado que algunos de ellos inician servicios erróneos y luego de pasar por los primeros paraderos modifican esta indicación al servicio correcto.

Por ausencia de pulsos GPS: Se eliminaron aquellos cortes espacio-temporales (periodos de media hora para un paradero y un día) en que una o más expediciones presentan ausencia de pulsos GPS, causada por problemas tecnológicos o desvíos en la ruta. Esto se justifica porque en dichos periodos y paraderos las expediciones con ausencia de pulsos GPS pueden variar los datos de manera injustificada, aumentando el intervalo promedio.

Se identifican tres causas de ausencia de pulsos GPS, tomando en consideración que las expediciones en paraderos contiguos presentan tiempos de pasada: problemas tecnológicos relacionados al GPS, desvíos en la ruta que hacen que los buses no pasen por algunos paraderos del recorrido y falla del bus que hace que este deje de funcionar y retome el camino con la ayuda de alguna grúa en algún punto de la ruta. De estas causas, la única que genera un cambio directo en el intervalo de tiempo entre buses, es la falla del bus, puesto que el vehículo deja de pasar por los siguientes paraderos y por ende el intervalo de tiempo del bus que está detrás de este, aumenta.

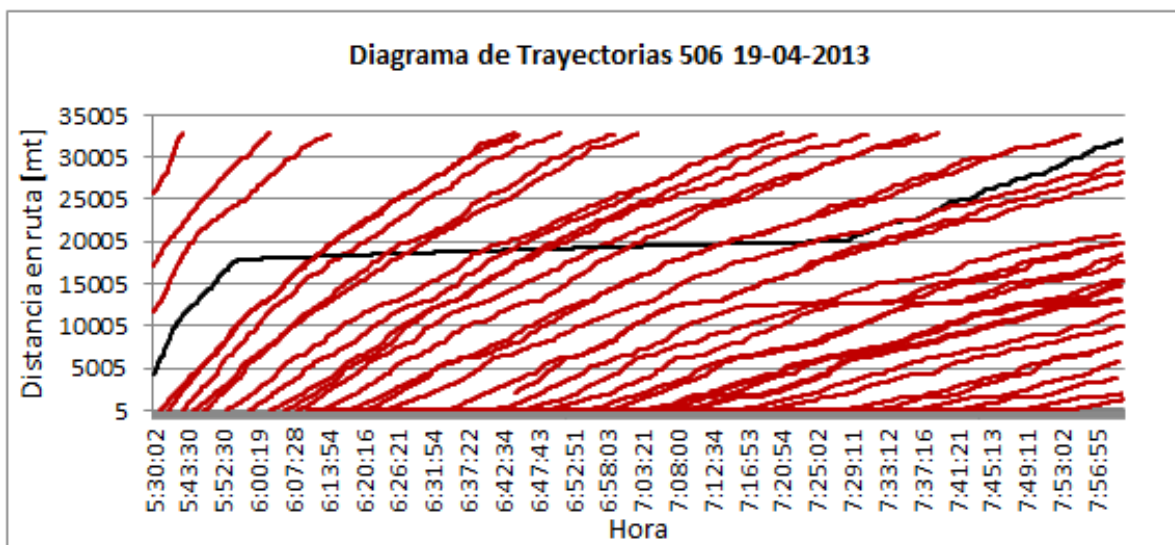
Para el servicio 506 se encontraron 64 expediciones que presentan ausencia de pulsos GPS, mientras que para el servicio 506e se tienen nueve expediciones con esta condición. Por otro lado el servicio 206 presenta 339 expediciones con este problema.

Para corroborar las causas de la ausencia de pulsos GPS encontrada, se utilizó el archivo “Consolidado.xls”, generado por Transantiago, que identifica todas las interrupciones o problemas que hayan ocurrido en las calles, la fecha y horario en que ocurrieron, los servicios afectados, el lugar y tipo de incidente.

En base al corte temporal que se analiza en este estudio, se utilizó el archivo “Consolidado 2013”, el cual registra 37 incidentes que afectaron al servicio 506, en los días de estudio. De estos 37 incidentes, sólo uno es por falla de bus, en el periodo de tiempo que coincide con la expedición mostrada en la Figura 3.4 (línea de color negro), en donde se observa que el bus se queda detenido o avanza muy lentamente durante una hora y media y luego retoma el recorrido. En base a esto se eliminaron los registros en los paraderos siguientes a la ausencia de pulsos GPS, pues se entiende que una vez el bus haya fallado lo trasladan al terminal pasando

por los paraderos siguientes sin servicio disponible. Además, para este mismo servicio (506) se registran cuatro incidentes de tipo desvío en la ruta, los cuales coinciden con los paradero-periodo-día en que 37 expediciones presentan ausencia de pulsos GPS. Luego se supone que las faltas de registros GPS de las 26 expediciones restantes se deben a problemas tecnológicos, pues la ausencia de pulsos de estas es en a lo más dos paraderos, lo que descarta la posibilidad de falla de bus.

Figura 3.4: Gráfico de trayectoria 506



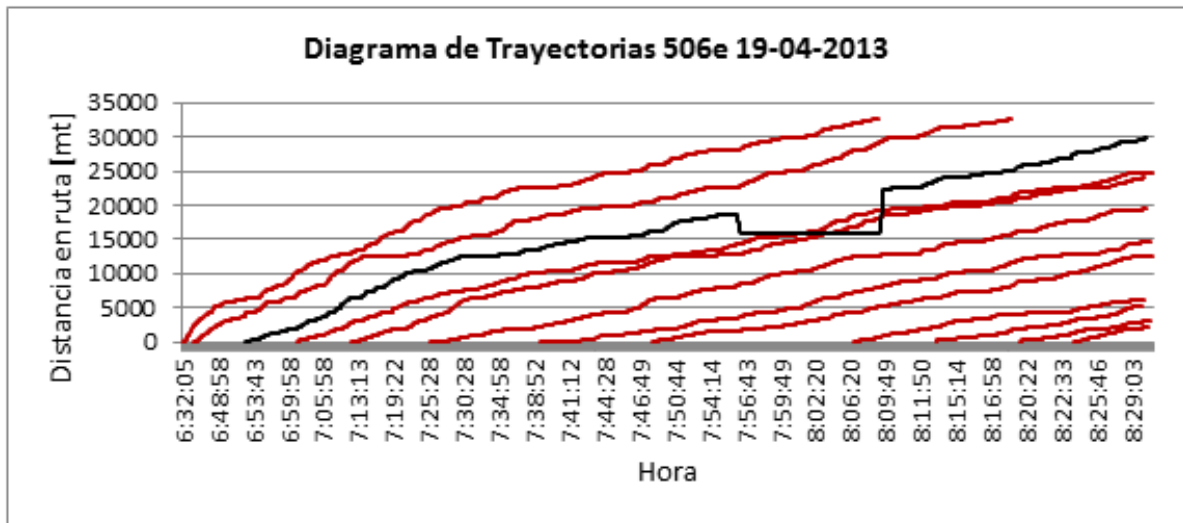
Para el servicio 506e se registran sólo dos incidentes, ambos de tipo desvío en la ruta, los cuales coinciden con dos paraderos-periodos-días en que siete expediciones presentan ausencia de pulsos GPS. De las dos expediciones restantes, una de ellas se supone con problemas de GPS, ya que se ausenta en un solo paradero en medio de la ruta, mientras que la otra se salta seis paraderos, lo que podría deberse a una falla de bus, no obstante, al graficar su recorrido (ver Figura 3.5) se observa un retroceso de cerca de tres kilómetros, una permanencia de alrededor de doce minutos en el mismo lugar, luego un avance de más de cinco kilómetros de manera casi instantánea y finalmente una trayectoria esperada si es que no hubiese falla del bus, lo cual hace suponer que esta expedición también presenta fallo tecnológico o del GPS.

Para el servicio 206 se registran 13 incidentes de tipo irregularidad en la ruta. Se analizaron diagramas de trayectoria, de todas aquellas expediciones que presentan ausencia de pulsos GPS en más de seis paraderos y no se encontró ninguna anomalía en los caminos de estas, por lo que todas las ausencias de pulsos, se supone, son causadas por fallo del GPS o de la tecnología utilizada en este.

Los gráficos de trayectoria se construyeron en base a la tabla “Posicionamiento”, la cual almacena los tiempos GPS de los buses en la ruta.

Por velocidad de la expedición: Por cada paradero fueron eliminados aquellos cortes espacio-temporales en que la velocidad de alguna expedición entre el paradero anterior y el paradero evaluado haya superado los 75 Km/hr, lo cual se explica por errores de proyección de los pulsos GPS en la ruta, por diseño de esta. En el servicio 506 se encontraron 162 (0,2%) registros

Figura 3.5: Gráfico de trayectoria 506e



que cumplieran con la condición, en el servicio 506e se registran 7 (0,12%) observaciones con esta característica y en el servicio 206 se registran 16 (0,05%) observaciones que superan la velocidad indicada.

Por flujo de buses: Se eliminaron aquellos cortes espacio-temporales en que se registra sólo una expedición, ya que esto no permite evaluar regularidad entre buses.

Luego de aplicar los criterios antes nombrados, se obtienen 73.648 registros para el servicio 506, 6.796 registros para el servicio 506e y 25.941 registros para el servicio 206. En la Tabla 3.5 y 3.6 se observa el número de registros, expediciones y cortes espacio-temporales que fueron filtradas de la base de datos según los criterios nombrados anteriormente.

Tabla 3.5: Registros y expediciones filtradas

Servicio	506		506e		206	
Criterio	Registros Eliminados	Expediciones eliminadas	Registros Eliminados	Expediciones eliminadas	Registros Eliminados	Expediciones eliminadas
Distancia Recorrida	96 (0,1%)	30 (3%)	25 (0,3%)	7 (3,6%)	16 (0,05%)	8 (1,2%)
Paraderos	2444 (3,1%)	-	648 (8,3%)	-	2383 (7,9%)	-
Ausencia de pulsos GPS	476 (0,6%)	1 (0,1%)	46 (0,6%)	-	1143 (3,8%)	-
Velocidad	531 (0,7%)	-	19 (0,24%)	-	63 (0,21%)	-
Flujo buses	388 (0,5%)	-	238 (3%)	-	485 (1,6%)	-

Tabla 3.6: Cortes espacio-temporales filtrados

Criterio/Servicio	506	506e	206
Paraderos	926 (4,7%)	276 (9%)	735 (6,6%)
Ausencia de pulsos GPS	135 (0,7%)	13 (0,4%)	687 (6,2%)
Velocidad	145 (0,7%)	7 (0,2%)	55 (0,5%)
Flujo de buses	388 (2%)	238 (7,7%)	485 (4,4%)

El intervalo de tiempo entre buses se calcula con los datos de la tabla “Cruce_paraderos”, que sobreviven a los filtros explicados anteriormente. Específicamente, por cada paradero se calcula el intervalo de tiempo, en minutos, que existe entre dos expediciones consecutivas del mismo servicio.

En la Figura 3.6 se muestra el intervalo promedio entre buses del servicio 506, en los diferentes paraderos y en todo el periodo de tiempo estudiado, donde se puede apreciar un intervalo consistente a lo largo de la ruta, pues todos están entre siete y ocho minutos, y por ende la frecuencia de buses en paraderos se mantiene más o menos constante. No así el coeficiente de variación, observado en la Figura 3.7, que aumenta a medida que el bus avanza en la ruta.

La Figura 3.8 muestra el intervalo promedio del servicio 506e (en los diferentes paraderos y en todo el periodo de tiempo estudiado), el cual se encuentra entre los 9,5 y 11 minutos, apreciándose consistencia en el valor, haciéndose notar descenso de un minuto aproximadamente hacia el final de la ruta y por ende un aumento en la frecuencia de buses. Por otro lado el coeficiente de variación de este último servicio, mostrado en la Figura 3.9, es poco concentrado a nivel de días, no obstante al igual que el servicio 506, la variabilidad del intervalo aumenta conforme aumenta el avance en ruta, dado que aumenta el coeficiente de variación y el intervalo promedio permanece constante.

La Figura 3.10 muestra el intervalo promedio del servicio 206 (en los diferentes paraderos y en todo el periodo de tiempo estudiado), en donde se hace notorio el aumento de este entre los paraderos 9 y 13 durante los días martes, jueves y viernes, lo cual se explica por posible presencia de feria libre en dichas calles. Desde que comienza el tipo de vía corredor en adelante el intervalo promedio es consistente entre siete y nueve minutos y por ende la frecuencia se mantiene más o menos constante entre los paraderos del servicio. El coeficiente de variación del intervalo del servicio 206 (ver Figura 3.11) es difuso entre los días al inicio del camino, no obstante desde el paradero 15 se presencia un aumento del coeficiente de variación del intervalo conforme aumento la posición del paradero en la ruta.

Se hace notar que los operadores de los servicios utilizados en este trabajo no utilizan sistema de control de flota o algún sistema que les permita corregir la irregularidad durante la ruta. Esto explica que a medida que se avanza en la ruta aumenta la variabilidad del intervalo.

Figura 3.6: Intervalo promedio 506

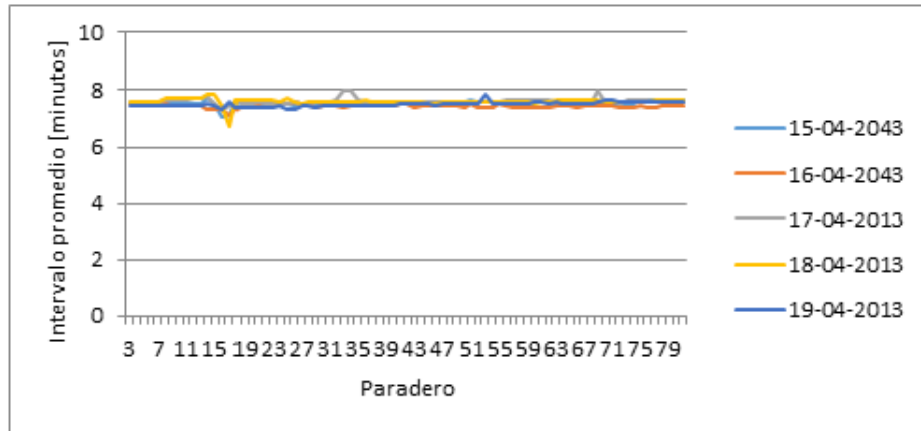


Figura 3.7: Coeficiente de variación 506

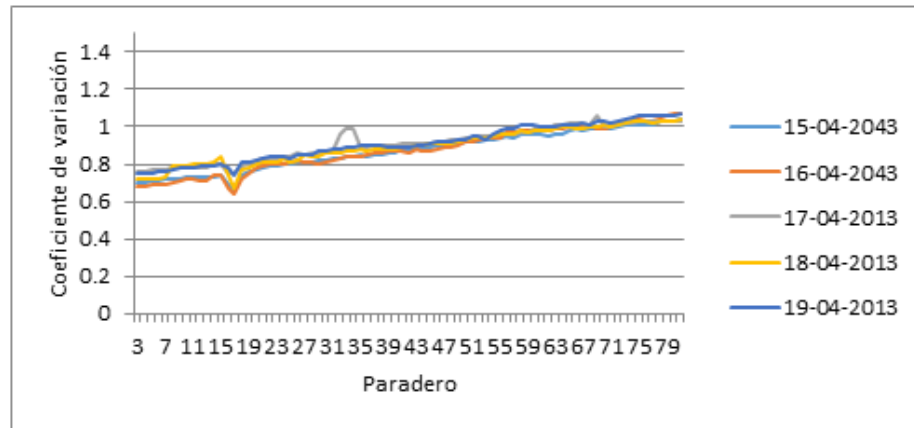


Figura 3.8: Intervalo promedio 506e

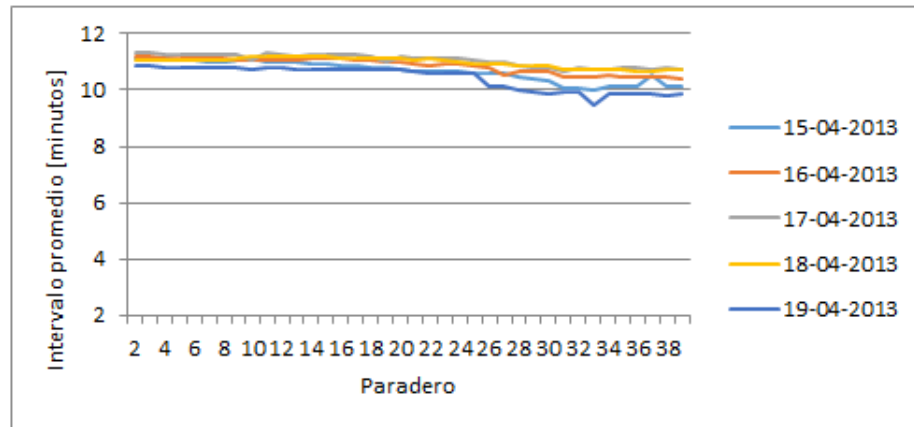


Figura 3.9: Coeficiente de variación 506e

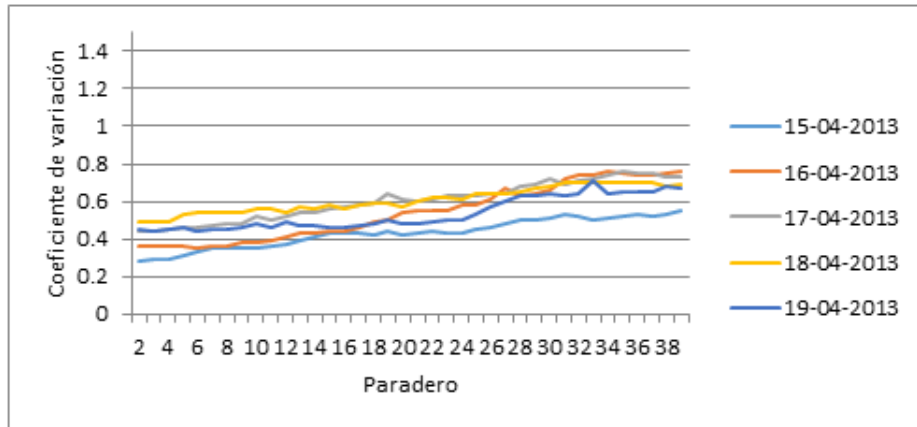


Figura 3.10: Intervalo promedio 206

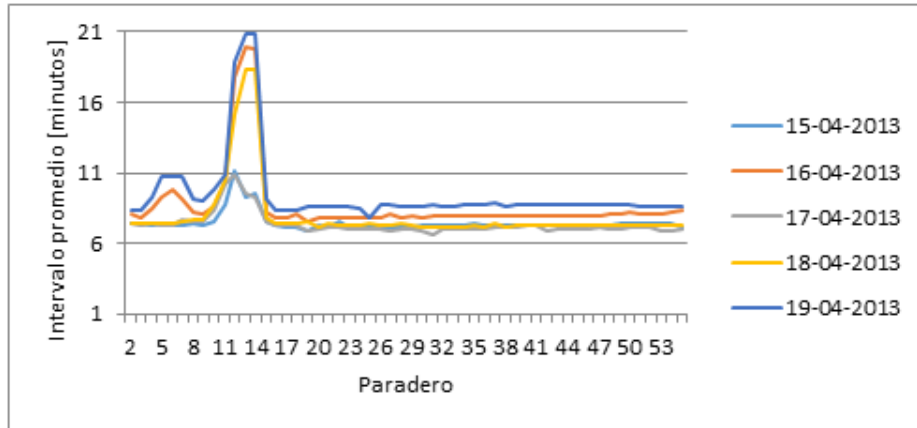
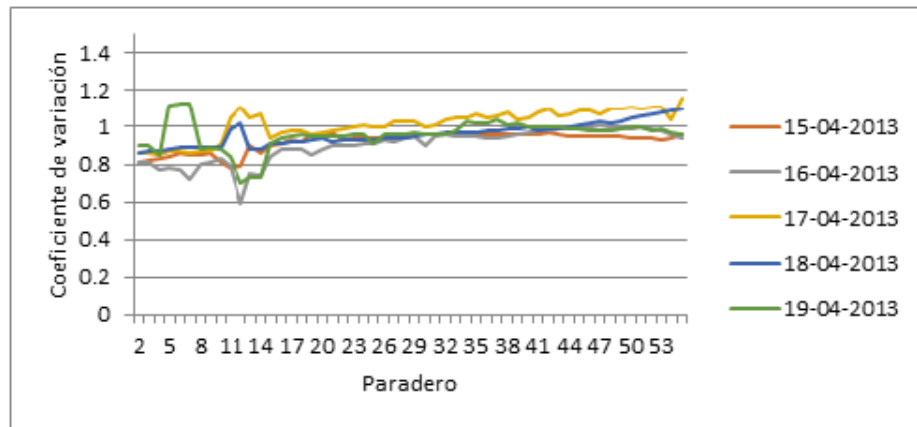


Figura 3.11: Coeficiente de variación 206



3.1.2.2. Frecuencia o flujo de buses programado

DTPM registra la frecuencia programada histórica, por medio de la cual se puede saber el número de buses que debieron ser despachados por cada servicio y cada periodo de tiempo. En la Tabla 3.7 se puede observar específicamente los campos que presentan dichos registros.

Tabla 3.7: Registro frecuencias de DTPM

Nombre	Descripción
Servicio	Código de servicio
Tipo de día	Laboral, sábado o domingo
periodo	Periodo de tiempo en la que se programa la frecuencia
Frecuencia	Número de buses por hora que deben ser despachados

3.1.2.3. Velocidad comercial

Velocidad comercial es entendida como la velocidad promedio, incluyendo todas las detenciones operacionales, como los paraderos, terminales y semáforos. La velocidad comercial de los servicios estudiados en este trabajo se obtiene de los datos que resultan de la metodología Cortés *et al.* (2011), que consiste primeramente en proyectar los pulsos GPS de los buses a la ruta que estos están sirviendo. Para simplificar el cálculo de la velocidad comercial Cortes et al utilizan una grilla equi-espaciada de largo D y de ancho T. Donde D representa la división espacial de la ruta y T periodo de tiempo. Luego se interpolan todas las trayectorias a los límites de cada cuadro de división espacio-temporal. La velocidad comercial es calculada por cada elemento de la grilla (cada tramo de 500 metros y periodo de media hora), y se estima como la suma de las distancias recorridas por las trayectorias que pasan por ahí dividida por la suma de los tiempos de todas las trayectorias que pasan por dicho elemento de la grilla.

La Figura 3.12 muestra una imagen que representa la grilla donde las trayectorias ya han sido rectificadas (los puntos grises representan los pulsos GPS ya proyectados a la ruta). Además Cortés *et al.* (2011) señalan la definición del rango de la condición del servicio mostrado en la Tabla 3.8.

Figura 3.12: Diagrama tiempo-espacio para las trayectorias de buses. Fuente: Cortés *et al.* (2011)

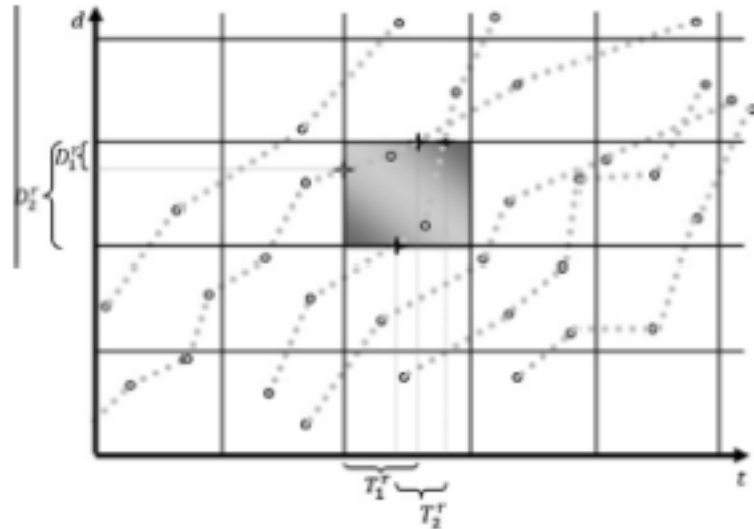


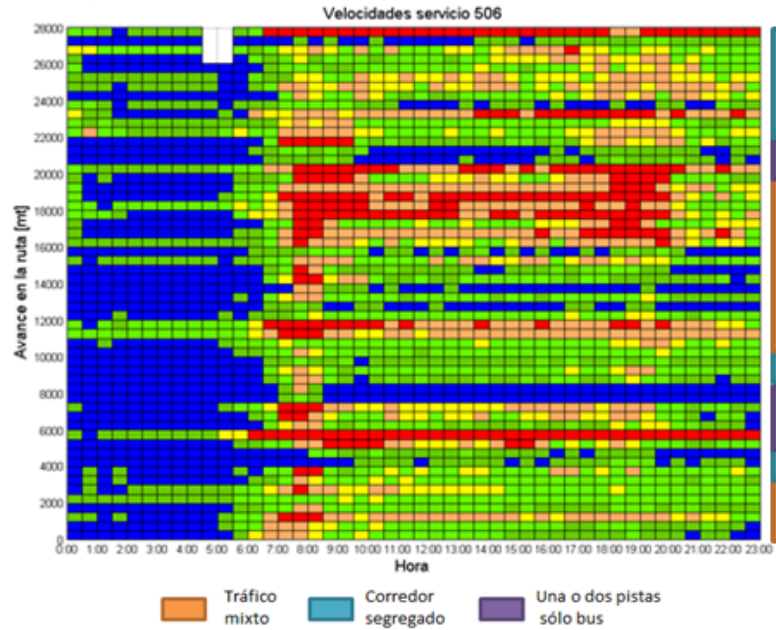
Tabla 3.8: Definición de rango de condición de servicio. Fuente: Cortés *et al.* (2011)

Condición	Velocidad [km/hr]	Color que identifica la velocidad
Muy mala	≤ 15	Rojo
Mala	> 15 a ≤ 19	Naranja
Poco aceptable	> 19 a ≤ 21	Amarillo
Razonable	> 21 a ≤ 25	Verde claro
Buena	> 25 a ≤ 30	Verde oscuro
Excelente	> 30	Azul

Finalmente la tabla de donde se extrae la velocidad comercial, de los servicios estudiados, contiene el servicio-sentido para el cual es calculada la velocidad comercial, metros recorridos al comenzar el tramo, periodo de media hora, velocidad comercial en base a la metodología de Cortés *et al.* (2011) y la desviación estándar de las velocidades comerciales correspondientes.

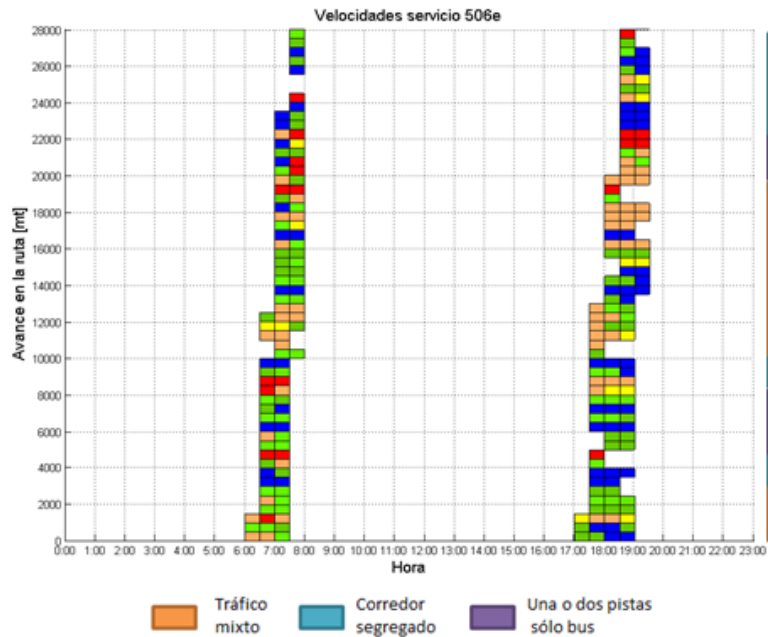
Para analizar el desempeño en la velocidad de los servicios estudiados se utiliza la Tabla 3.8 en gráficos de velocidad. En la Figura 3.13 se observa la velocidad comercial que presentó el servicio 506 en el periodo de tiempo estudiado. Se hace notorio el mal desempeño en velocidad que presenta el servicio en la segunda mitad del camino, lo cual coincide con el tramo en donde se visualizan autos estacionados de manera recurrente. Además en horarios de alta demanda (mañana y tarde) una mayor porción del recorrido es afectado por una mala velocidad en los servicios.

Figura 3.13: Velocidad servicio 506



En la Figura 3.14 se observa la velocidad comercial que presentó el servicio 506e en el periodo de tiempo estudiado. A diferencia del servicio regular, este presenta pocos tramos-periodos en que la velocidad comercial es igual o bajo 15 km/hr.

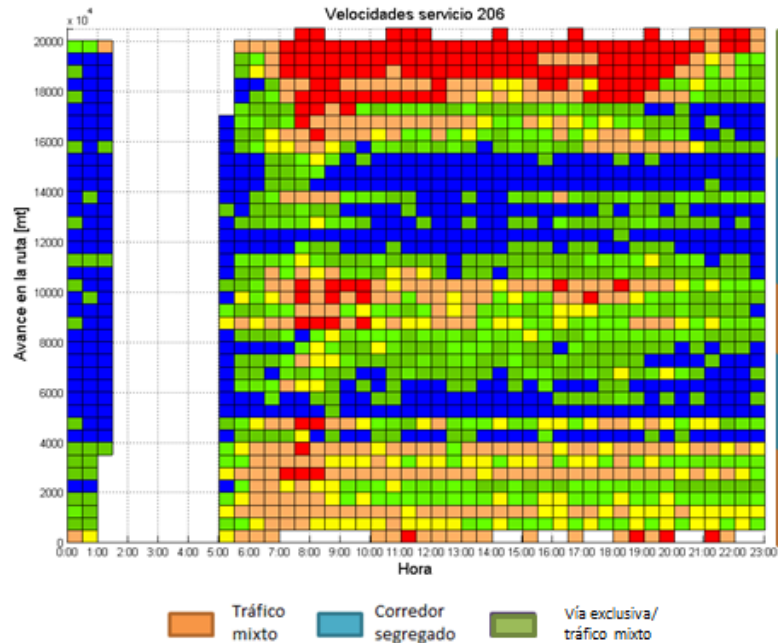
Figura 3.14: Velocidad servicio 506e



En la Figura 3.15 se observa la velocidad comercial que presentó el servicio 206 en el periodo de tiempo estudiado. Se hace notorio el mal desempeño en velocidad que presenta

el servicio hacia el final de la ruta (tramos cercanos al eje Alameda) y también se puede observar que la velocidad está sobre los 30km/hr en aquellos tramos donde se encuentra el corredor segregado. Además en horarios punta de la mañana se registra una disminución en la velocidad del servicio en algunos tramos.

Figura 3.15: Velocidad servicio 206



3.1.2.4. Subidas y bajadas

En Santiago el método de pago consiste en que cada pasajero tiene que hacer una transacción acercando su tarjeta al dispositivo de pago, cuando ingresa al bus, zona paga o metro. Cada viaje representa una tarifa que se descuenta del saldo de la tarjeta. La información recolectada para cada transacción incluye el id de la tarjeta y tipo de tarjeta (estudiante, adulto, tercera edad), código de bus o sitio donde se realizó la transacción, tiempo, fecha y monto de pago. Esta base de datos junto a la del sistema de localización automática de vehículos permite obtener la localización de las transacciones y con ello el número de subidas por cada paradero. No obstante es necesario estimar la localización de bajada de los usuarios, por consiguiente para obtener el número de bajadas por paradero se toman los datos obtenidos con la metodología Munizaga y Palma (2012), que se basa en seguir una cadena de viajes de una tarjeta e identificar la posición de bajada (de bus o metro) mirando la posición y el tiempo de la próxima subida de esta.

La Figura 3.16 muestra el total de subidas en el corte temporal estudiado (cinco días), por cada servicio y periodo de media hora. Se puede observar que el servicio 506 es el que presenta mayor demanda con dos periodos de tiempo (uno en la mañana y otro en la tarde) más cargados de pasajeros, en los cuales funciona el servicio exprés 506e. Mientras que el servicio 206 presenta un solo periodo de tiempo (en la tarde) más cargado de pasajeros.

En la Figura 3.17, 3.18 y 3.19 se muestra el total de subidas por día y periodo de media hora, de los servicios 506, 506e y 206 respectivamente. De los dos primeros servicios se puede observar que el nivel de demanda es homogénea entre los diferentes días. Caso diferente es el del servicio 206, observado en la Figura 3.19, el cual no registra demanda en los días martes, jueves y viernes entre las 8:00 y 15:00 horas. Esta situación se debe a que durante ese horario el servicio 206 es registrado con otro código de línea, porque la ruta se ve afectada y desviada de su camino normal, por algún motivo como ferias o arreglos en la vía.

Figura 3.16: Total subidas por servicio

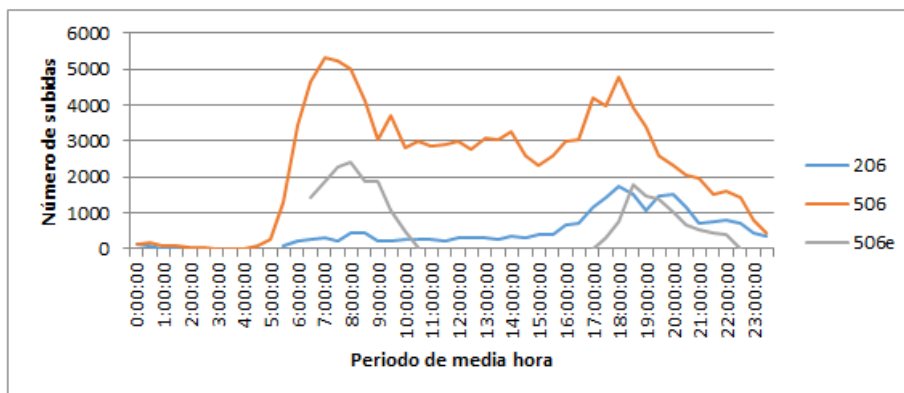


Figura 3.17: Total subidas servicio 506

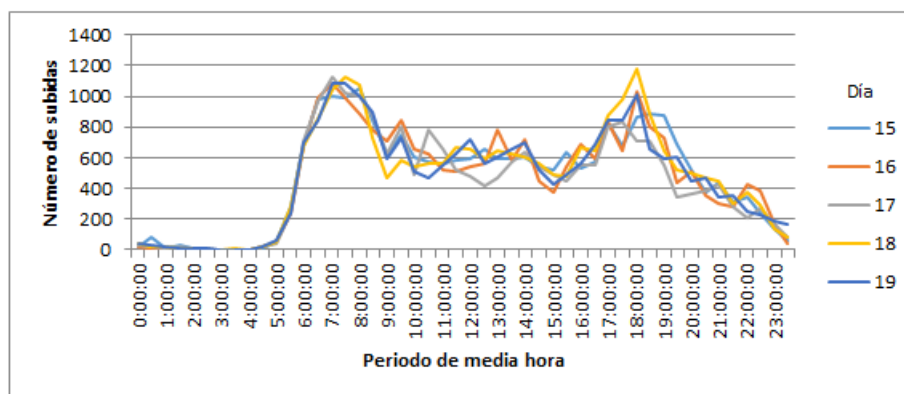


Figura 3.18: Total subidas servicio 506e

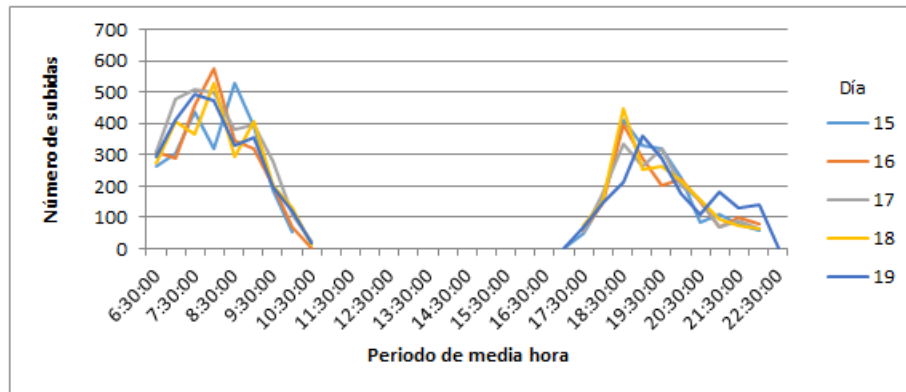
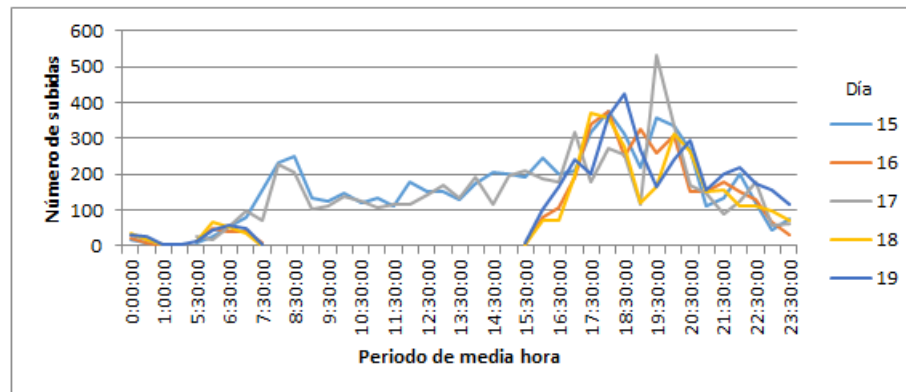


Figura 3.19: Total subidas servicio 206



3.1.2.5. Incidentes

DTPM maneja un archivo Excel llamado “Consolidado” que identifica todas las interrupciones o problemas que hayan ocurrido en las calles. Dentro del tipo de incidentes se identificaron los siguientes: irregularidad en ruta, congestión, desvío no programado y bus en pana. De estos sólo interesan los últimos dos, puesto que irregularidad en ruta es el problema que se estudia, por lo tanto se desea saber cómo influyen los incidentes en este y la congestión es analizada con los datos de velocidades.

En la Tabla 3.9 se puede observar el número de incidentes por cada tipo y servicio, dentro del periodo de tiempo estudiado. Se hace notar que para el servicio 506 y 206 el mayor número de registros corresponden a irregularidades en ruta, mostrando así la importancia del problema en cuestión.

Tabla 3.9: Número de registros de incidentes entre 15-04-2013 y 19-04-2013

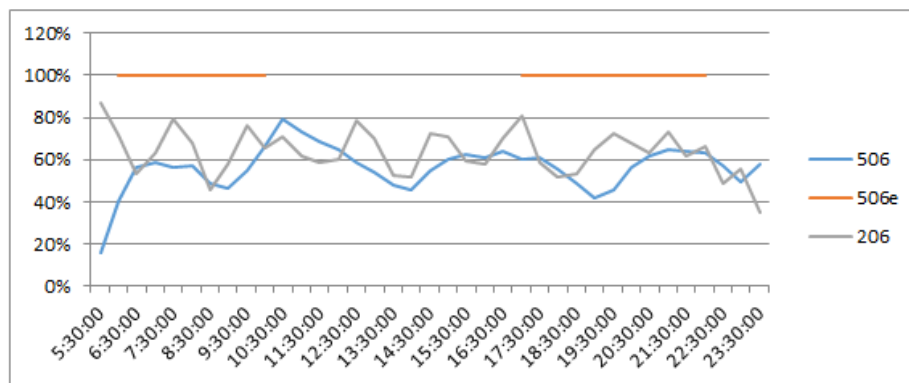
	Irregularidad en ruta	Congestión	Desvío no programado	Bus en pana
506	31	1	4	1
506e	0	0	2	0
206	13	0	0	0

3.1.2.6. Tipo de bus

Los buses se pueden clasificar en articulados y no articulados y según su número de plaza. El número de plaza de un bus se entiende como la capacidad que este tiene para transportar a las personas, en el caso de Santiago aquellos buses que poseen más de 160 plazas son buses articulados. DTPM posee el archivo “Registro patentes 2013.xlsx” que permite identificar la placa patente, el año de matrícula y el número de plaza de cada bus que opera en el sistema.

Cruzando la tabla de registros de patentes de DTPM y la tabla cruce_paraderos (Tabla 3.4), se puede obtener el porcentaje de buses articulados por media hora, de cada servicio evaluado en los días estudiados (ver Figura 3.20). Tanto el servicio 506 como 206 presentan entre 40 % y 80 % de buses articulados a lo largo del día, mientras que el servicio 506e utiliza flota de tipo articulada solamente.

Figura 3.20: Porcentaje de buses articulados por servicio



3.1.2.7. Tiempo de semáforos

Los semáforos instalados en Santiago, en su mayoría, operan con planes de tiempo prefijados. Cada plan engloba un conjunto de tiempos de operación previamente definidos, con información histórica de tránsito. Se fijan planes de tiempo que permiten el supuesto de que los volúmenes de flujo son estables con pequeñas variaciones dentro de cada periodo y, por ende, los tiempos de ciclo y de verde se mantienen como valores óptimos dentro de todos los horarios del plan. La coordinación de los semáforos se realiza mediante un sistema de redes, donde los semáforos que pertenecen a una misma red presentan coordinación entre

ellos. Cada una de las redes utiliza distinto número de planes de distinta duración y conjunto de horarios.

Para obtener los tiempos de ciclo y de verde de los semáforos se realizaron visitas a la UOCT (Unidad Operativa de Control de Tránsito), de donde se obtuvieron planillas con los tiempos de semáforos pertinentes a los casos de estudio, según plan horario.

3.2. Caso Gatineau

3.2.1. Descripción del caso de estudio

A diferencia del sistema presente en Santiago, los buses del sistema público de Gatineau son operados mediante itinerario programado. Es por esto que indicadores de puntualidad son de mayor relevancia que indicadores de regularidad para cada servicio por separado, no obstante la regularidad cobra bastante relevancia en el Rapibus, sistema Bus Rapid Transit (BRT) de Gatineau, puesto que los paraderos de este sistema experimentan una alta frecuencia de buses, que tienen rutas comunes, durante horarios de alta demanda, lo cual se puede verificar en los gráficos de frecuencia programada promedio en paraderos, por cada servicio utilizado en este estudio, en las Figuras 3.21 y 3.22.

Figura 3.21: Frecuencia programada por servicio en tramo dirección sur

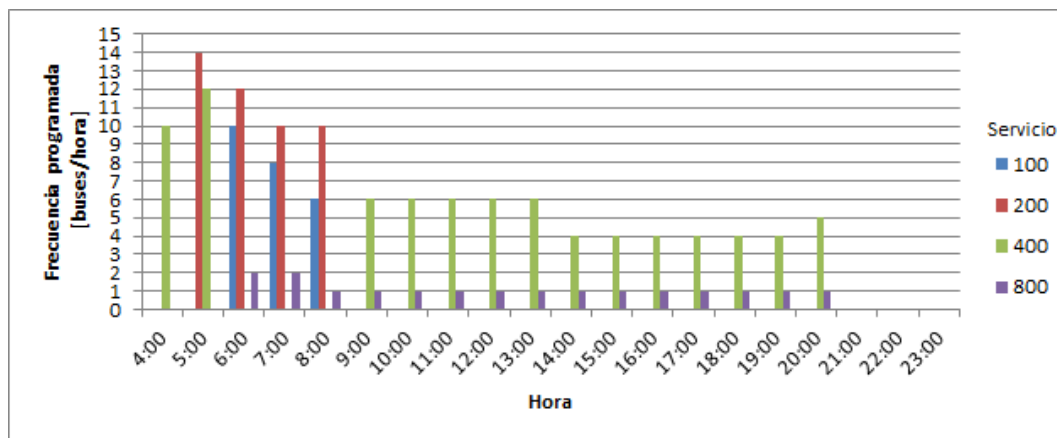
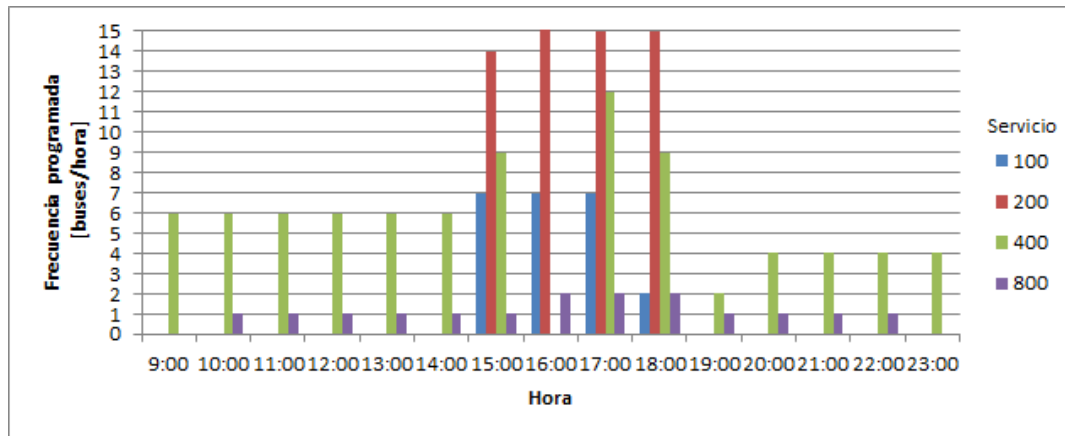
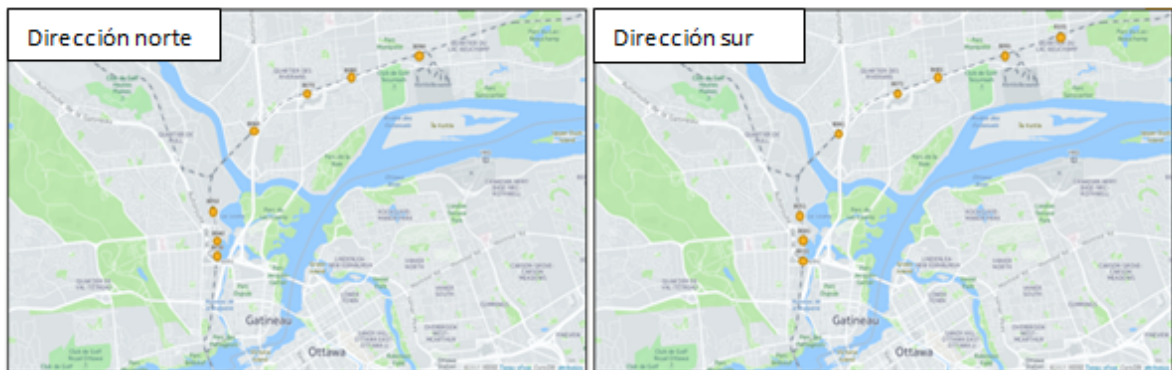


Figura 3.22: Frecuencia programada por servicio en tramo dirección norte



Este estudio se enfoca en evaluar la regularidad entre los buses de cuatro líneas comunes dentro del Rapibus que fue construido e implementado en el año 2013 en Gatineau. Este BRT presenta más de 12 kilómetros de largo reservados exclusivamente para buses, que conectan la ciudad de Gatineau con la ciudad de Ottawa. En este caso se le da énfasis al efecto que tiene la demanda (a nivel desagregado) en la variabilidad de los intervalos, más que variables de operación como en el caso de Santiago.

Figura 3.23: Paraderos del Rapibus, Gatineau



En la Figura 3.23 se presentan los paraderos considerados en este estudio (círculos naranjos), la imagen de la derecha muestra los paraderos de la dirección sur y la imagen de la izquierda muestra los paraderos que están en dirección norte.

Los servicios considerados, que pasan por los paraderos estudiados, son el 100, 200, 400 y 800, en dirección norte a sur y sur a norte (ver Figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27). Los dos primeros funcionan en periodo punta (entre las 6:00 y las 9:00 horas y entre las 15:00 y 18:00 horas) de lunes a viernes, mientras que los otros dos servicios funcionan todos el día, el 400 desde las 9:00 horas en dirección norte y desde las 4:00 horas en dirección sur, exceptuando el periodo entre las 15:00 y las 17:30 horas en dirección norte y el 800 desde las 6:00 horas en dirección sur y desde las 10:00 horas en dirección norte. Estos servicios funcionan con

itinerario programado, no obstante en horarios de alta demanda los tiempos estipulados, en general, no son respetados. Los datos en estudio consideran todos los días laborales del mes de septiembre del 2014.

Figura 3.24: Ruta servicio 100

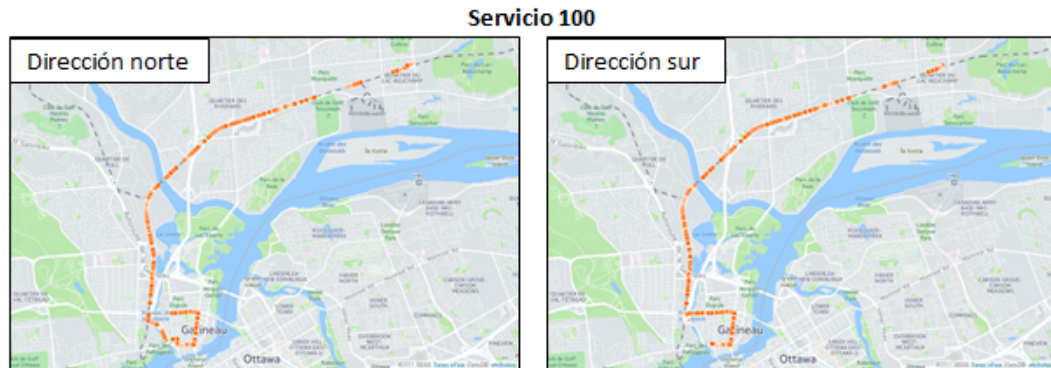


Figura 3.25: Ruta servicio 200

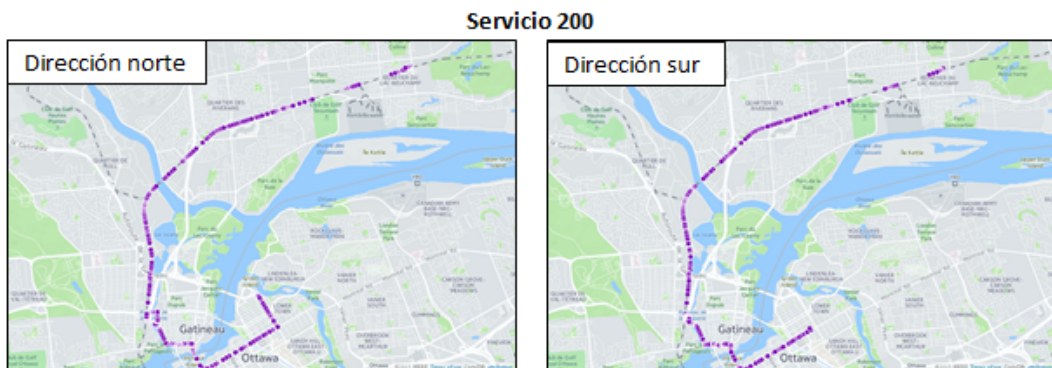
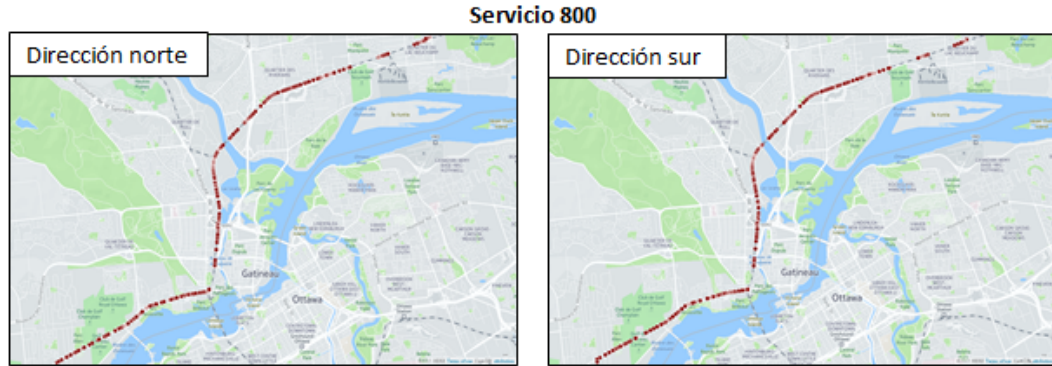


Figura 3.26: Ruta servicio 400



Figura 3.27: Ruta servicio 800



El largo del segmento estudiado en el sentido norte es de 6,3 km, mientras que en el sentido sur es de 8,6 km. La distancia promedio entre paraderos es de 1,36 km para el sentido norte y 1,39 km para el sentido sur.

La geometría de los paraderos se puede dividir en dos, aquellos que sólo tienen un lugar de detención de buses y aquellas que tienen dos o más sectores de detención de buses (ver Figura 3.28). En dirección sur se encuentran dos paraderos con dos o más zonas de detención, mientras que en dirección norte se encuentra uno.

En el tramo estudiado se tiene nueve intersecciones semaforizadas (tanto en el sentido norte como en el sentido sur) que poseen sensores para activar las luces y dar prioridad a los buses del rapibus, ya sea extendiendo el tiempo de luz verde o acortando el tiempo de luz roja.

Figura 3.28: Tipo de paradero según cantidad de sectores de detención



3.2.2. Generación de datos para los buses

En esta sección se identifican y describen estadísticamente aquellos datos utilizados en el presente estudio, caso Gatineau.

3.2.2.1. Expediciones e intervalos de tiempo

Para obtener las expediciones se utiliza la información del sistema de AFC de Gatineau, la cual permite identificar expediciones y saber el instante de la primera y última validación, cuando el bus se detiene en un paradero. La desventaja de obtener los instantes de pasada por este medio, es que no se pueden identificar aquellos tiempos en que ningún pasajero subió al bus. En base a este problema se decide trabajar con datos comprendidos en los horarios más cargados del día que son, en dirección sur entre las 6:00 y las 9:30 horas, y en dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas.

En la Tabla 3.10 se pueden observar los atributos que contienen los datos provenientes del

sistema AFC de Gatineau.

Las expediciones se identifican mediante el servicio, la dirección y el tiempo y fecha de partida de la expedición, obteniéndose así un total de 4.222 expediciones. Como no se puede obtener el instante de pasada de cada expedición por todos los paraderos (sólo de aquellos donde suben pasajeros al bus), se decide realizar una interpolación lineal entre el instante registrado anterior y posterior al tiempo ausente. En la Tabla 3.11 se muestra un ejemplo de tramo de una expedición y los instantes ausentes que deben ser interpolados.

Tabla 3.10: Datos provenientes del sistema AFC en Gatineau

Nombre	Descripción
NumCarte	Número de tarjeta
HeureComp	Tiempo de la transacción
datecomp	Fecha de la transacción
typeTran	Tipo de transacción (primero o transbordo)
NumVoiture	Identificador de bus
NUM_LI	Línea o servicio
Direction	Dirección (norte o sur)
heureLigne	Tiempo de partida de la expedición
NumJour	Día laboral: 1 Sábado: 6 Domingo:7
NummArret	Número de paradero
dateligne	Fecha de partida de la expedición

Tabla 3.11: Tramo de expedición 84 e instantes de pasadas por paraderos

Expedición	Servicio	Dirección	Paradero	Tiempo mínimo de validación	Tiempo máximo de validación
84	100	Sur	3		
84	100	Sur	4	17:42:51	17:42:53
84	100	Sur	5	Interpolar	
84	100	Sur	6	17:45:11	17:45:13
84	100	Sur	7	Interpolar	
84	100	Sur	8	Interpolar	
84	100	Sur	9	17:49:44	17:49:44

La interpolación lineal se obtiene con la ecuación (3.1), donde $f(x)$ es el tiempo estimado en que el bus pasa por el paradero, $f(x_1)$ tiempo máximo de validación del registro de instante de pasada anterior, $f(x_2)$ tiempo mínimo de validación del registro de instante de pasada posterior, x distancia recorrida entre el punto de inicio del camino y el paradero evaluado, x_1 distancia recorrida entre el punto de inicio del camino y el paradero anterior al evaluado que presenta instante de pasada y x_2 distancia recorrida entre el punto de inicio del camino y el paradero posterior al evaluado que presenta instante de pasada.

$$f(x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} * (x - x_1) \quad (3.1)$$

Para obtener la distancia entre el punto de partida y cada paradero se utilizan los puntos latitud, longitud del recorrido de cada servicio (información registrada en unos de los archivos GTFS). Con estos datos se computó la distancia de coordenadas esféricas entre cada par de puntos consecutivos, permitiendo obtener la distancia recorrida en cada coordenada registrada del camino. Como los puntos latitud, longitud de los paraderos no coinciden con los puntos latitud, longitud del recorrido, se aproximó el valor de la distancia recorrida del paradero a la distancia recorrida del punto latitud, longitud del camino más cercano a este. El error de esta aproximación, es calculado como la distancia de coordenadas esféricas entre las coordenadas del paradero y las del punto más cercano a éste. En la Tabla 3.12 se muestran los valores estadísticos del error de esta medición, por cada servicio utilizado en este estudio.

Finalmente en número de registros de expedición, paradero, instante de pasada es de 22.750 en los paraderos y corte temporal estudiado.

Tabla 3.12: Error de la aproximación de distancia recorrida en cada paradero

Servicio	Dirección	Error promedio	Error mínimo	Error máximo
100	Norte	0,72 m	0,2 m	1,12 m
100	Sur	0,76 m	0,4 m	1,12 m
200	Norte	0,84 m	0,2 m	1,62 m
200	Sur	0,77 m	0,38 m	1,53 m
400	Norte	0,8 m	0,2 m	1,62 m
400	Sur	0,82 m	0,38 m	1,53 m
800	Norte	0,67 m	0,15 m	1,1 m
800	Sur	0,55 m	0,01 m	1,02 m

Como no se puede estimar un tiempo de pasada del bus en paraderos anteriores al primer instante de pasada registrado de la expedición ni en paraderos posteriores al último instante de pasada registrado de la expedición, se tienen 1.639 periodos de media hora-paradero-día-dirección en que hay uno o más instantes de pasadas ausentes y por ende no fueron considerados en este trabajo, debido a que este caso inhabilita la obtención de intervalos de tiempo certeros. También se filtraron aquellos periodos de media hora-paradero-día-dirección en que se observa un solo registro, puesto que en este caso no es posible obtener variabilidad de intervalos. Luego en el estudio se consideran un total de 8.687 registros de instantes de pasada por paradero.

Tabla 3.13: Registros y expediciones filtradas

Criterio	Registros Eliminados
Ausencia de pulsos GPS	13.976 (61.4 %)
Flujo buses	87 (0.4 %)

El intervalo de tiempo entre buses se calcula con los datos obtenidos de los tiempos registrados e interpolados que sobreviven a los filtros mostrados en la Tabla 3.13. Por cada paradero se calcula el intervalo de tiempo, en minutos, que existe entre dos expediciones consecutivas que no son necesariamente del mismo servicio, puesto que el objetivo de análisis de este caso es el de líneas comunes.

En la Figura 3.29 y 3.30 se muestra el intervalo promedio por semana del mes de septiembre, numeradas del uno al cinco, y paradero, numerados por orden de aparición en el camino de los servicios, del tramo dirección norte y sur respectivamente. El intervalo promedio del tramo dirección norte presenta valores poco consistentes entre los diferentes paraderos variando entre 5 y 11 minutos, mientras que el intervalo promedio del tramo dirección sur se encuentra entre 2 y 3 minutos, apreciándose un valor consistente entre los diferentes paraderos. Además se hace notar que el intervalo promedio del tramo dirección norte tiene una alta variabilidad entre las diferentes semanas en comparación con el del tramo sur. Dado esto y la baja frecuencia de buses observada en el tramo dirección norte (intervalo promedio observado entre seis y once minutos versus intervalo promedio observado de dos minutos en la dirección opuesta) se puede decir que la metodología descrita para obtener las diferentes expediciones y el tramo de Rapibus seleccionado no permitieron capturar todos los viajes que se operaron en la ventana espacio-temporal estudiada. Luego se decide generar los modelos de regresión lineal múltiple utilizando solamente datos del tramo dirección sur.

En la Figura 3.31 y 3.32 se muestra el coeficiente de variación del intervalo en cada paradero y semana del corte temporal estudiado. Mediante estos gráficos se puede observar que a diferencia del caso de Santiago, el coeficiente de variación del intervalo no sigue un patrón de aumento hacia el final de la ruta, mas aún en algunas semanas disminuye en los últimos paraderos. Para verificar si existe un patrón en la variabilidad de los intervalos entre buses consecutivos se graficó la desviación estándar de estos (ver Figuras 3.33 y 3.34), lo que permite observar que no existe un patrón claro de aumento o disminución de variabilidad hacia el final de la ruta, puesto que al igual que el coeficiente de variación la desviación estándar hacia el final de la ruta algunos días disminuye y otros días aumenta. También se hace notar que el tramo de dirección sur presenta un mayor coeficiente de variación y menor desviación estándar de intervalos y con valores más compacta entre las diferentes semanas que el de dirección norte.

Figura 3.29: Intervalo promedio dirección norte

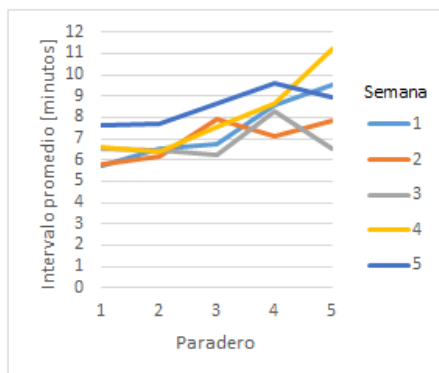


Figura 3.30: Intervalo promedio dirección sur

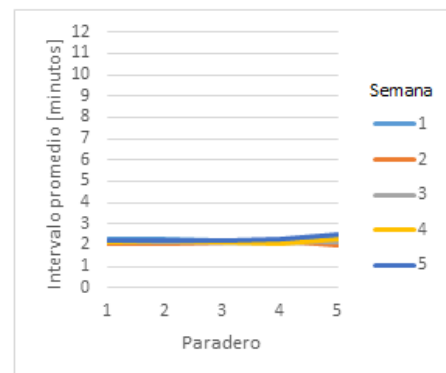


Figura 3.31: Coeficiente de variación de intervalo dirección norte

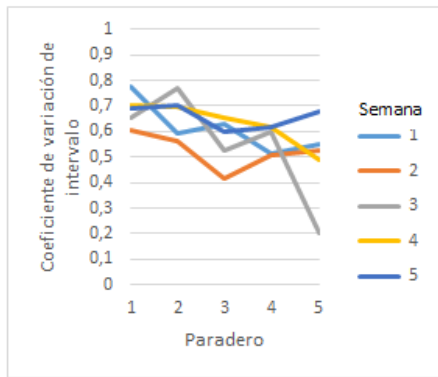


Figura 3.32: Coeficiente de variación de intervalo dirección sur

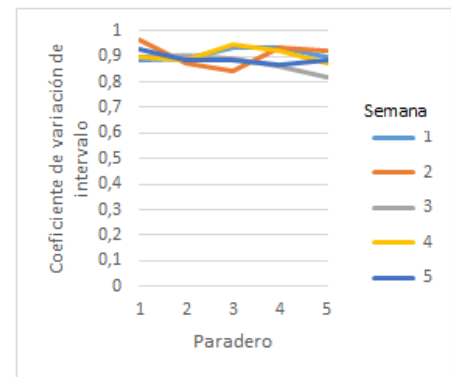


Figura 3.33: Desviación estandar de intervalo dirección norte

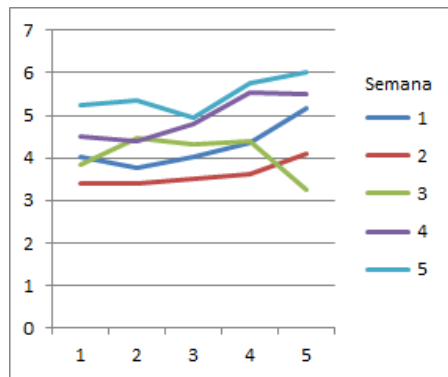
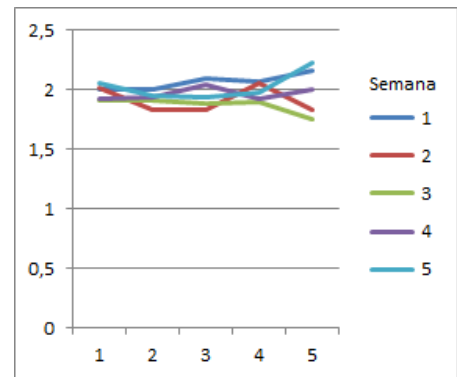


Figura 3.34: Desviación estandar de intervalo dirección sur



3.2.2.2. Frecuencia o flujo de buses programado

STO define por medio de datos GTFS el número de viajes que deben realizarse por cada servicio-dirección en cada día, identificando para cada uno de estos recorridos el horario en que el bus debe llegar a cada paradero de la ruta. Por medio de esta información es posible obtener el número de buses por hora que deben pasar por cada paradero.

3.2.2.3. Subidas y bajadas

Al igual que en la ciudad de Santiago, en Gatineau el método de pago consiste en que cada pasajero debe acercar su tarjeta a un dispositivo de pago que se encuentra al interior del bus. Existen dos tipos de tarjetas, aquellas que son temporales y aquellas que son permanentes. Las tarjetas temporales permiten comprar pasajes para uno o más viajes o por algún periodo de tiempo (día, tres días, semana o fin de semana) para viajar de manera ilimitada durante dicho periodo, mientras que las tarjetas permanentes permiten, además de las posibilidad

que ofrece la tarjeta temporal, pagar la tarifa por mes (permite viajar de manera ilimitada durante un mes) o por semestre (permite viajar de manera ilimitada durante un semestre). La información recolectada por cada transacción incluye los atributos nombrados en la Tabla 3.10, además del tipo de tarjeta que se puede dividir entre adulto, estudiante y tercera edad, información que permite obtener el número de subidas desagregada por cada paradero y periodo de media hora.

En la Figura 3.35 se puede observar que en dirección norte, los periodos de tiempo más cargados se encuentran entre las 14:00 y las 18:00 horas, mientras que en dirección sur, los periodos de alta demanda están entre las 6:00 y las 9:00 de la mañana, lo cual se debe principalmente a que el lugar de trabajo de los habitantes en su mayoría está ubicado hacia el sur, por lo que los pasajeros deben viajar en esta dirección durante la mañana y en dirección opuesta en la tarde. También se hace notar que en dirección sur el nivel de demanda es significativamente superior al nivel observado en dirección norte, lo cual se puede explicar porque el tramo seleccionado no considera paraderos de dirección norte más utilizados por los usuarios, razón por la que se han escogido datos solamente del tramo dirección sur en el periodo de alta demanda para desarrollar modelos de regresión lineal. Se hace notar que la primera y última semana de septiembre del 2014 presentan menos de cinco días, por lo que se justifica que sus curvas de validaciones se encuentren más abajo que las del resto de las semanas.

Del total de validaciones, en los paraderos ubicados en el tramo dirección norte, en el periodo de tiempo más cargado (entre 14:00 y 18:00 horas), el 55 % son adultos, el 39 % son estudiantes y el 6 % pertenece a la tercera edad. Estos mismos valores para el tramo dirección sur, en el periodo respectivo (entre las 6:00 y las 9:00 horas), son 85 % para adultos, 14 % para estudiantes y 1 % para tercera edad. Para reforzar de manera visual lo dicho anteriormente, en las Figuras 3.25 y 3.29 se muestra el total de validaciones, por semana, en los paraderos ubicados en el tramo dirección norte y sur respectivamente, en el periodo de tiempo con mayor demanda (entre 14:00 y 18:00 horas en dirección norte y entre 6:00 y 9:00 horas en dirección sur), mientras que en el Anexo A.1. y A.2. se encuentra el total de validaciones desagregadas en adultos, estudiantes y tercera edad de ambas direcciones respectivamente.

Figura 3.35: Validaciones por semana y periodo de una hora

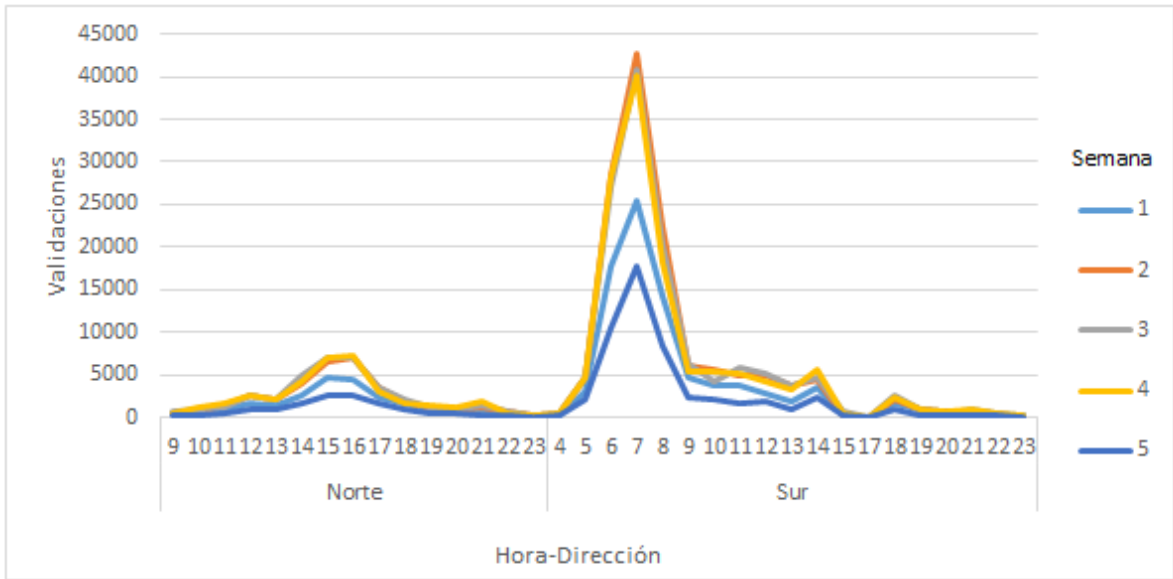


Figura 3.36: Validaciones por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas

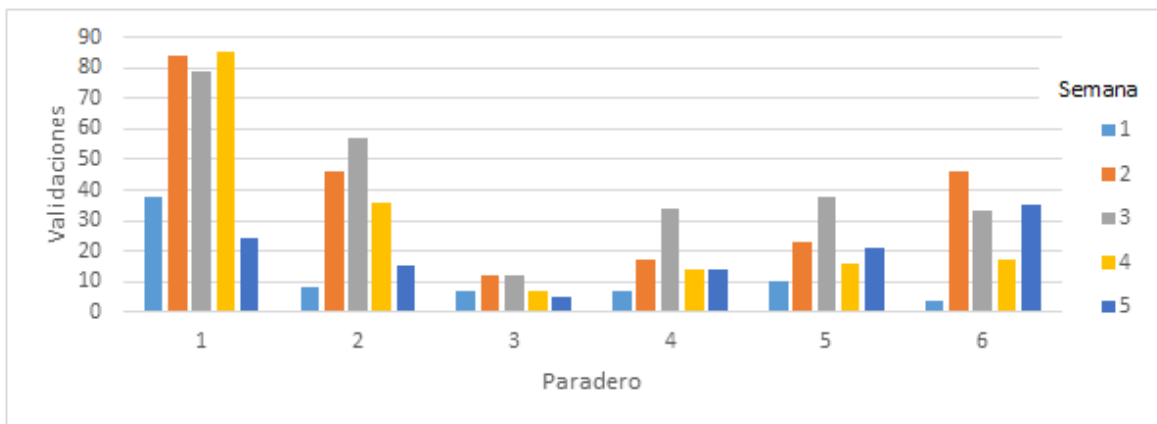
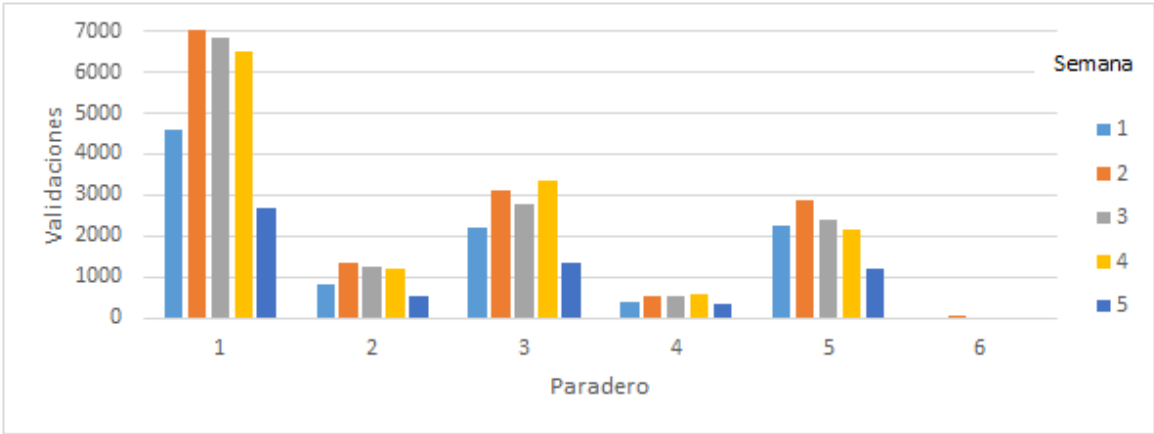


Figura 3.37: Validaciones por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas



Capítulo 4

Modelación

Con el objetivo de explicar el fenómeno apelotonamiento de buses se utilizan modelos de regresión lineal multivariada, de la forma en que se muestra en la ecuación (4.1), donde Z representa la variable dependiente o estudiada, x_i representan las variables explicativas o independientes y β_i son los coeficientes de cada variable. De esta manera se identifican los efectos de un conjunto de variables independientes sobre el fenómeno en estudio.

$$Z = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \quad (4.1)$$

Las observaciones se realizan en un nivel de agregación, que corresponde a la obtención de datos por paradero-periodo-día. En el caso Santiago, para el servicio 506 y 206 el periodo de tiempo utilizado es de media hora, excepto para el servicio 506 entre las 2:00 y las 5:00 horas, en que se utiliza un periodo agregado de tres horas. Por otro lado el nivel de agregación temporal para el servicio 506e es de una hora. En el caso Gatineau el periodo de tiempo es también de media hora. Los niveles de agregación temporal se definieron considerando que si una unidad espacio-temporal presenta una sola observación, no es posible estudiar la irregularidad de buses, luego el nivel de agregación temporal evita esta situación. En esta sección se definen y analizan las variables tanto dependientes como independientes de los modelos.

4.1. Variables dependientes

La parte empírica de este estudio está basada en servicios que operan por frecuencia (sin horario conocido por los usuarios) en el caso Santiago. En el caso Gatineau, se utilizan las expediciones de cuatro líneas comunes (que operan con itinerario programado que no es respetado), como un servicio de alta frecuencia, por lo que se supone los pasajeros pueden utilizar cualquier servicio y no programan sus llegadas a paraderos. Luego el foco es utilizar índices que permitan medir el problema de apelotonamiento de buses en estos casos.

Los índices deben capturar el efecto de irregularidad de buses solamente, por lo que se

descarta el uso del IPH debido a la inconsistencia que este presenta y que fue reportada por Fazhi et al. (2013). Con el objetivo de seleccionar uno o más indicadores como variable dependiente del modelo, se ilustra el comportamiento de los indicadores Y (ecuación 2.5), ICR-I (basado en la ecuación 2.6), IPO (ecuación 2.11), coeficiente de variación del intervalo y el tiempo de espera en exceso, que fueron definidos en la revisión bibliográfica. Se busca seleccionar indicadores que no se vean afectados por la frecuencia de buses y que representen de buena manera la intensidad del problema en estudio.

Para ilustrar el comportamiento de estos indicadores en diferentes niveles de intensidad del problema, se analizaron seis casos: 1) intervalo de tiempo entre buses constante, 2) intervalo de tiempo entre buses correspondiente a $4/3$ y $2/3$ del intervalo promedio entre cada par buses consecutivos, 3) intervalo de tiempo entre buses correspondiente a $3/2$ y $1/2$ del intervalo promedio entre cada par buses consecutivos, 4) buses que llegan en grupo de dos, 5) buses que llegan en grupo de tres y 6) buses que llegan en grupos de cuatro. Los casos 1, 2, 3 y 4 se analizaron en ventanas de tiempo de 20 minutos, mientras que los casos 5 y 6 fueron analizados en ventanas de tiempo de 30 y 40 minutos, respectivamente. Para evaluar cómo los indicadores capturan el efecto de frecuencia en el mismo nivel de intensidad de apaltonamiento de buses, se analizó cada caso en dos frecuencias de buses diferentes (seis buses por hora y doce buses por hora).

Los resultados obtenidos por los indicadores discretos son mostrados en la Figura 4.1. El valor del indicador Y incrementa con la intensidad del apaltonamiento de buses, en situaciones donde el problema es severo (casos 4, 5 y 6), sin embargo este indicador no captura los casos de baja intensidad de apaltonamiento de buses. Los valores del indicador ICR-I decrecen en los casos tres y cuatro, lo cual es consistente, puesto que indica más apaltonamiento de buses en estos casos que en los casos uno y dos. Sin embargo, en los casos cinco y seis, el indicador incrementa, indicando menos apaltonamiento de buses que en los casos tres y cuatro, lo cual es contradictorio. Esta contradicción permite concluir que el indicador ICR-I no representa de buena manera la intensidad del apaltonamiento de buses. El indicador Y presenta valores idénticos en ambos niveles de frecuencia para todos los casos de apaltonamiento de buses, mientras que el indicador ICR-I presenta valores diferentes para ambos niveles de frecuencia en el caso tres, lo cual sugiere que este último indicador captura efectos de la frecuencia además del apaltonamiento de buses. Finalmente los indicadores discretos presentan la ventaja de ser fáciles de entender porque sus resultados se expresan en términos porcentuales, permitiendo a una persona sin conocimiento estadístico entender el fenómeno.

Figura 4.1: Resultado de simulación de indicadores discretos

Caso	Ilustración	ICR-I		Y	
		f=6 [b/h]	f=12 [b/h]	f=6 [b/h]	f=12 [b/h]
1		1	1	0	0
2		1	1	0	0
3		0.5	1	0	0
4		0.5	0.5	0.5	0.5
5		0.66	0.66	0.66	0.66
6		0.75	0.75	0.75	0.75

Los resultados obtenidos por los indicadores continuos son presentados en la Figura 4.2, donde se puede observar que, como era esperado, los valores de los tres indicadores incrementan con la intensidad del apelsonamiento de buses en todos los casos. El indicador IPO y el coeficiente de variación (CV) presentan idénticos valores en ambos niveles de frecuencia para todos los casos de apelsonamiento de buses, mientras que el indicador de tiempo de espera en exceso presenta diferentes valores en ambos niveles de frecuencia para todos los casos de apelsonamiento de buses. Esto sugiere que este último indicador captura la frecuencia de buses además del efecto de apelsonamiento de buses y por ende se descarta su utilización como variable dependiente. En los casos más extremos de irregularidad (caso cinco y seis) el indicador IPO muestra un incremento porcentual mayor que el coeficiente de variación, mostrando que el indicador IPO captura de mejor manera la intensidad del apelsonamiento de buses. Adicionalmente, en estos casos extremos, el valor del indicador IPO es igual al número de buses que van agrupados, permitiendo una interpretación física, clara y directa, razones por las cuales se selecciona el indicador IPO como variable independiente para los modelos a desarrollar.

Figura 4.2: Resultado de simulación de indicadores continuos

Caso	Ilustración	IPO		CV		w_{exceso}	
		f=6 [b/h]	f=12 [b/h]	f=6 [b/h]	f=12 [b/h]	f=6 [b/h]	f=12 [b/h]
1		1	1	0	0	0	0
2		1.11	1.11	0.33	0.33	0.56	0.28
3		1.25	1.25	0.5	0.5	1.25	0.625
4		2	2	1	1	5	2.5
5		3	3	1.41	1.41	10	5
6		4	4	1.73	1.73	15	7.5

Finalmente para efectos de modelación se utiliza el indicador discreto Y y el indicador continuo IPO para representar el fenómeno de apelsonamiento de buses.

Se hace notar que el indicador IPO tiene una relación directa con el coeficiente de variación (cv) del intervalo, lo cual es una característica positiva, principalmente porque en la mayoría

de los estudios de irregularidad de buses ha sido utilizado este último, mostrando efectividad a la hora de medir el fenómeno. A continuación se presenta la demostración de dicha relación entre ambos indicadores:

Usando la fórmula de desviación estándar en el coeficiente de variación (cv) de los intervalos se obtiene la ecuación (4.2), donde h_i es el intervalo observado i , h^* el intervalo promedio y N el total de observaciones.

$$cv = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h^*)^2}{N}}}{h^*} \quad (4.2)$$

Luego ingresando h^* en la sumatoria del numerador y desarrollando el cuadrado de binomio de la ecuación (4.2), se llega a la ecuación (4.3).

$$cv = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{h^*}\right)^2}{N} - \frac{\sum_{i=1}^N \frac{2 * h_i * h^*}{h^{*2}}}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N 1}{N}} \quad (4.3)$$

En la ecuación (4.3) se distingue la definición del indicador IPO y además se simplifica el término h^* y N en la segunda y tercera división respectivamente, obteniendo la ecuación (4.4).

$$cv = \sqrt{IPO - \frac{\sum_{i=1}^N \frac{2 * h_i}{h^*}}{N} + 1} \quad (4.4)$$

En la razón de la ecuación (4.4) se identifica la fórmula de promedio de intervalo, la cual es expresada como h^* en la ecuación (4.5).

$$cv = \sqrt{IPO - \frac{2 * h^*}{h^*} + 1} \quad (4.5)$$

Finalmente simplificando las expresiones dentro de la raíz de la ecuación (4.5) se obtiene la ecuación (4.6).

$$IPO = cv^2 + 1 \quad (4.6)$$

El menor valor que puede tomar IPO es 1 y se presenta cuando todos los intervalos observados son iguales y por ende el coeficiente de variación es cero. Este caso base, en que los intervalos observados son iguales, el indicador discreto toma valor cero, puesto que indica que no hay variabilidad alguna en los intervalos.

Se calcularon los valores promedio del indicador discreto (Y) y el indicador continuo (IPO), para los servicios del caso Santiago y el tramo Rapibus del caso Gatineau, por cada paradero

de bus a lo largo de la ruta, día y periodo de tiempo de 30 minutos para el servicio 506, 206 y tramo Rapibus y periodo de tiempo de una hora para el servicio 506e. El promedio de los valores obtenidos son presentados en las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, donde cada celda está pintada con el valor del indicador correspondiente, de acuerdo a la escala mostrada en la parte derecha del diagrama, donde el color rojo representa alta intensidad de apelonamiento de buses y el color azul indica ausencia de apelonamiento de buses.

Figura 4.3: Indicador discreto de apelonamiento de buses para los servicios 506 y 506e

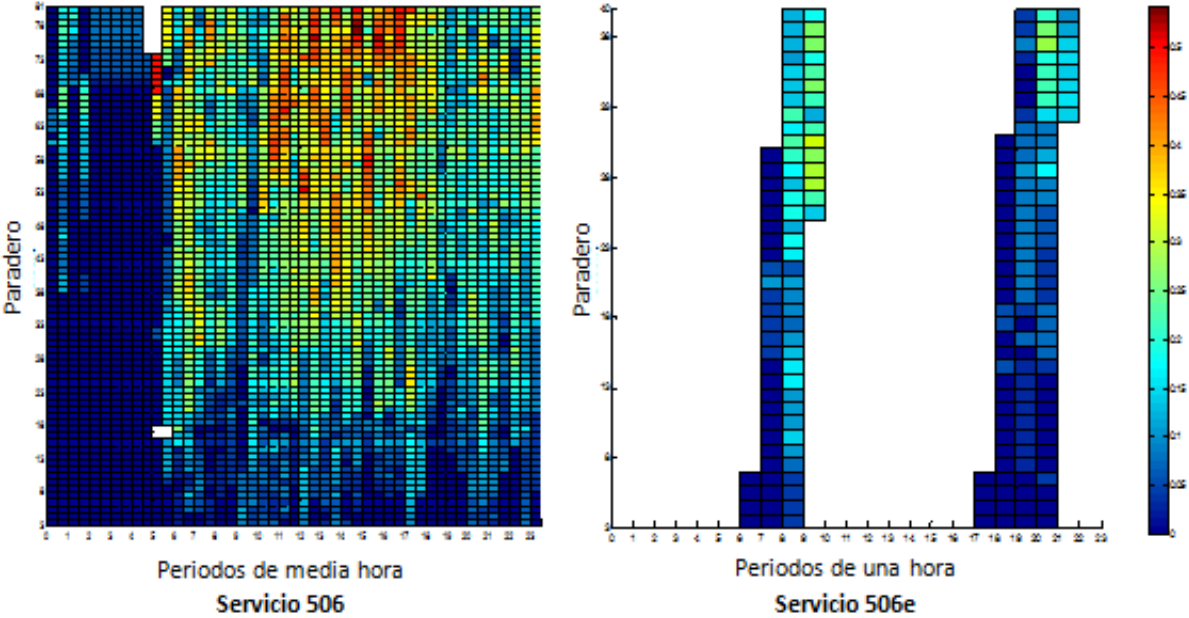


Figura 4.4: Indicador continuo de apelonamiento de buses para los servicios 506 y 506e

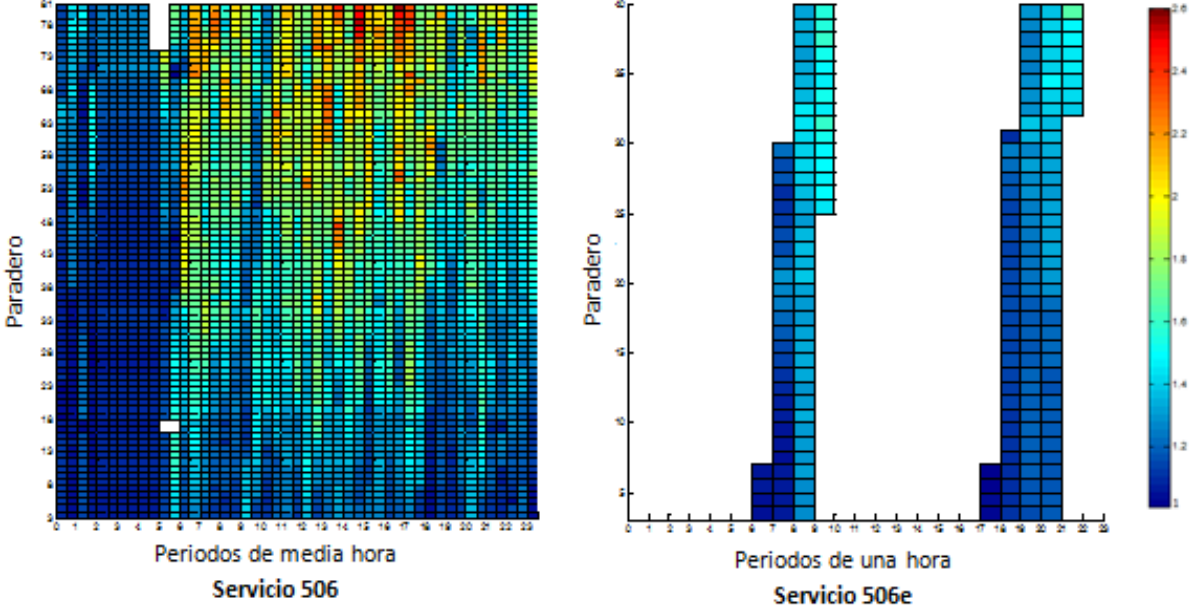


Figura 4.5: Indicador continuo y discreto del servicio 206

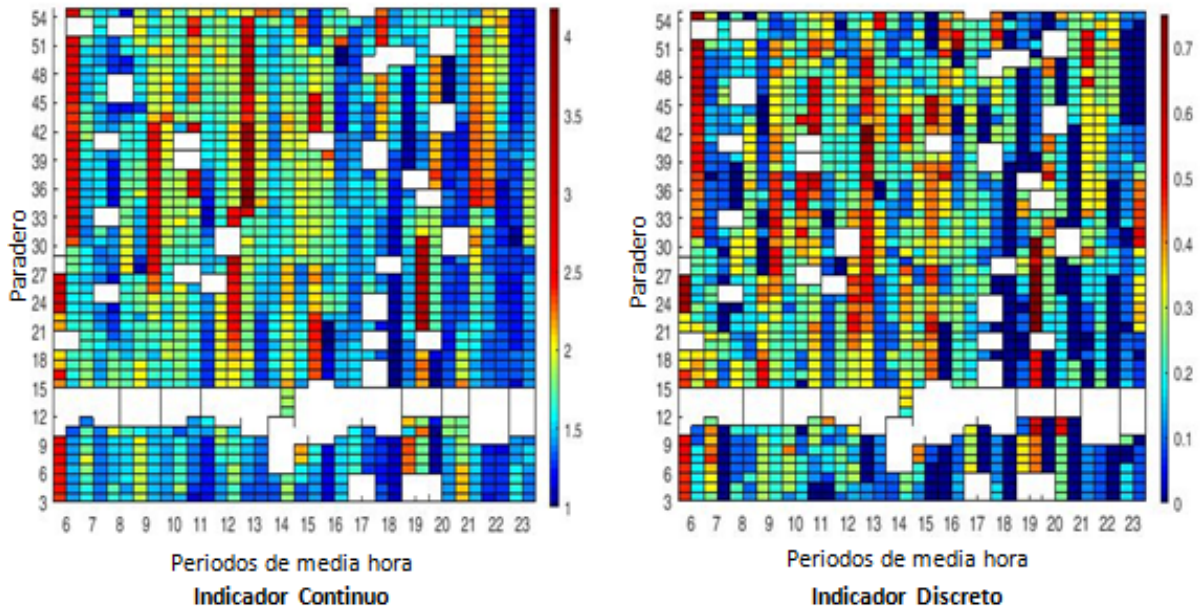
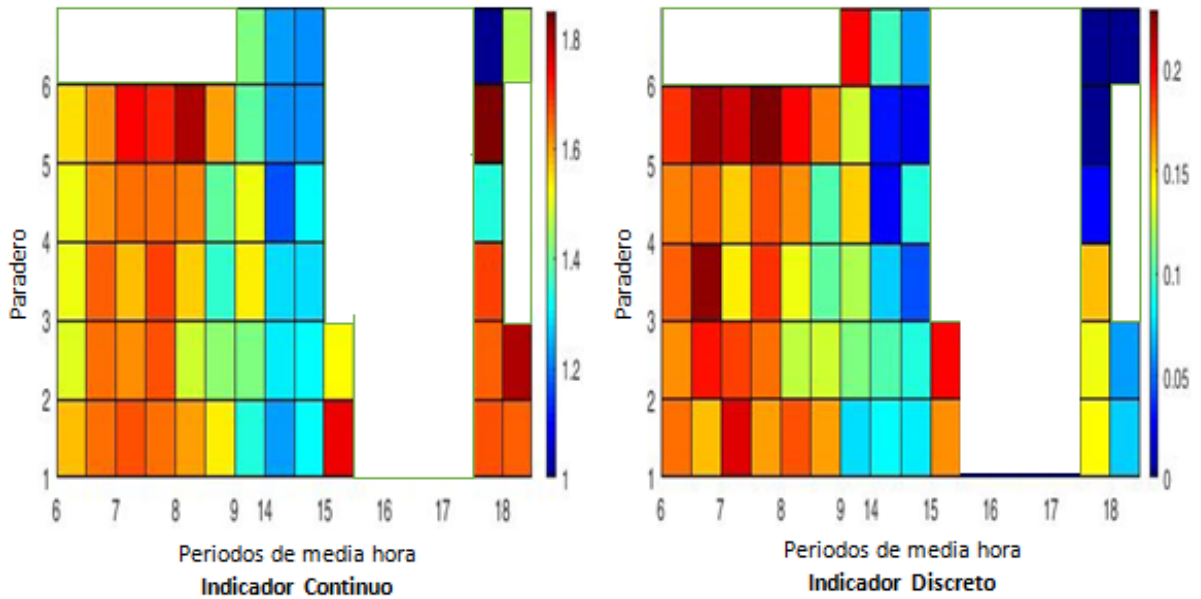


Figura 4.6: Indicador continuo y discreto del tramo Rapibus en Gatineau



Se hace notar en la Figura 4.6 que los horarios comprendidos entre las 6:00 y 9:00 horas corresponden a datos obtenidos en dirección sur mientras que los horarios comprendidos entre las 14:00 y 18:00 horas corresponden a datos obtenidos en dirección norte.

Observando las Figuras 4.3 y 4.4 se puede decir que tanto el indicador discreto (Y) como el indicador continuo (IPO) muestran valores razonables, indicando que el servicio 506 presenta problemas de apilamiento durante los horarios de alta actividad durante el día, después de las 6AM y es más intenso hacia el final de la ruta. Adicionalmente, el servicio 506e presenta

problemas poco severos de irregularidad de buses, pues no se observan celdas rojas. En tanto la Figura 4.5, del servicio 206, presenta problemas de apelotonamiento durante todo el día, hasta las 20:00 horas aproximadamente. Se hace notar que el servicio 206 presenta una escala de apelotonamiento, en ambos indicadores, mayor a la de los servicios 506 y 506e, por lo que el primer servicio (206) tiene más problemas de irregularidades que los otros. Por otro lado, en el caso de Gâtineau, los problemas de apelotonamiento se presentan principalmente en los horarios entre las 6:00 y las 9:00 horas, no obstante, el mayor valor (apelotonamiento severo) de la escala del indicador continuo es del orden del 50 % menor a la de servicios en Santiago y el mayor valor de la escala del indicador discreto es del orden del 66 % menor a la de servicios en Santiago.

Comparando los gráficos de indicador discreto con los de indicador continuo, se puede observar que el indicador discreto es más sensible al apelotonamiento de buses más severo, capturando algunos casos “rojos” que no son detectados por el indicador continuo, mientras que el indicador continuo es opuesto, ya que captura algunos casos de apelotonamiento de buses menos severos que no son capturados por el indicador discreto. Esto sugiere que el indicador continuo podría ser apropiado para la detección temprana del problema de irregularidad de buses.

La selección de estos dos indicadores (continuo y discreto) permite desarrollar dos modelos de regresión lineal, uno para cada indicador como variable dependiente. Una transformación de Box-Cox fue aplicada a los indicadores para obtener variables dependientes con una distribución de probabilidad que se asemeje en mayor medida a la distribución de probabilidad normal. Los coeficientes obtenidos del procedimiento de transformación Box-Cox son -1,58 y -4,56 para el indicador continuo y el indicador discreto respectivamente. Por simplicidad visual y dado que los resultados de variables no presentan gran diferencia, estos factores fueron aproximados a -1 y a -4, resultando las transformaciones que se observan en la ecuación (4.7) y (4.8).

$$Regularidad_IPO = \frac{1}{IPO} \quad (4.7)$$

$$Regularidad_Y = \frac{1}{(Y + 1)^4} \quad (4.8)$$

Por consiguiente el valor base (no hay apelotonamiento de buses) es uno tanto para el indicador continuo transformado o Regularidad_IPO y para el indicador discreto transformado o Regularidad_Y. Por ende mientras más pequeño sea el valor de los indicadores transformados mayor problema de apelotonamiento se presencia, o lo que es igual, mientras mayor sea el valor de los indicadores transformados más regulares son los buses, alcanzando regularidad perfecta cuando los indicadores toman valor uno.

Finalmente los valores promedio, máximo y mínimo de los indicadores y sus transformaciones se muestran en las Tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1: Descripción estadística de indicadores y sus transformaciones en caso Santiago

Variables	Servicio 506			Servicio 506e			Servicio 206		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
IPO	1,5	1	4,5	1,3	1	2,2	1,7	1	4,5
Regularidad_IPO	0,7	0,2	1	0,8	0,5	1	0,6	0,2	1
Y	0,2	0	0,8	0,1	0	0,5	0,2	0	0,8
Regularidad_Y	0,7	0,1	1	0,8	0,2	1	0,6	0,1	1

Tabla 4.2: Descripción estadística de indicadores y sus transformaciones en caso Gatineau

Variables	Rapibus		
	Prom	Min	Max
IPO index	1,5	1	2,6
Transformed IPO index	0,7	0,4	1
Y index	0,1	0	0,7
Transformed Y index	0,6	0,1	1

4.2. Variables independientes

Para modelar las variables explicativas se utilizaron factores que capturan efectos de infraestructura de la vía, de la operación de los buses, de la demanda, de los semáforos y otras variables.

Como las variables dependientes fueron calculadas por paradero-periodo-día, usando 30 minutos como periodo de tiempo para el servicio 506, 206 y tramo Rapibus de Gatineau y periodo de tiempo de una hora para el servicio 506e, las variables independientes se calculan en la misma unidad espacio temporal.

4.2.1. Variables independientes: semáforos

Para incorporar el efecto de los semáforos, se considera que la demora en semáforos tiene dos componentes: la demora uniforme, que corresponde a la demora promedio de los vehículos (que incluye la probabilidad de detenerse en el semáforo, por enfrentar una luz roja) cuando el grado de saturación es menor a un valor comprendido entre 0,8 y 0,9; y un segundo componente causado por la aleatoriedad y la sobresaturación de la cola (en este caso el grado de saturación es mayor o igual a un valor comprendido entre 0,8 y 0,9). Como el valor del grado de saturación y el factor de carga, el cual es utilizado para calcular la probabilidad de detenerse, no son conocidos, se utilizó solamente la demora uniforme promedio de los buses, la cual puede ser aproximada por la ecuación (4.9). Donde DUV es la demora uniforme promedio de buses en semáforos, c es el tiempo de ciclo de los semáforos, u es la proporción del tiempo de verde en el tiempo de ciclo, y N es el número de semáforos entre el paradero evaluado y el anterior a este.

$$DUV = \frac{c \cdot (1 - u)}{2} \cdot N \quad (4.9)$$

El tiempo de ciclo y de verde son calculados como el tiempo de ciclo promedio y el tiempo de verde promedio de los semáforos que se encuentran en la sección entre el paradero evaluado y el anterior a este, luego se obtiene la demora uniforme promedio de buses en semáforos por cada paradero.

Cuando los semáforos están coordinados en redes, como en este caso, se puede lograr una reducción significativa en la demora uniforme (Gibson *et al.*, 2015). Para incorporar este efecto, variables dummy son utilizadas para indicar si la sección entre el paradero evaluado y el anterior a este presenta semáforos coordinados. Personal de monitoreo de buses de DTPM informó que aquellos semáforos que se encuentran aislados (no coordinados), ya sea por falla o por construcción, impiden gestionar o prevenir el problema de apilamiento de buses cuando hay presencia de congestión, puesto que no se pueden modificar los tiempos de semáforos para aumentar el flujo de vehículos en que se genera mayor cuello de botella para el transporte público. En base a esto último se utiliza una variable dummy que se activa cuando hay uno o más semáforos aislados en el segmento entre el paradero evaluado y el anterior a este y cuando este mismo segmento y periodo de tiempo presentan congestión.

Se hace notar que en el caso de Gatineau, las variables consideradas, con respecto al efecto de semáforos, son el número de semáforos y no la demora de estos, puesto que a diferencia de Santiago, en el Rapibus de Gatineau los semáforos poseen sensores para activar las luces y dar prioridad a los buses del transporte público, disminuyendo así el efecto que tienen los tiempos de semáforos en la regularidad de los buses. Variables con respecto a la coordinación de buses son solamente consideradas para el caso Santiago, puesto que en el Rapibus de Gatineau todos los semáforos del tramo estudiado están coordinados.

El bloqueo de tráfico en paraderos ha sido identificado como una de las causas de variabilidad de buses. Específicamente, cuando un paradero está cerca de una intersección semaforizada se puede generar un tiempo muerto, atribuido a la cola generada por la luz roja (Slavin *et al.*, 2013). Por esto, se incorporó el potencial efecto del bloqueo de tráfico, como una variable dummy que indica si el paradero anterior al evaluado está localizado a menos de 30 metros antes de un semáforo.

Las variables dummy utilizadas para modelar el efecto de los semáforos son descritas en la Tabla 4.3 con el respectivo porcentaje de veces en que estas toman el valor uno. La demora uniforme vehicular, para el caso de Santiago y el número de semáforos, para el caso de Gatineau, son descritos en las Tablas 4.4 y 4.5, donde se muestra el promedio, el mínimo y el máximo de estas variables en las observaciones utilizadas.

Tabla 4.3: Porcentaje de casos indicados por variables independientes de tipo dummy relacionadas a semáforos

Variables Independientes de tipo Dummy	Santiago			Gatineau
	Servicio 506	Servicio 506e	Servicio 206	Rapibus
Dos semáforos coordinados	17,70 %	19,30 %	30,30 %	-
Tres semáforos coordinados	12,90 %	15,80 %	6,10 %	-
Cuatro semáforos coordinados	2,20 %	13 %	0 %	-
Seis semáforos coordinados	0 %	6,80 %	0 %	-
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (4 y 2)	0 %	2,70 %	0 %	-
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (3 y 8)	0 %	2,40 %	0 %	-
Bloqueo de tráfico	32,30 %	23,40 %	30,10 %	13,40 %
Presencia de semáforo no coordinado	0,80 %	0,60 %	0,18 %	-
Número total de observaciones	15786	1196	3325	812

Tabla 4.4: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a semáforos del caso Santiago

Variable Independiente	Servicio 506			Servicio 506e			Servicio 206		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Demora uniforme promedio [segundos]	25,9	0	120,5	55	0	272,5	24,7	0	112
Número total de observaciones	15786			1196			3325		

Tabla 4.5: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a semáforos del caso Gatineau

Variable Independiente	Rapibus		
	Prom	Min	Max
Número de semáforos	1,3	0	3
Número total de observaciones	812		

4.2.2. Variables independientes: infraestructura de la vía

Los factores de infraestructura de la vía, usados como variables explicativas en los modelos, son la distancia entre paraderos, el tipo y geometría de paradero y el tipo de prioridad de vía, que puede ser pistas solo bus, vía exclusiva y corredor segregado en el caso Santiago.

Las variables dummy utilizadas para modelar el efecto de la infraestructura de la vía son descritas en la Tabla 4.6 con el respectivo porcentaje de veces en que estas toman valor 1. La distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este es descrita en las Tablas 4.7 y 4.8,

donde se muestra el promedio, el mínimo y el máximo de esta variable en las observaciones utilizadas.

Tabla 4.6: Porcentaje de casos indicados por variables independientes de tipo dummy relacionadas a infraestructura de la vía

Variables Independientes de tipo Dummy	Santiago			Gatineau
	Servicio 506	Servicio 506e	Servicio 206	Rapibus
Una pista solo bus	10,60 %	10,50 %	0 %	-
Dos pistas solo bus	6,50 %	2,40 %	0 %	-
Corredor segregado	29,40 %	31 %	42,60 %	-
Vía exclusiva	0 %	0 %	7,50 %	- -
Zona paga	1 %	2,76 %	0,60 %	-
Paradero anterior es zona paga	1 %	3 %	0,60 %	-
Geometría de paradero: dos o más lugares de detención de buses	-	-	-	32 %
Número total de observaciones	15786	1196	3325	812

Tabla 4.7: Descripción estadística de la variable independiente de la variable distancia entre paraderos caso Santiago

Variable Independiente	Servicio 506			Servicio 506e			Servicio 206		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	0,4	0,2	1,1	0,8	0,2	2,2	0,4	0,1	0,6
Número total de observaciones	15786			1196			3325		

Tabla 4.8: Descripción estadística de la variable independiente de la variable distancia entre paraderos caso Gatineau

Variable Independiente	Rapibus		
	Prom	Min	Max
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	1,2	0,1	2,4
Número total de observaciones	812		

4.2.3. Variables independientes: operación de los buses

Los factores de la operación de los buses usados como variables explicativas en los modelos son: la variabilidad del intervalo de tiempo entre buses consecutivos al inicio de la ruta, la distribución del tipo de buses (articulados y no articulados), la antigüedad promedio de los buses (años), la frecuencia programada y una variable dummy que indica la empresa operadora en el caso de Santiago, que toma valor uno para servicios 506 y 506e (empresa operadora: Metbus) y valor cero para el servicio 206 (empresa operadora: Subus). Estas

variables están relacionadas a los operadores y reguladores de los servicios, por lo que son estos quienes pueden controlarlas.

La distribución del tipo de buses y la antigüedad de estos, son medidas solamente para el caso de Santiago, pues para el caso de Gatineau no se disponía de información suficiente para el cálculo de dichas variables.

Para capturar el efecto de distribución de tipo de buses que pasan por el periodo-paradero evaluado se utilizan cuatro variables dummy (ver Tabla 4.9), donde el caso base está entre 0 % y 20 % de buses articulados. El objetivo de estas variables es identificar si el apelotonamiento de buses es una función creciente del porcentaje de buses articulados en la vía o si prima la homogeneidad de la flota a la hora de evaluar el efecto que la distribución del tipo de buses genera en el problema en estudio. Además de esto se incorporó una variable que mide el porcentaje de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior a la evaluada (ver Tabla 4.10), con el propósito de identificar si el orden de los buses tiene relevancia en la regularidad. Se quiere probar si despachar dos buses consecutivos del mismo tipo favorece al equilibrio de los intervalos o no.

Tabla 4.9: Porcentaje de casos indicados por las variables de distribución de tipo de buses

Variables Independientes de tipo Dummy	Servicio 506	Servicio 506e	Servicio 206
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	19 %	0 %	19,50 %
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 60 %	24 %	0 %	28,10 %
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 61 % y 80 %	26,20 %	0 %	28,50 %
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	14,20 %	100 %	17,80 %
Número total de observaciones	15786	1196	3325

El efecto generado por la irregularidad en el despacho se representa mediante la evaluación de los indicadores discreto y continuo al inicio de la ruta. En el caso Santiago este se evalúa en el primer paradero de cada servicio y en el caso Gatineau se considera el horario de despacho de cada bus desde el terminal. Como las expediciones que pasan por el periodo-paradero evaluado pueden haber pasado por el primer paradero o haber sido despachados en distintos periodos de tiempo, se toma un promedio de los indicadores de estos periodos en el primer paradero o en el despacho, según corresponda el caso. Además se hace notar que las variables que se utilizan en los modelos son las transformaciones de los indicadores, por lo que se mide la regularidad de los buses al inicio de ruta.

La descripción estadística referente a la irregularidad en inicio de ruta, la variable antigüedad promedio de buses y frecuencia programada se muestra en las Tablas 4.10 y 4.11. Se puede ver que la regularidad al inicio de la ruta es mayor o igual en los servicios del caso

Santiago que los del caso Gatineau.

Tabla 4.10: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la operación de los buses caso Santiago

Variables Independientes	Servicio 506			Servicio 506e			Servicio 206		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0,6	0	1	1	1	1	0,5	0	1
Indicador IPO en el despacho	1,2	1	2	1,2	1	3,3	1,5	1	2,5
Indicador IPO transformado en el despacho	0,9	0,5	1	0,9	0,3	0,9	0,7	0,4	1
Indicador Y en el despacho	0,02	0	0,4	0,01	0	0,3	0,1	0	0,5
Indicador Y transformado en el despacho	0,9	0,3	1	0,9	0,4	1	0,7	0,2	1
Edad promedio de buses [años]	3,8	0	5	5	5	5	6	3	7,5
Frecuencia programada [buses por hora]	8,5	3	14	5,2	5	5,5	7,9	5	11
Número total de observaciones	15786			1196			3325		

Tabla 4.11: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la operación de los buses caso Gatineau

Variables Independientes	Rapibus		
	Prom	Min	Max
Indicador IPO en el despacho	1,6	1	3
Indicador IPO transformado en el despacho	0,7	0,3	1
Indicador Y en el despacho	0,1	0	0,5
Indicador Y transformado en el despacho	0,6	0,2	1
Frecuencia programada [buses por hora]	21	6	42
Número total de observaciones	812		

4.2.4. Variables independientes: entorno de los buses

Los factores relacionados con el entorno en el que circulan los buses se agrupan en congestión, incidentes y demanda. Estos factores están relacionados a la aleatoriedad a la que se enfrentan los buses, es decir, aquellos hechos que no pueden ser controlados por operadores ni reguladores.

La congestión en la vía no es un problema en el Rapibus de Gatineau, puesto que sólo buses del transporte público utilizan esta vía, caso diferente al de Santiago, en donde se evalúan tramos en que los buses comparten el espacio con vehículos privados. Por ende la variable

congestión se evalúa solamente en el caso de Santiago y se modela como una variable dummy que toma valor uno cuando la velocidad comercial es 15km/hr o menos y su desviación estándar es 30% o menos de la velocidad comercial del correspondiente segmento de vía y periodo de tiempo. La velocidad comercial es obtenida de la metodología procesada por Cortés *et al.* (2011). En la Tabla 4.12 se muestra el porcentaje en que la variable congestión toma valor uno.

Tabla 4.12: Procentaje de casos indicados por la variable congestión

VARIABLES INDEPENDIENTES DE TIPO DUMMY	SERVICIO 506	SERVICIO 506e	SERVICIO 206
Congestion	5,20%	3,80%	3%
Número total de observaciones	15786	1196	3325

Por otro lado el efecto de incidentes es representado mediante la proporción de expediciones que han sido desviadas de su camino regular en algún lugar anterior al paradero evaluado, por algún hecho registrado en el archivo de incidentes de DTPM. En el caso Gatineau no se ha incorporado el efecto incidentes, puesto que no se dispone de un registro de estos.

Con respecto a la demanda, se utiliza la variable de variación en la actividad de buses consecutivos (detención y no detención), específicamente la proporción de expediciones que realizan la misma actividad que el bus anterior, en el paradero anterior al evaluado. También se utiliza el promedio del total de subidas por expediciones, con el objetivo de identificar los horarios de alta demanda y finalmente la variación de demanda entre las expediciones. Para medir la variación de demanda se utilizan dos formas, la primera consiste en el coeficiente de variación del total de subidas y bajadas de cada expedición por cada paradero y periodo de tiempo y la segunda manera consiste en el coeficiente de variación de la tasa de llegada promedio de pasajeros de cada expedición, donde la tasa de llegada se calcula como el número de subidas dividida por el intervalo del bus y luego se toma el promedio de esta división en los paraderos anteriores al evaluado.

En la Tabla 4.14 se muestran los valores estadísticos de las variables incidente y demanda del caso Santiago. Mientras que en la Tabla 4.13 se muestran las variables de demanda en el caso Gatineau. Se hace notar que en el caso Gatineau, se dispone de información relacionada a la subida de pasajeros, más no a la bajada de estos.

Tabla 4.13: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la demanda en el caso Gatineau

Variables Independientes	Rapibus		
	Prom	Min	Max
Promedio de subidas de adultos acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	14,2	0	46,3
Promedio de subidas de estudiantes acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	3,3	0	16,5
Promedio de subidas de adultos mayores acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	0,4	0	3,7
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos por expedición en cada paradero	1,1	0	4
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos por expedición en cada paradero	1,3	0	4
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos por expedición en cada paradero	1,5	0	5
Número total de observaciones	812		

Tabla 4.14: Descripción estadística de variables independientes relacionadas a la demanda e incidentes en el caso Santiago

Variables Independientes	Servicio 506			Servicio 506e			Servicio 206		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Proporción de expediciones que han sido desviadas	0,01	0	1	0,01	0	0,8	0	0	0
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	42	0	206,3	75,1	0	326	30,5	0	331
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	0,4	0	1,4	0,6	0	2,5	0,06	0	1,13
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas (en paraderos anteriores) por expedición en cada paradero	0,4	0	1,2	0,9	0	2,7	0,04	0	1,14
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0,6	0	1	0,6	0	1	0,6	0	1
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de pasajeros por expedición en cada paradero	0,7	0	2,6	0,7	0	2,4	1,2	0	2,6
Número total de observaciones	15786			1196			3325		

Capítulo 5

Resultados y análisis

Este capítulo presenta los resultados o estimación de los modelos de regresión lineal múltiple tanto para el caso Santiago como para el caso Gatineau, además se discute la significancia y signo de parámetro de cada variable ingresada en los modelos. Finalmente se presenta la importancia relativa en el apelonamiento de buses de los factores analizados.

La estimación de los modelos del caso Santiago se realiza primero con los servicios 506 y 506e, puesto que son aquellas rutas que presentan menor variación en la regularidad de buses, lo cual permite probar la modelación y su capacidad de obtener resultados adecuados a los esperados. En segundo lugar se agregan los datos del servicio 206 y finalmente se modelan los datos del caso Gatineau.

Las estimaciones se realizan con el software STATA.

5.1. Modelación caso Santiago

En esta sección se presenta los modelos obtenidos para el caso de Santiago, en primera instancia con los servicios 506 y 506e que presentan, en general, una buena regularidad de tiempos entre buses y en segunda instancia modelos calibrados con los servicios 506, 506e y 206 con el objetivo de añadir variabilidad en los datos de la modelación.

5.1.1. Modelos para los servicio 506 y 506e

Los primeros modelos estimados, tanto de indicador discreto como continuo, corresponden a una regresión línea múltiple que contiene las variables observadas en la Tabla 5.1. Para esto se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), por lo que se analizan los supuestos que se deben cumplir para utilizar el método de manera eficiente. Partiendo por la distribución normal de los errores, se observa en las Figuras 5.1 y 5.2 que los errores del modelo del indicador continuo presentan una distribución aproximadamente normal, al

contrario de los errores del modelo con indicador discreto mostrados en las Figuras 5.3 y 5.4. No obstante, para tamaños de muestra grandes, se ha probado, a partir de la ley de los grandes números y el teorema central del límite, que los estimadores MCO están distribuidos aproximadamente de forma normal, luego los estadísticos t de Student y F de Fisher no se ven afectados. Como la muestra utilizada es considerada de gran tamaño no hay problemas con el no cumplimiento del supuesto de normalidad.

Mediante el test de heterocedasticidad Breusch-Pagan y el test de Durbin-Watson se comprueba que los modelos no cumplen la hipótesis de homocedasticidad de los errores ni tampoco la hipótesis de independencia de estos, puesto que presentan auto correlación de orden 1. La falta de independencia y auto correlación de los errores de los modelos, generan que los estimadores mínimo-cuadráticos sean centrados pero ineficientes (no son de mínima varianza) y que las fórmulas de varianza de estos estimadores no sean correctas, por lo que los contrastes de significación no son válidos, ya que tienden a detectar relaciones inexistentes. Dado lo anterior se utiliza estimación robusta (MCG) de la matriz varianza-covarianza para ocupar, de manera segura, los test de significancia individual (prueba t de Student) y global (prueba F de Fisher).

En la Tabla 5.1 se puede observar la estimación robusta de ambos modelos, los cuales permiten notar que la estimación de coeficientes no varían entre el modelo MCG y MCO (Anexo B.2.), como sí ocurre con los estadísticos de significancia individual, sin embargo esta variación es ínfima.

El resultado de los modelos, indica que aquellas variables con mayor estadístico t de student en la modelación de regularidad de buses son: el largo de la ruta o número de paraderos, la frecuencia programada de buses y la regularidad en el despacho, las primeras dos con relación inversamente proporcional a la regularidad de buses, y la regularidad en despacho con relación directa a ésta. Este resultado era esperado en base al estado del arte.

Figura 5.1: Probabilidad acumulada residuales del modelo indicador continuo

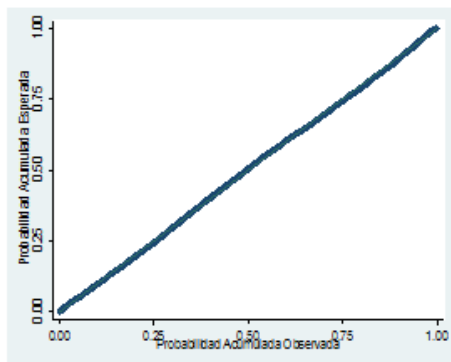


Figura 5.2: Densidad de residuos del modelo indicador continuo

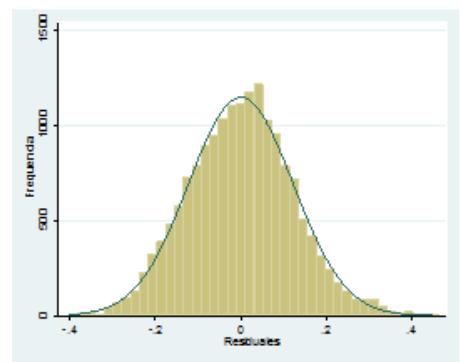


Figura 5.3: Probabilidad acumulada residuales del modelo indicador discreto

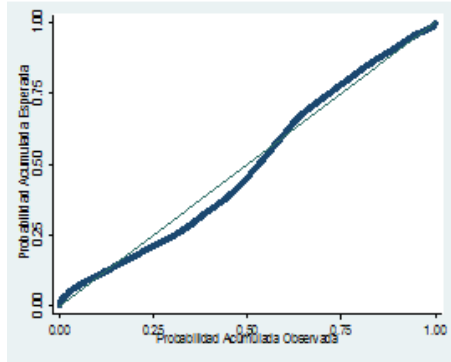
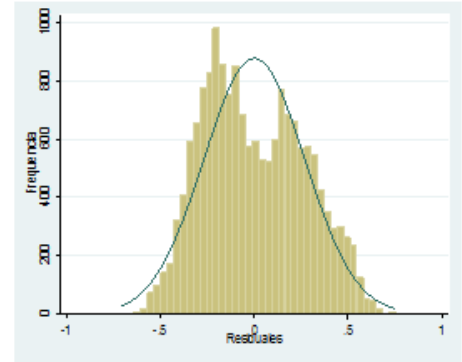


Figura 5.4: Densidad de residuos del modelo indicador discreto



Con respecto a la prioridad de vía, la única variable que presenta significancia individual es aquella que indica que el tipo de vía es corredor, mostrando que aquellos paraderos que se encuentran ubicados en corredor segregado presentan menor intensidad de apaltonamiento de buses que aquellos que se encuentran en tráfico mixto. Con respecto a los tipos de vía, una pista sólo bus o dos pistas sólo bus, era esperable que resulten variables no significativas, puesto que se ha notado que los conductores de automóviles privados no respetan este nivel de prioridad de transporte público, generando que la irregularidad de buses no presente diferencia entre pista de tráfico mixto y pista sólo bus. Se hace notar que en el modelo con indicador discreto la variable una pista sólo bus tiene un valor t de Student alto, a punto de ser una variable significativa, no obstante el signo obtenido (negativo) es no esperado, ya que según se vió en la literatura, las vías con prioridad para transporte público favorecen la regularidad en la ruta.

Las variables que indican paradero zona paga y paradero anterior zona paga, resultaron variables no significativas.

Tabla 5.1: Estimación inicial de modelos de servicios 506 y 506e

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-49.7)	-0.006 (-43.4)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este	-0.002 (-0.4)	-0.026 (-1.8)
Una pista solo bus	-0.001 (-0.2)	-0.014 (-1.95)
Dos pistas solo bus	-0.005 (-1.1)	0.002 (0.1)
Corredor segregado	0.02 (5.8)	0.05 (7.4)
Paradero zona paga	-0.001 (-0.1)	0.01 (0.5)
Paradero anterior es zona paga	-0.01 (-1)	-0.02 (-0.8)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.0001 (-1.7)	0.0001 (0.6)
Dos semáforos coordinados	0.006 (1.5)	0.01 (1.5)
Tres semáforos coordinados	0.001 (0.3)	-0.005 (-0.5)
Cuatro semáforos coordinados	0.02 (1.9)	-0.001 (-0.04)
Seis semáforos coordinados	-0.005 (-0.3)	-0.06 (-1.3)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (4 y 2)	0.03 (1.3)	0.03 (0.5)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (3 y 8)	0.02 (0.8)	-0.03 (-0.4)
Bloqueo de tráfico	-0.003 (-1.2)	-0.009 (-1.7)
Frecuencia programada	-0.01 (-25.2)	-0.03 (-31.9)
Proporción de expediciones desviadas	-0.07 (-5.8)	-0.09 (-3.6)
Regularidad en el despacho	0.7 (59.2)	0.4 (27.5)
Congestion	-0.01 (-1.9)	-0.01 (-0.9)
Presencia de semáforo no coordinado	0.004 (0.3)	0.03 (0.9)
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.02 (3.7)	0.01 (1.1)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.02 (4.2)	0.04 (4.6)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.0002 (-5.8)	-0.0002 (-1.9)
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.08 (-19.1)	-0.1 (-13)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.04 (-12.1)	-0.09 (-12.8)
Edad promedio de buses	0.002 (1.6)	0.002 (0.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.04 (-9.9)	-0.1 (-12.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 60 %	-0.05 (-11.6)	-0.1 (-12.8)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 61 % y 80 %	-0.05 (-12.1)	-0.1 (-12)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.03 (-6.7)	-0.06 (-6.3)
constante	0.4 (32.2)	0.9 (40.3)
R-cuadrado	0.49	0.33
Error	0.12	0.27

Las variables referidas a los tiempos de semáforos y número de semáforos coordinados, son todas no significativas, lo cual se puede explicar por la correlación que presentan tanto con la variable distancia entre paraderos como con la variable que indica semáforo a treinta metros o menos del paradero anterior al evaluado. Esta última variable (bloqueo de tráfico) tampoco presenta significancia individual, sin embargo, en el modelo con indicador discreto, el estadístico t de Student es cercano al valor 2 y además el signo presente (negativo) es el esperado, ya que empíricamente el bloqueo de partida genera mayor irregularidad de intervalos.

La variable que indica distancia entre paraderos es no significativa, aunque en el modelo con indicador discreto, el valor t de Student es cercano a la significancia estadística, además el signo es el esperado, puesto que como se identificó en la literatura, se espera probar que la distancia entre paraderos aumenta la variabilidad entre los intervalos de buses consecutivos. El porcentaje de expediciones desviadas en algún punto de su camino anterior al paradero evaluado, resulta ser una variable significativa y con el signo esperado, indicando que a medida que aumenta este valor porcentual, también aumenta el apelsonamiento de buses. La presencia de congestión y de semáforo aislado en situaciones de congestión no son variables significativas. Ambas variables presentan correlación, por lo que la existencia de una en el modelo ocasiona menor significancia en la otra, la variable más relevante es la congestión, puesto que en modelo con indicador continuo está muy cerca de la significancia individual, presentando signo adecuado (negativo), es decir, la congestión incrementa la irregularidad de buses.

La variable que indica que pares de buses consecutivos realizan la misma acción (detenerse o no detenerse), resultó ser significativa y con signo esperado, señalando relación inversa al apelsonamiento de buses.

La demanda o subida de pasajeros es una variable significativa en el modelo con indicador continuo, mas no en el modelo con indicador discreto, no obstante presenta un valor t de Student cercano al valor 2, lo cual representa significancia al 95 % de confianza. Además en ambos modelos, el signo resultante es el esperado, indicando que periodos de mayor demanda la irregularidad de buses aumenta. Con respecto a la variación de subidas y bajadas también son significativas estadísticamente y presentan, de manera coherente con la revisión bibliográfica, una relación directa con la irregularidad de buses.

Las variables que identifican la distribución del tipo de buses que pasan por los paraderos, son todas significativas y de signo negativo, es decir, todas las situaciones representadas por las variables binarias generan un aumento en la irregularidad de buses con respecto a la situación base, presencia entre 0 % y 20 % de buses articulados. Se hace notar que los coeficientes de las variables que indican una distribución entre el 21 % y 40 %, 41 % y 60 % y 61 % y 80 % son similares y más relevantes que la variable que indica distribución entre el 81 % y 100 %, por lo que se debe probar la unión de estas variables en los modelos próximos.

La variable proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior es significativa solo en el modelo con indicador continuo con signo positivo, indicando que favorece la regularidad de buses. En último lugar la variable edad promedio de buses resultó ser no significativas a nivel individual.

Luego de la estimación inicial se remueven variables que presenten baja significancia estadística y/o signo no esperado y se agrupan aquellas variables que tienen coeficientes similares. En la Tabla 5.2 se muestra la estimación final de los modelos, en donde se puede ver que aquellas variables que permanecen significativas (al igual que en las estimaciones iniciales) son: número consecutivo de paradero, corredor segregado, frecuencia programada, proporción de expediciones desviadas, regularidad al inicio de ruta, proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior (sólo en modelo con indicador continuo), proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior, promedio de subidas de pasajeros y coeficiente de variación de subidas y bajadas.

La demora uniforme vehicular pasa a ser un variable significativa y de signo esperado en los modelos finales, esto quiere decir que los tiempos de demora en semáforos empeora la regularidad de los buses, al igual que la variable bloqueo de tráfico, la cual pasa a ser una variable significativa y de signo esperado en el modelo final de indicador continuo.

Como los coeficientes de las variables 41 %-60 % y 61 %-80 % de buses articulados son casi idénticos, en el modelo inicial con indicador continuo, se eliminan las variables recién nombradas y se agrega una variable binaria que corresponde a la suma de dichas variables, como resultado de la estimación (Tabla 5.2) la nueva variable ingresada presenta significancia individual y las demás variables no presentan modificaciones con respecto al último modelo estimado. Además el R cuadrado permanece con el mismo valor al igual que los errores del modelo. Luego se realiza un test F de Fisher para validar el nuevo modelo restringido, en donde la hipótesis nula es que la suma de los coeficientes de las dos variables es igual a $-0.047*2$, el resultado indica que no se puede rechazar esta hipótesis, por lo que la nueva variable queda validada dentro del modelo.

Los coeficientes de las variables 21 %-40 % ,41 %-60 % y 61 %-80 % de buses articulados son similares, en el modelo inicial con indicador discreto, razón por la cual se eliminan las variables recién nombradas y se agrega una variable binaria que corresponde a la suma de las tres variables (21 %-40 % ,41 %-60 % y 61 %-80 % de buses articulados), como resultado de la estimación (Tabla 5.2), la nueva variable ingresada presenta significancia individual. Luego se realiza un test F de Fisher para validar el nuevo modelo restringido, en donde la hipótesis nula es que la suma de los coeficientes de las tres variables es igual a $-0.113*3$. El resultado indica que no se puede rechazar esta hipótesis, por lo que la nueva variable queda validada dentro del modelo.

Finalmente, se ingresa una variable al modelo con indicador continuo, que corresponde a la suma de las tres variables binarias que indican la existencia de dos, tres y cuatro semáforos coordinados. Esto porque la variable cuatro semáforos coordinados era significativa al eliminar las otras variables referentes a semáforos coordinados, no obstante este resultado tiene sentido siempre cuando exista el mismo efecto en las variables dos y tres semáforos coordinados. De esta manera la nueva variable permite indicar la existencia de cualquiera de las tres situaciones planteadas recientemente. Luego el resultado del modelo estimado, indica que la nueva variable aditiva no es significativa, no obstante dada su importancia en la explicación del fenómeno se decide mantener en el modelo final, además presenta signo esperado, el cual indica que la existencia de dos, tres o cuatro semáforos coordinados permiten la disminución del apaltonamiento de buses (ver Tabla 5.2).

Para validar el modelo final restringido con cada indicador, se utiliza el test F para modelos restringidos, el cual no permite rechazar la hipótesis nula (coeficientes de variables eliminadas del modelo presentados en el modelo inicial de la Tabla 5.1 tienen valor cero), por lo que el modelo restringido es válido.

Tabla 5.2: Estimación final de modelos de servicios 506 y 506e

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coeficientes (t-stat)	Coeficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-53.8)	-0.006 (-47.8)
Corredor segregado	0.02 (6.6)	0.05 (8.7)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.0001 (-2.4)	-0.0002 (-2)
Dos semáforos coordinados	-	0.02 (2.5)
Dos o tres o cuatro semáforos coordinados	0.003 (1.2)	
Bloqueo de tráfico	-0.005 (-2)	-
Frecuencia programada	-0.01 (-25.7)	-0.03 (-33)
Proporción de expediciones desviadas	-0.07 (-5.8)	-0.09 (-3.5)
Regularidad en el despacho	0.7 (59.4)	0.4 (27.3)
Congestion	-0.009 (-1.9)	-
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.02 (3.7)	-
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.01 (3.9)	0.03 (4.4)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.0002 (-6.4)	-0.0002 (-2.2)
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.08 (-19.2)	-0.1 (-12.9)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.04 (-12.4)	-0.09 (-13.6)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.04 (-9.8)	-
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.03 (-7.2)	-0.06 (-7.1)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 80 %	-0.05 (-13.1)	-
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 80 %	-	-0.1 (-16.9)
constante	0.44 (34.8)	0.9 (50.6)
R-cuadrado	0.4848	0.326
Error	0.12221	0.269

Como se analizó al inicio, existe autocorrelación entre los errores de los modelos, es decir, el valor de la variable dependiente presenta una alta correlación con el valor del indicador en el paradero anterior. En base a esto se habla de una autocorrelación espacial referida a los paraderos, no obstante la correlación es temporal si se habla de expediciones, puesto que la irregularidad del paradero evaluado corresponde en su mayoría a la irregularidad experimentada por las expediciones en un instante de tiempo anterior. Con el objetivo de medir el rezago que deja el apelonamiento del paradero anterior en el paradero evaluado, se estima

un modelo auto regresivo de orden uno. Para esto se utilizan los indicadores transformados del paradero anterior al evaluado en vez de los indicadores transformados en el despacho de buses, además de las variables utilizadas en el modelo son las mostradas en la Tabla 5.2. Los resultados se muestran en la Tabla 5.3.

Luego de estimar el modelo auto regresivo, se obtiene que varias de las variables que en el último modelo de regresión lineal múltiple son significativas ahora dejan de serlo y las variables que eran no significativas continúan siéndolo. Las variables que siguen siendo significativas en ambos modelos autorregresivos son: frecuencia programada, proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior y coeficiente de variación de subidas y bajadas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero. A estas se agregan subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero en el modelo con indicador continuo, número consecutivo de paradero y la variable binaria que indica que el porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 80 % en el modelo con indicador discreto.

Se hace notar el alto valor t de Student que obtiene la variable rezago, que permite explicar más del 80 % de la variabilidad de la variable dependiente, más aun al estimar el modelo solamente con el rezago como variable independiente (ver Anexo B.2.) se sigue obteniendo un alto ajuste (casi igual al estimado con las demás variables), por lo que el rezago permite explicar casi completamente el valor del apelotonamiento de buses en el paradero evaluado. Pese a este buen ajuste, se continúa el análisis con modelos de regresión lineal múltiple, puesto que el objetivo del estudio es encontrar aquellos factores que inciden en el problema y aquellos que también permiten gestionar o reducir este.

Se resalta que todos los modelos estimados presentan significancia global, es decir, las variables utilizadas en conjunto son validadas para explicar el fenómeno en cuestión.

Tabla 5.3: Modelos autoregresivos de servicios 506 y 506e

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.00002 (-1.3)	-0.0005 (-7.5)
Corredor segregado	0.0009 (1)	0.005 (1.7)
Demora uniforme promedio en semáforos	0.000005 (0.3)	-0.00002 (-0.6)
Dos semáforos coordinados	-	0.0002 (0.07)
Dos o tres o cuatro semáforos coordinados	-0.0007 (-0.7)	-
Bloqueo de tráfico	0.0002 (0.3)	-
Frecuencia programada	-0.0007 (-5.4)	-0.00363 (-9.6)
Proporción de expediciones desviadas	-0.003 (-0.5)	-0.01 (-0.6)
Regularidad en el paradero anterior (rezago)	0.98 (399.7)	0.89 (203.3)
Congestion	-0.001 (-0.7)	-
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.005 (2.5)	-
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	-0.002 (-1.4)	0.002 (0.5)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	0.00002 (2.1)	0.00006 (1.7)
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.009 (-6.3)	-0.02 (-4.3)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.003 (-2.8)	-0.01 (-4.6)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.0005 (-0.4)	-
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.0006 (-0.5)	-0.007 (-1.7)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 80 %	-0.001 (-0.8)	-
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 80 %	-	-0.02 (-5)
constante	0.03 (7.1)	0.05 (23.1)
R-cuadrado	0.935	0.819
Error	0.044	0.14

5.1.2. Modelos para los servicios 506, 506e y 206

En esta sección se presenta modelos calibrados incorporando un tercer servicio (206) con el objetivo de incorporar datos más variables, pues el servicio 206 presente peor regularidad que los otros dos y un tipo de vía que tampoco está presente en la línea 506 (vía exclusiva).

Se estimaron modelos robustos para evitar correlación serial entre paraderos y heterocedasticidad de los errores, problemas que fueron detectados en las estimaciones iniciales. También se usaron las pruebas estadísticas t de Student y F de Fisher para corroborar la eficiencia y significancia de las variables.

Los modelos iniciales se muestran en la Tabla 5.4, donde se detalla el coeficiente junto a su

estadístico t de Student. Nuevamente los resultados indican que aquellas variables que tienen valor del estadístico t de Student más alto son: el largo de la ruta o número de paradero, la frecuencia programada de buses y la regularidad en el despacho, las primeras dos con relación inversamente proporcional a la regularidad de buses y la regularidad en despacho con relación directa a esta.

Con respecto a la prioridad de vía, las variables que presentan significancia individual, en ambos modelos, son aquellas que indican corredor segregado y vía exclusiva, mostrando que aquellos paraderos que se encuentran en estos tipos de prioridad de vía presentan menor intensidad del problema de apaltonamiento de buses que aquellos que se encuentran en tráfico mixto. Además la variable que indica dos pistas sólo bus es significativa en el modelo con indicador continuo y de signo negativo, es decir, en la sección de este tipo de vía el apaltonamiento de buses aumenta con respecto al tráfico mixto.

Las variables que indican paradero zona paga y paradero anterior zona paga, resultaron variables no significativas.

Las variables referidas a los tiempos de semáforos y número de semáforos coordinados, son todas no significativas, excepto la variable demora uniforme en semáforos y la que indica seis semáforos coordinados, que presentan significancia individual en el modelo con indicador discreto, no obstante ambas se muestran con signo no esperado, según el estado del arte. La variable bloqueo de tráfico presenta significancia individual, en el modelo con indicador discreto, y el signo presente (negativo) es el esperado, ya que empíricamente el bloqueo de partida genera mayor irregularidad de intervalos.

La variable que indica distancia entre paraderos es no significativa, aunque en el modelo con indicador discreto, el valor t de Student es cercano a la significancia estadística, además el signo es el esperado.

El porcentaje de expediciones desviadas en algún punto de su camino anterior al paradero evaluado, resulta ser una variable significativa y con el signo esperado, indicando una relación directamente proporcional al apaltonamiento de buses.

La presencia de congestión y de semáforo aislado en situaciones de congestión no son variables significativas. Ambas variables presentan correlación, por lo que la existencia de una en el modelo ocasiona menor significancia en la otra.

Adicionalmente las variables relacionadas a la variación de la demanda son significativas en ambos modelos, indicando que un incremento en la diferencia de subidas y bajadas entre las expediciones contribuye a aumentar el apaltonamiento de buses. La variable que indica subida de pasajeros promedio por expedición resultó ser significativa sólo en el modelo de indicador continuo, mostrando una relación directa entre esta y la irregularidad de buses. En esta línea también, la variable que indica la proporción de expediciones que realizan la misma actividad (parar o no parar) que la expedición anterior, está presente en ambos modelos y es estadísticamente significativa, indicando que una actividad más homogénea entre las expediciones permite disminuir la intensidad de la irregularidad de buses.

Tabla 5.4: Estimación inicial de modelos de servicios 506, 506e y 206

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-53.2)	-0.006 (-45.6)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este	-0.003 (-0.5)	-0.03 (-1.9)
Una pista solo bus	-0.001 (-0.4)	-0.02 (-2.2)
Dos pistas solo bus	-0.01 (-2.3)	-0.01 (-0.9)
Corredor segregado	0.01 (4)	0.03 (5.6)
Vía Exclusiva (Variable dummy)	0.09 (7.6)	0.2 (8.1)
Paradero zona paga	-0.006 (-0.6)	0.0003 (0.01)
Paradero anterior es zona paga	-0.01 (-1.3)	-0.02 (-1.1)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.00004 (-0.6)	0.0004 (2.5)
Dos semáforos coordinados	0.005 (1.4)	0.003 (0.5)
Tres semáforos coordinados	-0.002 (-0.4)	-0.02 (-1.8)
Cuatro semáforos coordinados	0.01 (1.5)	-0.02 (-0.9)
Seis semáforos coordinados	-0.02 (-1)	-0.08 (-2)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (4 y 2)	0.02 (0.8)	-0.008 (-0.2)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (3 y 8)	0.007 (0.2)	-0.08 (-1.2)
Bloqueo de tráfico	-0.002 (-0.9)	-0.01 (-2.2)
Frecuencia programada	-0.01 (-28.1)	-0.03 (-34.9)
Proporción de expediciones desviadas	-0.08 (-6.1)	-0.09 (-3.6)
Regularidad en el despacho	0.6 (67.1)	0.32 (27.3)
Congestion	-0.007 (-1.3)	-0.005 (-0.4)
Presencia de semáforo no coordinado	0.001 (0.1)	0.02 (0.5)
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.01 (3)	0.02 (1.6)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.02 (4.5)	0.03 (4.5)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.0001 (-3.2)	0.00003 (0.4)
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.07 (-17.4)	-0.1 (-12.1)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.04 (-12)	-0.09 (-12.6)
Edad promedio de buses	-0.0006 (-0.5)	0.0001 (0.03)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.05 (-12.9)	-0.1 (-15.4)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 60 %	-0.05 (-12.9)	-0.1 (-12.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 61 % y 80 %	-0.05 (-13.3)	-0.1 (-12.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.04 (-8.8)	-0.09 (-9.3)
Operador servicio 506-506e (variable dummy)	0.04 (8.7)	0.13 (13.7)
constante	0.4 (36.4)	0.8 (38.4)
R-cuadrado	0.47	0.29
Error	0.125	0.276

Las variables que identifican la distribución del tipo de buses que pasan por los paraderos, son todas significativas y de signo negativo, es decir, todas las situaciones representadas por las variables binarias generan un aumento en la irregularidad de buses con respecto a la situación base, presencia entre 0 % y 20 % de buses articulados. Nuevamente los coeficientes de las variables que indican una distribución entre el 21 % y 40 %, 41 % y 60 % y 61 % y 80 % son similares, por lo que se debe probar la unión de estas variables en los modelos. Relacionado a la distribución del tipo de buses, se encuentra la variable “Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior”, la cual es significativa en el modelo con indicador continuo, mostrando una relación directa con la regularidad de buses, es decir, el despacho de buses consecutivos del mismo tipo ayuda a disminuir el problema en cuestión.

Finalmente la variable edad promedio de buses resulta ser no significativa a nivel individual y la variable operador servicio 506-506e es una variable significativa en ambos modelos, e indica una disminución del apelotonamiento de buses para este operador comparado con el operador del servicio 206.

En la Tabla 5.5 se muestra los modelos finales, que fueron obtenidos removiendo variables no significativas y variables con signo no esperado, además se agruparon variables que tenían coeficientes similares o que su agrupación mejoraba ya sea la significancia o el signo de la variable. Ambos modelos presentan un valor F significativo estadísticamente, además fueron validados con respecto a los modelos iniciales mediante la prueba F para modelos restringidos.

Las variables número de paradero o largo de la ruta, frecuencia programada y regularidad de buses en el despacho o inicio de la ruta, continúan siendo, en los modelos finales, significativas individualmente y presentando, las primeras dos, relación directa con el apelotonamiento de buses y la última relación inversa con la irregularidad de buses.

Adicionalmente las variables relacionadas a la demanda, referentes a la subida de pasajeros y la variación de estas, no presentan variación con respecto al resultado de la estimación inicial. Lo mismo ocurre con la variable que indica la proporción de expediciones que realizan la misma actividad (parar o no parar) que la expedición anterior.

A diferencia de la estimación inicial, la distancia entre paraderos, se observa como una variable estadísticamente significativa que se relaciona directamente al apelotonamiento de buses, solo en el modelo de indicador discreto. La explicación de este hecho no es clara, pues la significancia de esta variable podría deberse a que existe un menor número de paraderos por kilómetro antes del paradero evaluado.

Con respecto al tipo de prioridad de vía, ambos modelos se mantienen tal cual se mostraron en la estimación inicial. Identificando que la presencia de un corredor segregado o vía exclusiva reduce el apelotonamiento de buses, factores que resultan estadísticamente significativos. La variable una pista solo bus no está presente en ninguno de los modelos, por lo que se puede decir que en términos de regularidad de buses, este tipo de vía no presenta diferencias con el tipo de vía tráfico mixto, lo cual se puede explicar porque pistas solo bus no siempre son respetadas por los conductores de automóviles particulares. Por otro lado la variable dos pistas solo bus, se hace presente de manera estadísticamente significativa en el modelo de indicador continuo, revelando que en este tipo de vía se incrementa el apelotonamiento de buses, lo cual es contradictorio al resultado deseable, no obstante esta relación directa puede

Tabla 5.5: Estimación final de modelos de servicios 506, 506e y 206

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-57.6)	-0.006 (-54.3)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	-	-0.02 (-2)
Dos pistas solo bus	-0.01 (-2.5)	-
Corredor segregado	0.01 (4.8)	0.03 (6.4)
Vía Exclusiva (Variable dummy)	0.09 (7.7)	0.2 (8.3)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.0001 (-1.9)	-
Dos semáforos coordinados	-	0.02 (2.6)
Dos o tres o cuatro semáforos coordinados (variable dummy)	0.003 (1.2)	-
Bloqueo de tráfico	-	-0.01 (-2.2)
Frecuencia programada [buses/hora]	-0.01 (-28.4)	-0.03 (-36.6)
Proporción de expediciones desviadas	-0.08 (-6.1)	-0.09 (-3.5)
Regularidad en el despacho	0.6 (67.1)	0.3 (27.4)
Congestion	-0.005 (-1.1)	-
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.01 (2.8)	0.02 (1.7)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.01 (4.3)	0.03 (4.5)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.0001 (-3.4)	-
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.07 (-17.4)	-0.1 (-12.5)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.04 (-12.5)	-0.09 (-12.8)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.05 (-13.4)	-0.1 (-15.6)
El porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 41 % y 80 % (variable dummy)	-0.05 (-15.6)	-0.1 (-14.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.04 (-11.5)	-0.08 (-11.3)
Operador servicio 506-506e (variable dummy)	0.04 (11.1)	0.1 (16.8)
constante	0.4 (42.4)	0.8 (50.5)
R-cuadrado	0.47	0.29
Error	0.125	0.276

deberse a los vehículos que se estacionan en estas vías (como se explicó en el caso de estudio) o a que no hay suficiente varianza de situaciones una y dos pistas solo bus como para obtener resultados esperados.

De acuerdo a los modelos finales, la presencia de zona paga en un paradero o en el paradero anterior al evaluado, no presenta efecto en el apelonamiento de buses.

Con respecto al efecto de los semáforos, el modelo de indicador continuo muestra que la demora uniforme en semáforos intensifica el fenómeno, lo cual indica que el número de semáforos y la demora en estos, incrementa el apelonamiento de buses. En oposición, se encuentra el efecto positivo de los semáforos coordinados, variable que es detectada por el modelo de indicador discreto para el caso de dos semáforos coordinados, y por el modelo con indicador continuo para el caso de cuatro o menos semáforos coordinados. Se hace notar que esta última variable (cuatro o menos semáforos coordinados) no es significativa y su efecto combinado fue verificado con la prueba estadística F. El efecto de bloqueo de tráfico en apelonamiento de buses, explicado por una variable dummy que captura la proximidad de paraderos a un semáforo, está presente solo en el caso de indicador discreto con significancia estadística y mostrando un efecto de incremento en el problema estudiado.

Como se esperaba, la variable que indica ocurrencia de incidentes en una expedición (bus desviado, sin programación previa) se mantiene tal cual en el modelo inicial, significativa y con relación directa al apelonamiento de buses.

Congestión es una variable que fue identificada en la literatura y en entrevistas a expertos del monitoreo de buses de DTPM, sin embargo esta se presenta solo en modelo con indicador continuo y sin significancia estadística al 95 %.

En la línea de distribución de flota, ambos modelos finales capturan este efecto mediante tres variables que representan tres grupos de porcentajes de buses articulados que han pasado por el paradero-periodo evaluado (21 %-40 %, 41 %-80 %, 81 %-100 %). Las tres variables son significativas y poseen signo negativo, revelando que en cualquiera de los tres casos es más probables observar apelonamiento de buses que en el caso base, que es 0-20 % de buses articulados. La variable que indica el porcentaje de buses que son del mismo tipo que el anterior (articulado o no articulado), aparece en ambos modelos, aunque solo es significativa en el modelo de indicador continuo, el signo obtenido muestra una relación directa con la regularidad de buses.

Finalmente la variable operador servicio 506-506e se mantiene tal cual se mostró en la estimación inicial.

Variabes que inicialmente fueron incorporadas y que no se presentan en los modelos finales por consideraciones estadísticas son la edad promedio de los buses, algunas combinaciones de variables dummy referidas a semáforos coordinados y a porcentaje de buses articulados y variables referidas a pistas solo bus, a paradero-periodo zona paga y semáforo aislado.

La variación de demanda (coeficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero), presenta alta correlación con la variabilidad de intervalos, puesto que una variable es causa y consecuencia de la otra. Por esto se sustituyen las

variables referentes a la variación de demanda (coeficiente de variación de subidas y bajadas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero) por la variable coeficiente de variación de tasa de llegada promedio de pasajeros por expedición en cada paradero y se analiza si los modelos finales sufren cambios. Los resultados finales modificados se muestran en la tabla Tabla 5.6, donde se observa que el modelo con indicador continuo es el que sufre mayores cambios, lo que se explica principalmente porque dicho indicador, a diferencia del indicador discreto, es una relación directa del coeficiente de variación del intervalo, luego presenta mayor correlación con las variables eliminadas.

Observando la Tabla 5.6, se puede decir que el mayor impacto que tuvo la sustitución de variables en el modelo con indicador continuo, es la significancia estadística de las variables de demora uniforme en semáforos y aquella que indica grupo de semáforos coordinados, que en el modelo final, no presentaban significancia individual. Este último resultado es no esperado puesto que la programación de semáforos no tiene relación con la variabilidad de la demanda. Además las variables subidas de pasajeros, proporción de expediciones del mismo tipo de bus que el anterior y dos pistas sólo bus dejan de ser individualmente significativas, manteniendo el signo esperado. Caso contrario es el de la variable congestión, que continúa siendo no significativa, pero esta vez con signo no esperado (positivo). Por otro lado la variable operador resultó ser significativa al intervalo de confianza del 95 % pero de signo no esperado, indicando un resultado contrario al obtenido en modelos anteriores. Al probar el modelo final modificado sin la variable congestión y operador no se obtienen grandes cambios en el resto de las variables. Por otro lado el modelo con indicador discreto, sólo varía las variables proporción de expediciones desviadas y operador de servicio 506-506e, siendo estas no significativas. El ajuste de ambos modelos finales modificados es similar al de los modelos finales. Luego los modelos modificados no generan mayor variación en la identificación de factores que influyen en el problema en cuestión.

Tabla 5.6: Modelos finales modificados de servicios 506, 506e y 206

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coeficientes (t-stat)	Coeficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-54.4)	-0.005 (-48.7)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	-	-0.04 (-4.3)
Dos pistas solo bus	-0.008 (-1.7)	-
Corredor segregado	0.01 (6.1)	0.03 (6.6)
Vía Exclusiva (Variable dummy)	0.1 (9)	0.2 (8.2)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.0002 (-4.4)	-
Dos semáforos coordinados	-	0.02 (3.8)
Dos o tres o cuatro semáforos coordinados (variable dummy)	0.007 (2.6)	
Bloqueo de tráfico	-	-0.01 (-2.7)
Frecuencia programada [buses/hora]	-0.01 (-29)	-0.03 (-34.9)
Proporción de expediciones desviadas	-0.06 (-4.2)	-0.04 (-1.4)
Regularidad en el despacho	0.6 (64.1)	0.3 (23.3)
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.003 (0.7)	0.003 (0.4)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.02 (6.3)	0.05 (6.9)
Promedio de subidas de pasajeros acumuladas por expedición en cada paradero	-0.00001 (-0.4)	-
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de pasajeros por expedición en cada paradero	-0.06 (-32.9)	-0.2 (-47.7)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.04 (-10.9)	-0.1 (-12.3)
El porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 41 % y 80 % (variable dummy)	-0.05 (-14.2)	-0.09 (-12.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.04 (-12.7)	-0.08 (-11.5)
constante	0.5 (50.1)	1.1 (61.8)
R-cuadrado	0.47	0.335
Error	0.124	0.267

5.2. Modelación caso Gatineau

Para el caso de Gatineau se modela la regularidad de cuatro líneas comunes en el tramo Rapiibus, el cual fue construido el año 2013 y presenta alta regularidad de buses. Esto permite contrarrestar los resultados obtenidos en el caso Santiago con un sistema que opera de manera diferente (itinerarios programados) y en un tipo de vía constante, pues en la modelación de Santiago se incluyeron cuatro tipos de vías mientras que el caso presente solo se considera el BRP.

5.2.1. Modelos para Rapibus

En este caso también se estimaron modelos robustos para evitar correlación serial entre paraderos y heterocedasticidad de los errores, problemas que fueron detectados en las estimaciones iniciales. Se usaron las pruebas estadísticas t de Student y F de Fisher para corroborar la eficiencia y significancia de las variables.

Los modelos iniciales se estiman con las variables observadas en la Tabla 5.7. Los resultados se muestran en esta misma tabla, donde se detalla el coeficiente junto a su estadístico t de Student.

Tabla 5.7: Estimaciones iniciales de Rapibus

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo Coeficientes (t-stat)	Indicador Discreto Coeficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.02(-1)	-0.14 (-4.1)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	-0.01(-0.8)	-0.13 (-3.9)
Geometría de paradero: dos o más lugares de detención de buses	-0.06(-1.5)	-0.4 (-4.3)
Número de semáforos	0.009(0.7)	0.1 (3.8)
Bloqueo de tráfico	0.06(0.9)	0.6 (3.9)
Frecuencia programada [buses/hora]	-0.004 (-3.7)	-0.007 (-3.7)
Regularidad en el despacho	0.2 (4.5)	0.15 (3.3)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.04 (1.5)	0.01 (0.24)
Promedio de subidas de adultos acumuladas por expedición en cada paradero	0.0002 (0.2)	0.002 (0.8)
Promedio de subidas de estudiantes acumuladas por expedición en cada paradero	-0.003 (-1.04)	0.009 (1.5)
Promedio de subidas de adultos mayores acumuladas por expedición en cada paradero	0.08 (2.1)	0.09 (1)
Coeficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos por expedición en cada paradero	0.0003 (0.04)	0.006 (0.4)
Coeficiente de variación de tasa de llegada promedio de estudiantes por expedición en cada paradero	-0.01 (-1.3)	-0.02 (-1.4)
Coeficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos mayores por expedición en cada paradero	0.005 (1.7)	-0.002 (-0.3)
constante	0.7 (10.9)	1.1 (9.5)
R-cuadrado	0,215	0,158
Error	0,085	0,19

En este caso, nuevamente aparecen con significancia estadísticas las variables frecuencia programada de buses y regularidad en el despacho, la primera con relación inversamente proporcional a la regularidad de buses y la segunda con relación directa a esta.

Se hace notar que la variable referente al largo de la ruta o número de paradero, a diferencia

de los modelos obtenidos en el caso Santiago, es una variable que presenta un valor t de Student sin significancia estadística con intervalo de confianza del 95 %.

Las variables que indican geometría de paradero con dos o más lugares de detención y distancia entre paraderos, son variables sin significancia estadística en el modelo con indicador continuo y ambas con significancia estadística en el modelo con indicador discreto, indicando una relación inversa a la regularidad de buses.

Las variables número de semáforos entre paraderos y bloqueo de tráfico, carecen de significancia individual en el modelo con indicador continuo. La no significancia de dichas variables se justifica por la programación dinámica que tienen los semáforos, la cual da preferencia a los buses de transporte público, generando así que el efecto de semáforos sobre la regularidad de buses sea irrelevante. Por otro lado ambas variables (número de semáforos y bloqueo de tráfico) presentan significancia estadística en el modelo con indicador discreto, pero con un signo no esperado, pues indican que la presencia de bloqueo de tráfico y la presencia de semáforos favorecen la regularidad de buses, lo cual es contradictorio con resultados obtenidos en modelo para el caso Santiago.

De las variables que indican subidas de pasajeros, sólo la de adultos mayores, en el modelo con indicador continuo, es significativa a nivel individual; sin embargo, el signo observado (positiva) no es lo esperado, puesto que indica que mientras más pasajeros adultos mayores suben a los buses más regular es el intervalo de estos, lo cual se contradice con la literatura. El resultado se puede explicar porque este tipo de usuarios se traslada fuera de horarios de alta demanda en general, y por ende existe mayor regularidad. Las demás variables referentes a subidas de pasajeros son no significativas a nivel individual.

Con respecto a la variabilidad de la tasa de llegada de los tres tipos de pasajeros (adulto, estudiante y adulto mayor) no presentan significancia estadística.

La variable de porcentaje de buses que realizan la misma acción (detenerse o no detenerse) que el bus anterior en el paradero anterior al evaluado es no significativa estadísticamente.

En la Tabla 5.8 se muestra los modelos finales, que fueron obtenidos removiendo variables no significativas y variables con signo no esperado. Ambos modelos presentan un valor F significativo estadísticamente, además fueron validados con respecto a los modelos iniciales mediante la prueba F para modelos restringidos.

En los modelos finales las variables frecuencia programada y regularidad en el despacho se mantuvieron con significancia individual y signo esperado, tal cual se mostraron en las estimaciones iniciales. Importante destacar que la variable número consecutivo de paradero continúa sin significancia a nivel individual.

La variable geometría de paradero pasa a ser significativa en el modelo con indicador continuo y continua en su mismo estado en el modelo con indicador discreto, mostrando que la presencia de dos o más lugares de detención en paradero perjudica la regularidad de buses.

La variable proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior en el paradero anterior al evaluado era no significativa, con signo correcto en las

estimaciones iniciales y se mantiene en la misma condición en las estimaciones finales.

Tabla 5.8: Estimaciones finales de Rapibus

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo Coeficientes (t-stat)	Indicador Discreto Coeficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	0.004 (0.8)	-0.00005 (-0.01)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]	-	-
Geometría de paradero: dos o más lugares de detención de buses	-0.04 (-3.5)	-0.07 (-3.1)
Número de semáforos	-	-
Bloqueo de tráfico	-	-
Frecuencia programada [buses/hora]	-0.004 (-5.9)	-0.007 (-5.1)
Regularidad en el despacho	0.2 (4.4)	0.2 (3.6)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.04 (1.9)	0.05 (1)
Promedio de subidas de adultos acumuladas por expedición en cada paradero	-	-
Promedio de subidas de estudiantes acumuladas por expedición en cada paradero	-0.002 (-0.7)	-
Promedio de subidas de adultos mayores acumuladas por expedición en cada paradero	-	-
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos por expedición en cada paradero	-0.0002 (-0.03)	-
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de estudiantes por expedición en cada paradero	-0.009 (-1.2)	-0.02 (-2.1)
Coefficiente de variación de tasa de llegada promedio de adultos mayores por expedición en cada paradero	-	-
constante	0.6 (18.6)	0.7 (14.7)
R-cuadrado	0,2	0,15
Error	0,086	0,19

Las variables referidas a la demanda, específicamente las que indican subida de pasajeros, fueron eliminadas en los modelos finales, puesto que la mayoría (adultos y estudiantes) no presentaban significancia individual y la referida a adultos mayores resultaba con signo incorrecto. Lo mismo ocurre con algunas variables que representan la variabilidad de la tasa de llegada de pasajeros, en particular la de tipo de pasajeros adultos mayores, que fue eliminada de ambos modelos finales y la del tipo de pasajeros adultos que fue eliminada de ambos modelos también. Finalmente, la variable que indica variabilidad en la tasa de llegada de estudiantes resulta ser significativa a nivel individual en el modelo con indicador discreto, mas no en el modelo con indicador continuo, aunque en ambos se presencia con signo esperado (negativo), es decir, la variabilidad del número de pasajeros por minuto que llega a paraderos afecta de manera inversa la regularidad de buses.

5.3. Análisis de parámetros

Para analizar los factores que afectan en el apaltonamiento de buses, se identifican los coeficientes de las variables utilizadas en los modelos finales en ambos casos (Santiago y Gatineau). Estas variables se dividen en los cuatro grupos que fueron descritos en la sección de modelación: semáforos, infraestructura de la vía, operación de los buses y entorno de los buses.

5.3.1. Semáforos

Con respecto al efecto que generan las intersecciones semaforizadas en el apaltonamiento de buses, se obtuvo, mediante los modelos del caso Santiago y servicios 506-506e, que la demora uniforme en semáforos intensifica el fenómeno, esto indica que tanto el número de semáforos que hay antes del paradero como los tiempos de luz roja en estos, contribuyen a aumentar la probabilidad que los buses modifiquen sus intervalos con respecto a lo esperado. Por otro lado con respecto a la coordinación de semáforos, el modelo con indicador discreto muestra que sólo aquellas situaciones en que hay dos semáforos coordinados permiten reducir el efecto que generan los semáforos en el apaltonamiento de buses, mientras que en el modelo de indicador continuo se tiene que cuatro o menos semáforos coordinados generan el mismo efecto, no obstante esta variable (suma de situación en que hay dos, tres y cuatro semáforos coordinados) no es significativa dentro del modelo.

La variable semáforo aislado, identificada en la entrevista realizada a personal del centro de monitoreo de buses de DTPM, impide que se puedan alargar los tiempos de verde en aquellas intersecciones semaforizadas por donde pasa más transporte público, generando que la congestión experimentada por los buses no pueda ser revertida. Sin embargo la variable semáforo aislado no está presente en ninguno de los modelos finales, por lo que no se puede declarar como un factor causante del problema en estudio, sino más bien una forma de gestionarlo.

El bloqueo de partida de los buses, explicado por la variable que indica la existencia de un semáforo cercano (30 metros o menos) al paradero anterior al evaluado, está presente en los modelos finales del caso Santiago, específicamente en el modelo con indicador continuo y servicios 506-506e y en el modelo con indicador discreto y servicios 506-506e-206. En todos estos resultados, el signo del coeficiente de la variable es negativo, indicando una relación directa con el apaltonamiento de buses, es decir, el efecto de situar semáforos cercanos a paraderos intensifica el problema de irregularidad de buses.

5.3.2. Infraestructura de la vía

El largo de la ruta o número de paradero aparece en los modelos finales del caso Santiago (506-506e y 506-506e-206), indicando que hacia el final de la ruta el apaltonamiento de buses es más probable que al inicio de esta. Resultado que es coherente con lo reportado en

el estado del arte.

La distancia entre paraderos se hace presente solamente en el modelo final con indicador discreto del caso Santiago y servicios 506-506e-206. El coeficiente de esta variable es negativo, mostrando que mientras más distantes se encuentren los paraderos, más facilidad existe para el apelotonamiento de buses. Resultado que es coherente con lo encontrado en el estado del arte.

En cuanto a la prioridad de vía, los modelos que miden este tipo de variables (caso Santiago), han mostrado que el efecto que ejerce el corredor segregado y la vía exclusiva es beneficioso en cuanto a la disminución del apelotonamiento de buses, comparado con el caso base que es tráfico mixto. La relación inversa entre prioridad de vía y variabilidad de tiempo de viaje se encuentra identificado en la literatura (Surprenant-Legault y El-Geneidy, 2011), además personal del centro de monitoreo de vehículos de DTPM han observado que en tipo de vía corredor segregado la irregularidad de buses es menor. Este mismo efecto se esperaba para los factores una y dos pistas solo bus, no obstante la variable una pista solo bus no está presente en ninguno de los modelos, por lo que se puede decir que en términos de regularidad de buses, este tipo de vía no presenta diferencias con el tipo de vía tráfico mixto, lo cual se puede explicar porque esta forma de prioridad no siempre es respetado por auto particulares. Por otro lado la variable dos pistas solo bus, se hace presente de manera estadísticamente significativa en el modelo de indicador continuo (con datos de los tres servicios), revelando que en este tipo de vía se incrementa el apelotonamiento de buses, lo cual es contradictorio al resultado deseable, no obstante esta relación directa puede deberse a los vehículos que estacionan permanentemente en estas vías (como se explicó en el caso de estudio).

De acuerdo a los modelos finales del caso Santiago, la presencia de zona paga en un paradero o en el paradero anterior al evaluado, no presenta efecto en el apelotonamiento de buses.

Por último la variable que indica geometría de paradero (dos o más lugares de detención de buses en el paradero) resulta ser una variable significativa dentro de los modelos final, caso Gatineau, es decir, el apelotonamiento de buses aumenta en el caso dos o más lugares de detención, lo cual se puede explicar por el aumento de flujo de buses en dichos paraderos.

5.3.3. Operación de los buses

La frecuencia programada es una de las variables más importantes en el modelamiento del apelotonamiento de buses, en todos los modelos la frecuencia programada presenta significancia estadística e indica que en aquellos horarios en que la frecuencia programada es mayor existe una mayor probabilidad de presenciar apelotonamiento de buses. Al igual que la frecuencia, la irregularidad en el despacho de los buses es una variable que se repite, pues en todos los modelos la regularidad al inicio de ruta se encuentra presente y es una variable significativa estadísticamente. El resultado indica que las expediciones que son despachadas con intervalos irregulares contribuyen a aumentar el apelotonamiento de buses en los paraderos servidos. Las variables referentes a la distribución del tipo de bus de la flota operativa, que se prueban solamente en los modelos del caso Santiago, capturan este efecto mediante tres

grupos de porcentajes de buses articulados que han pasado por el paradero-periodo evaluado (21 %-40 %, 41 %-80 %, 81 %-100 %). Los grupos en los extremos (0 %-20 %, 81 %-100 %) son aquellos que presentan una flota más homogénea; luego, como todas las variables aumentan el apelotonamiento en comparación con el caso 0 %-20 % de buses articulados y además el grupo 81 %-100 % presenta el menor coeficiente, en valor absoluto, de las tres variables, se puede decir que una flota homogénea favorece la regularidad de los buses, adicionalmente, una flota homogénea de buses no articulados es preferible sobre buses articulados. Un efecto similar es capturado de manera desagregada con la variable que indica el porcentaje de buses que son del mismo tipo que el anterior (articulado o no articulado), la cual aparece de manera significativa en los modelos finales con indicador continuo y contribuye a disminuir el apelotonamiento de buses.

Ambos modelos finales del caso Santiago, con datos de los tres servicios, indican diferencia entre operadores a nivel de apelotonamiento de buses, puesto que, la variable que indica operador de los servicios 506 y 506e genera menos apelotonamiento de buses que el operador del servicio 206.

Finalmente la variable edad promedio de buses no es relevante en el fenómeno estudiado, pues no se hace presente en ninguno de los modelos finales.

5.3.4. Entorno de los buses

Los incidentes ocurridos a las expediciones, específicamente del tipo desvío no programado en la ruta, genera que los buses varíen sus intervalos con respecto a lo esperado, pues en todos los modelos finales del caso Santiago, está presente la variable de expediciones desviadas, indicando que si aumenta dicho valor porcentual aumenta también el apelotonamiento de buses.

La congestión es una variable que fue identificada tanto en la revisión bibliográfica como en la entrevista llevada a cabo con personal del centro de monitoreo de buses de DTPM, no obstante se encuentra presente solamente en los modelos finales con indicador continuo sin significancia estadística.

La variable que indica subida de pasajeros promedio por expedición, en el caso Santiago, resultó ser significativa en todos los modelos finales, excepto en el modelo con indicador discreto y servicios 506-506e-206 y los modelos con la variable que indica la variación de la tasa de llegada de pasajeros en vez de la variación de subidas y bajadas, mostrando una relación directa entre las subidas y la irregularidad de buses, es decir, en horarios de alta demanda el apelotonamiento de buses aumenta. En el caso Gatineau, esta misma variable no se hace presente en el modelo final, es decir, aquellos horarios de alta demanda no generan un efecto significativo en cuanto al apelotonamiento de buses, hecho que se debe principalmente a que el análisis utiliza datos de horarios punta, por lo que dentro de estos horarios los momentos de mayor demanda no generan gran diferencia con el resto del tiempo.

Adicionalmente las variables relacionadas a la variación de la demanda (coeficiente de variación de subidas, bajadas y tasa de llegada) son significativas en todos los modelos fi-

nales del caso Santiago, indicando que un incremento en la diferencia de subidas, bajadas y tasa de llegada entre las expediciones contribuye a aumentar el apelonamiento de buses. Consecuentemente en el modelo caso Gatineau, la variable coeficiente de variación de tasa de llegada de estudiantes es significativa en el modelo con indicador discreto y presenta signo negativo, indicando que la variabilidad de llegada de estudiantes por minuto favorece el apelonamiento de buses.

En esta línea, la variable que indica la proporción de expediciones que realizan la misma actividad (parar o no parar) que la expedición anterior, está presente en todos los modelos finales, en el caso Santiago es estadísticamente significativa, indicando que una actividad más homogénea entre las expediciones permite disminuir la intensidad de la irregularidad de buses.

Por otro lado variables dummy por periodos (como periodo punta mañana, periodo punta tarde, entre otros) fueron probadas en los modelos, no obstante algunas de estas variables presentaban alta correlación con la variable de subidas de pasajeros, por tando se decidió dejarlas afuera del análisis.

5.3.5. Importancia relativa de los parámetros

Para identificar el orden relativo de importancia de los factores identificados en el apelonamiento de buses se utilizan los coeficientes tipificados o estandarizados (ver ecuación 5.1), los cuales ayudan a valorar la importancia relativa de cada variable independiente (X_i) en la variable dependiente o estudiada (Z). Para esto se utilizaron los modelos finales, con indicador continuo y discreto, del caso Santiago, servicios 506-506e-206. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5.9.

$$\beta_{\text{estandarizado}} = \beta_{\text{no-estandarizado}} * \frac{\text{desviación_típica}(X_i)}{\text{desviación_típica}(Z)} \quad (5.1)$$

El modelo con indicador continuo indica el siguiente orden descendiente en importancia de las variables:

- Regularidad en despacho.
- Número consecutivo de paradero.
- Frecuencia programada.
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 41 % y 80 %.
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 21 % y 40 %.
- Coeficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero.
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 81 % y 100 %.
- Operador servicio 506-506e.
- Coeficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero.

- Vía exclusiva.
- Proporción de expediciones que han sido desviadas.
- Corredor segregado.
- Subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero.
- Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a ésta.
- Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expediciones anterior a ésta.
- Dos pistas sólo bus.
- Demora uniforme promedio.
- Dos o tres o cuatro semáforos coordinados.
- Congestión.

En el modelo con indicador discreto las variables independientes en orden descendiente de importancia son:

- Número consecutivo de paradero.
- Frecuencia programada.
- Regularidad en despacho.
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 41 % y 80 %.
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 21 % y 40 %
- Operador servicio 506-506e
- Porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 81 % y 100 %
- Coeficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero
- Coeficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero
- Vía exclusiva
- Corredor segregado
- Dos semáforos coordinados
- Proporción de expediciones que han sido desviadas
- Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta
- Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a éste
- Bloqueo de tráfico
- Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expediciones anterior a esta

Tabla 5.9: Importancia relativa de factores que afectan el apelsonamiento de buses

Variables	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes tipificados	Coefficientes tipificados
Número consecutivo de paradero	-0.396	-0.383
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este [km]		-0.014
Dos pistas solo bus (Variable dummy)	-0.015	
Corredor Segregado (Variable dummy)	0.031	0.047
Vía Exclusiva (Variable dummy)	0.06	0.064
Demora uniforme promedio	-0.014	
Dos semáforos coordinados (variable dummy)		0.019
Dos o tres o cuatro semáforos coordinados (variable dummy)	0.009	
Bloqueo de tráfico (variables dummy)		-0.014
Frecuencia programada [buses/hora]	-0.177	-0.234
Proporción de expediciones que han sido desviadas	-0.034	-0.022
Regularidad en despacho	0.433	0.197
Congestión (variable dummy)	-0.006	
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expediciones anterior a esta	0.021	0.014
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.023	0.028
Subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.025	
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.104	-0.082
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.067	-0.082
El porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 21 % y 40 % (variable dummy)	-0.11	-0.146
El porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 41 % y 80 % (variable dummy)	-0.153	-0.165
El porcentaje de buses articulados que ha pasado está entre 81 % y 100 % (variable dummy)	-0.092	-0.101
Operador servicio 506-506e (variable dummy)	0.083	0.143

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se describe el fenómeno de apelotonamiento de buses mediante un indicador de tipo continuo y otro de tipo discreto. Usando datos disponibles de la operación del sistema de transporte público (sistemas de posicionamiento automático de vehículos y de colección automática de tarifa), se construyeron mapas de apelotonamiento de buses y se calibraron modelos de regresión lineal para explicar el fenómeno. Se desarrollaron dos modelos: uno en base al indicador continuo como variable dependiente y otro en base al indicador discreto como variable dependiente. Utilizando en la revisión bibliográfica y consultas a expertos de monitoreo de buses de DTPM, se construyeron hipótesis con respecto a variables relevantes en el fenómeno estudiado, algunas fueron validadas mediante la modelación de los datos y otras no.

En primer lugar se concluye que es posible explicar el fenómeno de la irregularidad del intervalo entre buses mediante modelos de regresión lineal múltiple y que datos provenientes de los sistemas de localización automática de vehículos (AVL) y de colección automática de tarifa (AFC) permiten estudiar el fenómeno de apelotonamiento de buses a un bajo costo y con un alto volumen de datos, permitiendo así calibrar modelos que consideren datos representativos de diversas situaciones y ricos en variabilidad.

También existen variados indicadores para medir el apelotonamiento de buses y se pueden clasificar en indicadores de tipo continuo y de tipo discreto, como se mencionó en la revisión de la literatura. La utilización de indicadores de apelotonamiento de buses permite generar información gráfica para identificar servicios, lugares y horarios en que el problema es más intenso y por tanto requiere de mayor gestión. Con respecto a la comparación entre el indicador continuo y discreto, utilizados en este trabajo, el indicador continuo explica de mejor manera aquellos casos de intensidad media de apelotonamiento de buses, mientras que el indicador discreto explica de mejor manera aquellos casos extremos o severos de apelotonamiento de buses.

En este trabajo se analizaron dos casos, el de Santiago con tres servicios y el de Gatineau

con cuatro líneas comunes en el tramo BRT. El primero opera principalmente por frecuencia mientras que el segundo opera con itinerarios programados. Esto permite mostrar que los indicadores seleccionados permiten representar la irregularidad de buses en ambos casos, los cuales distan en forma de operación, condiciones de infraestructura de la vía y estructura de la demanda de pasajeros.

Los intervalos de tiempo entre buses fueron medidos como la diferencia entre el instante en que cada bus pasó por el paradero evaluado. En el caso de Santiago, esta diferencia es obtenida con una interpolación lineal de pulsos GPS. Este tipo de dato permitió ingresar al estudio ventanas temporales que comprenden horarios punta y valle, en cuanto a la demanda. Mientras que en el caso Gatineau, la diferencia se obtuvo mediante datos obtenidos del sistema de colección automática de tarifa de pasajeros en los buses, específicamente se toma el tiempo del primer pasajero que sube al bus como instante de pasada del bus por el paradero. En aquellos paraderos que no se subió ningún pasajero pero que en algún paradero anterior y posterior si hay subida de usuarios, se realizó una interpolación lineal entre los tiempos de ambos paraderos extremos. Esta metodología obligó a ingresar ventanas de tiempos que comprenden únicamente los horarios de mayor demanda, pues la validación de pasajeros es la que hace posible obtener los intervalos. En base a esto se puede decir que los datos GPS son más eficientes en la metodología propuesta, puesto que permiten ingresar mayor variabilidad en cuanto a la variable dependiente capturando efectos en horarios de alta y baja demanda.

La regularidad de buses al inicio de ruta o en el despacho, que fue medida mediante la transformación de indicador continuo y discreto al inicio de ruta o en el despacho de buses, presenta gran importancia entre los factores que afectan al apilotonamiento de buses, mostrando que la regularidad del despacho de buses favorece la mantención de intervalos en el camino recorrido por los buses.

El largo de la ruta es un factor relevante a la hora de analizar el problema en cuestión, pues a medida que los buses avanzan, se exponen a mayor aleatoriedad del entorno, lo cual les impide mantener el intervalo esperado. Sumado a esto, la distancia entre paraderos ha mostrado una relación directa con el apilotonamiento de buses, es decir a mayor distancia entre paradas más irregular se tornan los servicios de buses.

Evidente es el efecto que genera la alta frecuencia de buses en el apilotonamiento de estos, pues todos los modelos indicaron este hecho, razón por la cual sistemas de alta frecuencia de transporte público deben incluir dentro de sus indicadores de calidad de servicio indicadores de regularidad y herramientas de visualización que les permita identificar sectores y horarios de mayor gravedad en el problema tratado. No así sistemas de transporte de baja frecuencia en que es de mayor relevancia la puntualidad de los buses que la regularidad de estos, pues al tratarse de intervalos de tiempos mayores, los usuarios programan sus llegadas para coincidir con la llegada del bus. En esta línea se podría aconsejar disminuir la frecuencia de buses, no obstante esto haría, al igual que la irregularidad de buses, aumentar el tiempo de espera de los pasajeros, por lo que el apilotonamiento en buses frecuentes puede ser menos grave.

Con respecto a la distribución del tipo de flota, se tiene que mientras más homogénea se encuentre la flota de buses mayor regularidad de estos presenciaran los pasajeros. Además la relación entre apilotonamiento de buses y porcentaje de buses articulados no es una función lineal, ya que el tramo entre 81 %-100 % de buses articulados genera un aumento de

irregularidad (con respecto al tramo 0 %-20 % de buses articulados) menor a la generada por tramos entre 21 %-80 %, lo cual se debe básicamente a que el primer grupo se compone de una flota más homogénea que el segundo grupo. A esto se suma que la regularidad se beneficia en mayor medida con una flota homogénea de tipo no articulada que de tipo articulada, hecho que se contradice con lo reportado por Diab y El-Geneidy (2013), que encontraron una relación inversa entre la variabilidad del tiempo de viaje y el uso de buses articulados. Por último el despacho de buses consecutivos del mismo tipo (articulado-no articulado) contribuye a la disminución del apelotonamiento de buses.

Analizando variables de demanda se comprueba la hipótesis de que en horarios de alta demanda y variabilidad de esta se presencia mayor irregularidad de buses. El efecto segmentado entre adultos, estudiantes y adultos mayores, no mostró ser relevante para el problema en cuestión, situación que se explica por el horario diferenciado en que se trasladan los distintos tipos de usuarios. Se destaca que la variación de pasajeros estudiantes, es la que cobra mayor relevancia en el efecto que ejerce en el apelotonamiento de buses en Gatineau.

La variabilidad de la demanda fue medida mediante el coeficiente de variación de subidas y bajadas acumuladas en los buses y mediante la tasa de llegada de pasajeros al paradero (llegadas por minuto) promedio que experimentan los buses en su recorrido. La segunda forma tiene el objetivo de evitar la correlación entre la variable dependiente y la variabilidad de demanda, puesto que la variación directa de subidas y bajadas es causa y consecuencia del apelotonamiento de buses. Finalmente el uso de la tasa de llegada en los modelos entrega mayor relevancia a la variabilidad de la demanda (variable significativa estadísticamente) y disminuye la importancia del total de demanda (variable no significativa estadísticamente).

Las variables que indican prioridad de vía en Santiago (corredor segregado y vía exclusiva) son significativas y muestran la relación directa que hay entre este tipo de prioridad y la regularidad que experimentan los buses. No obstante las variables que indican tipo de prioridad una y dos pistas solo bus, no son relevante en la disminución del apelotonamiento de buses, siendo la principal razón el poco respeto de los vehículos privados en el usos de estas vías, más aun, aquellos tramos de dos pistas solo buses que presentan constantemente autos estacionados en su costado, muestran aumento de variabilidad de intervalo de buses con respecto a tráfico mixto. En conclusión aquellas vías que priorizan vehículos del transporte público, y que son respetadas por auto particulares, presentan menos apelotonamiento de buses que vías con tráfico mixto. Además el uso de estacionamientos de autos en los costados de las calles perjudica la regularidad de buses del transporte público.

Con respecto al tipo de paraderos, aquellos de zona paga no mostraron generar algún efecto en la regularidad de buses y en cuanto a la geometría de estos, aquellos que presentan dos o más lugares de detención de buses aumentan el apelotonamiento de buses.

El efecto generado por semáforos, se caracteriza por aumentar el apelotonamiento de buses en aquellos tramos con mayor número de cruces semaforizados y mayor tiempo de luz roja de estos. Por el contrario aquellos semáforos que se encuentran coordinados en redes contribuyen a disminuir el efecto generado por el número y tiempos de semáforos en la irregularidad de buses. Además aquellos semáforos que se encuentran posterior a paraderos en menos de 30 metros, ejercen un efecto de bloque de tráfico que contribuye a aumentar el apelotonamiento de buses. Se hace notar, que pese a que el centro de monitoreo de buses de DTPM, detectó

relación entre el apelsonamiento de buses y semáforos aislados, no se logró probar dicha relación en los modelos propuestos.

Los modelos desarrollados, permiten afirmar que la antigüedad de los buses no es un factor relevante en el problema estudiado.

Los incidentes que experimentan los buses, son medidos como el porcentaje de expediciones con desvíos no programados, hecho que según muestran los modelos, aumenta el apelsonamiento de buses. La congestión se midió como variable dummy, que toma valor uno cuando el tramo estudiado presenta una velocidad promedio menor o igual a 15km/hr y la desviación estándar de las velocidades es menor o igual 30% de la velocidad promedio. Esta variable no presenta un efecto significativo en el apelsonamiento de buses, no obstante se hace presente en algunos modelos, indicando que los tramos-horarios con congestión generan mayor irregularidad de buses que los tramos que no presentan este problema.

En último lugar los modelos permiten afirmar que una actividad (detenerse o no detenerse) más homogénea entre las expediciones permite disminuir la intensidad de la irregularidad de buses.

A modo de resumen, de acuerdo a los datos analizados, los factores que contribuyen a incrementar el apelsonamiento de buses se clasifican en los siguientes tres grupos (en orden descendente de importancia):

Grupo 1

- Largo de la ruta
- Frecuencia programada alta
- Despacho irregular de buses

Grupo 2

- Flota no homogénea, es decir, combinación de buses articulados y no articulados
- Variabilidad de la demanda

Grupo 3

- Buses desviados (buses que fueron desviados de su camino habitual sin previa programación)
- Semáforos (demora uniforme y posibilidad de intersecciones con bloqueo de tráfico)

Factores que contribuyen a disminuir el apelsonamiento de buses son los siguientes (en orden descendente de importancia, en base a resultados tanto de modelación con indicador continuo como con indicador discreto):

- Presencia de vía exclusiva
- Presencia de corredor segregado
- Actividad (detenerse o no detenerse) homogénea en paraderos entre buses consecutivos
- Coordinación de semáforos

También se hace notar la diferencia entre operadores a nivel de apaltonamiento de buses, puesto que ambos modelos mostraron como resultado que el operador del servicio 506-506e genera menos apaltonamiento de buses que el operador del servicio 206.

Los resultados de modelación que se obtuvieron permiten confirmar o rechazar hipótesis o resultados de otros trabajos referidos al mismo tema y que fueron mencionados en la revisión bibliográfica de este trabajo. Aquellos resultados que se prueban son: la relación entre el apaltonamiento de buses y la distancia recorrida fue identificada por Bellei y Gkoumas (2010), el efecto que genera la demanda en la irregularidad de buses fue identificada por Bellei y Gkoumas (2010), Moreira-Matias et al. (2012) y Man y Wenquan (2013), la relación positiva entre la frecuencia y el apaltonamiento de buses fue identificada por Moreira-Matias et al. (2012) y Man y Wenquan (2013) y la relación directa entre el problema estudiado y la irregularidad al inicio de la ruta (despacho de buses irregulares) fue identificada por Moreira-Matias et al. (2012). Sin embargo, hay otros efecto mencionados en la literatura que no fueron encontrados en los modelos desarrollados en este trabajo. Por ejemplo, no se encontró una relación significativa entre la congestión y el apaltonamiento de buses, la cual fue encontrada por Man y Wenquan (2013).

6.2. Recomendaciones prácticas

Los resultados de este trabajo proveen algunos lineamientos para diseñar y operar los servicios de buses, tomando en consideración la importancia del problema de apaltonamiento de buses. De acuerdo a los resultados, se recomienda a operadores y reguladores considerar los siguientes aspectos:

- Diseñar servicios que pasen por vías que tengan prioridad al sistema de transporte público.
- Diseñar servicios de tramos cortos.
- Distancia mayor a 30 metros entre paraderos y semáforos posteriores.
- Poner especial énfasis en la regularidad del despacho de buses.
- Favorecer el despacho de buses consecutivos del mismo tipo (articulado-no articulado) y flotas homogéneas (con prioridad aquellas de buses no articulados).
- Programar aquellas actividades que requieran de desvío de buses para horarios de baja frecuencia y/o baja demanda.
- Implementar corredores segregados y/o vías exclusivas en aquellos tramos de mayor congestión.
- Diferenciar horarios de entrada y salida de actividades de distintos tipos de usuarios, como por ejemplo, horario laboral y escolar. Esto con el objetivo de distribuir los periodos de alta demanda en un mayor tiempo y disminuir así el total de subidas por bus.

6.3. Recomendaciones metodológicas y trabajo futuro

El resultado de este trabajo permite identificar una serie de aspectos metodológicos que deben ser probados, con el objetivo de validar hipótesis que no pudieron ser probadas por los modelos estimados en este trabajo.

Se requiere ingresar nuevos servicios al estudio, con el propósito de aumentar la variabilidad de los datos y validar así los resultados entregados mediante este trabajo con una gran gama de información. Esto permitiría además validar hipótesis que no lograron ser verificadas en el desarrollo del presente, como por ejemplo el efecto que generan la geometría de los paraderos y la congestión en el apaltonamiento de buses.

Con respecto a la variable que indica bloqueo de tráfico, se recomienda realizar un análisis de sensibilidad, probando distancias mayores a 30 metros entre paraderos y semáforos, con el objetivo de encontrar una distancia exacta recomendada entre semáforos y paraderos. En línea de esto, también se sugiere probar nuevas formas de modelar o medir la variable congestión, como por ejemplo mediciones en terreno o información automatizada de flujos de automóviles que permitan asignar congestión a tramos-horarios que reiteradamente presentan este problema.

Finalmente se observa la necesidad de estudiar con mayor extensión la regularidad de buses en servicios de trayecto común, pues este es el problema que en la práctica enfrentan los usuarios. Para esto se pueden utilizar los indicadores utilizados en este trabajo o identificar otros que puedan medir de mejor manera la intensidad del problema de apaltonamiento de buses. En esta línea se recomienda probar datos de ambas ciudades (Santiago y Gatinau) en un mismo modelo con el objetivo de obtener mediciones comparables entre ambas ciudades.

También se hace necesario probar modelos para diferentes niveles de agregación de los datos, reuniendo por ejemplo indicadores por tramos y periodos de tiempo o simplemente por expediciones.

Bibliografía

- Albright, E. y Figliozzi, M. A. (2012). Analysis of the impacts of transit signal priority on bus bunching and performance. En *Proceedings of the 12th Conference on Advanced Systems for Public Transport. Santiago, Chile*.
- Barnett, A. (1974). On controlling randomness in transit operations. *Transportation Science*, 8(2):102–116.
- Bartholdi, J. J. y Eisenstein, D. D. (2012). A self-coördinating bus route to resist bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4):481–491.
- Bellei, G. y Gkoumas, K. (2010). Transit vehicles’ headway distribution and service irregularity. *Public transport*, 2(4):269–289.
- Byon, Y.-J., Cortés, C. E., Martínez, C., Javier, F., Munizaga, M., y Zuniga, M. (2011). Transit performance monitoring and analysis with massive GPS bus probes of Transantiago in Santiago, Chile: Emphasis on development of indices for bunching and schedule adherence. En *Transportation Research Board 90th Annual Meeting 11-2233*.
- Chen, G., Huang, L., Liu, H., y Yang, X. (2013a). Effects of bunching at stops on bus dwell time. En *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, pp. 1499–1502. IEEE.
- Chen, Q., Adida, E., y Lin, J. (2013b). Implementation of an iterative headway-based bus holding strategy with real-time information. *Public Transport*, 4(3):165–186.
- Chu, K. y Chapleau, R. (2008). Enriching archived smart card transaction data for transit demand modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2063):63–72.
- Cortés, C. E., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., y Zúñiga, M. (2011). Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4):695–707.
- Daganzo, C. F. (2009). A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(10):913–921.
- Diab, E. I. y El-Geneidy, A. M. (2013). Variation in bus transit service: understanding the

- impacts of various improvement strategies on transit service reliability. *Public Transport*, 4(3):209–231.
- Furth, P. y Muller, T. (2006). Part 4: Capacity and quality of service: Service reliability and hidden waiting time: Insights from automatic vehicle location data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1955):79–87.
- Gershenson, C. y Pineda, L. A. (2009). Why does public transport not arrive on time? the pervasiveness of equal headway instability. *PloS one*, 4(10):e7292.
- Gibson, J., Munizaga, M., Schneider, C., y Tirachini, A. (2015). Median busways versus mixed-traffic: Estimation of bus travel time under different priority conditions with explicit modelling of delay at traffic signals. En *Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington, DC*.
- Guenther, R. P. y Hamat, K. (1988). *Distribution of bus transit on-time performance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1202, pp.1-8.
- Holroyd, E. y Scraggs, D. (1966). *Waiting times for buses in central London*. Printerhall, Londres, Inglaterra.
- Lee, D.-H., Sun, L., y Erath, A. (2012). Study of bus service reliability in Singapore using fare card data. En *12th Asia-Pacific Intelligent Transportation Forum, Kuala Lumpur, Malaysia*.
- Li, F., Yang, D., y Ma, K. (2013). Bus rapid transit (BRT) bunching analysis with massive GPS data. En *Fourth International Conference on Transportation Engineering, Chengdu, China*.
- 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.
- Lomax, T., Schrank, D., Turner, S., y Margiotta, R. (2003). Selecting travel reliability measures. *Texas Transportation Institute monograph (May 2003), Texas, Estados Unidos*.
- Mazloumi, E., Currie, G., y Rose, G. (2009). Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7):623–631.
- 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.
- Munizaga, M. A. y Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24:9–18.
- 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, Universidad

de Chile.

- O'flaherty, C. y Mangan, D. (1900). Bus passenger waiting times in central areas. *Traffic Engineering Control* 11:419–421.
- Osuna, E. y Newell, G. (1972). Control strategies for an idealized public transportation system. *Transportation Science*, 6(1):52–72.
- Pilachowski, J. M. (2009). An approach to reducing bus bunching. *Tesis de doctorado, University of California Transportation Center*.
- Slavin, C., Feng, W., Figliozzi, M., y Koonce, P. (2013). Statistical study of the impact of adaptive traffic signal control on traffic and transit performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2356):117–126.
- Strathman, J. G. y Hopper, J. R. (1993). Empirical analysis of bus transit on-time performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(2):93–100.
- Strathman, J. G., Kimpel, T. J., y Callas, S. (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.
- Surprenant-Legault, J. y El-Geneidy, A. (2011). Introduction of reserved bus lane: Impact on bus running time and on-time performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2218):10–18.
- TRB (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, volumen 100. National Research Council, Wasingtong DC.
- Trompet, M., Liu, X., y Graham, D. (2011). Development of key performance indicator to compare regularity of service between urban bus operators. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2216):33–41.
- Turnquist, M. A. (1978). *A model for investigating the effects of service frequency and reliability on bus passenger waiting times*. *Transportation Research Record* 663, 1978, pp. 70-73.
- Welding, P. (1957). The instability of a close-interval service. *OR*, 8(3):133–142.
- Yetiskul, E. y Senbil, M. (2012). Public bus transit travel-time variability in Ankara (Turkey). *Transport Policy*, 23:50–59.
- Zhang, M. y Li, W. (2013). Factors affecting headway regularity on bus routes. *Journal of Southeast University*, 29(1):99–102.

Anexo A

Validaciones por tipo de usuario

A.1. Tramo de Rapibus en dirección norte

Figura A.1: Validaciones de adultos por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas

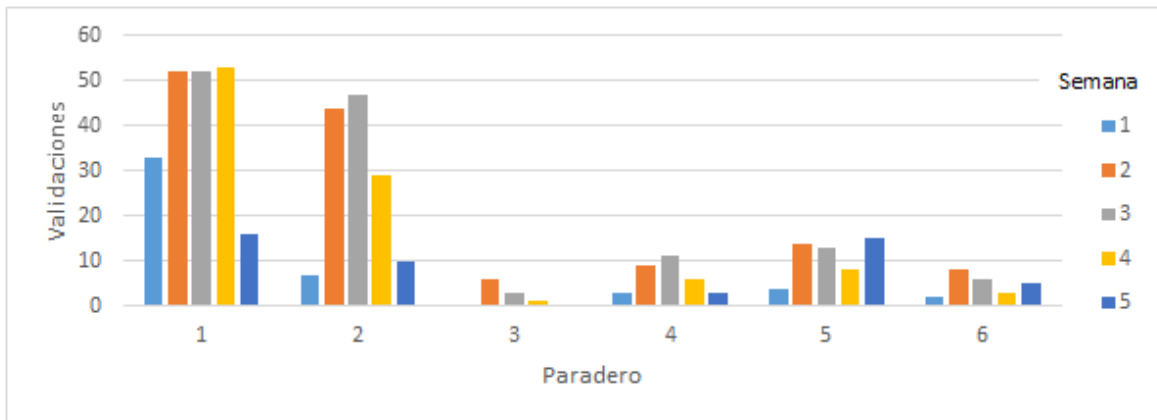


Figura A.2: Validaciones de estudiantes por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas

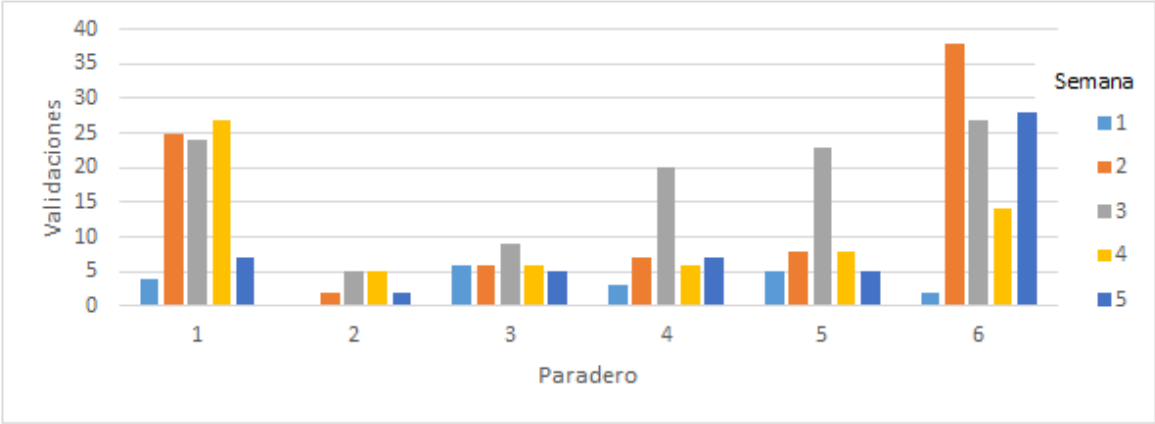
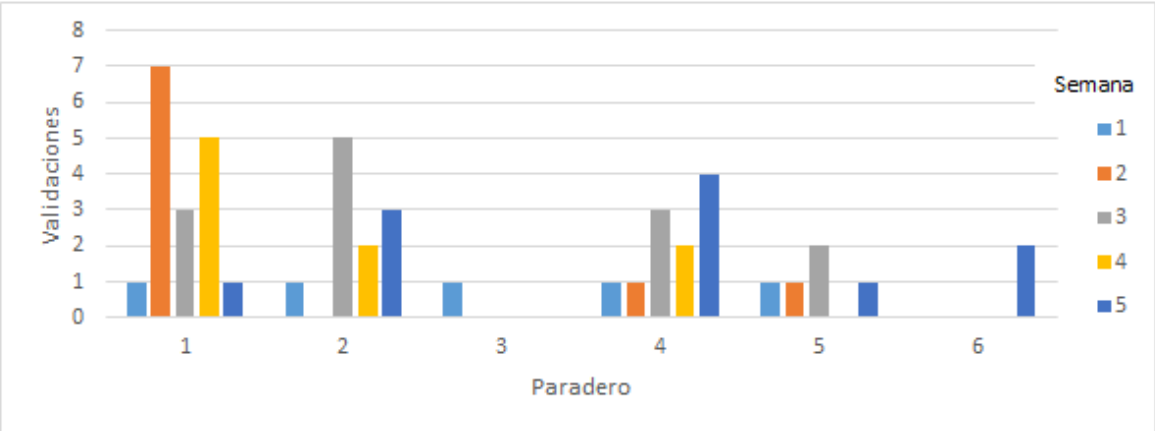


Figura A.3: Validaciones de adultos mayores por semana y paraderos en tramo dirección norte, entre las 14:00 y las 18:30 horas



A.2. Tramo de Rapibus en dirección sur

Figura A.4: Validaciones de adultos por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas

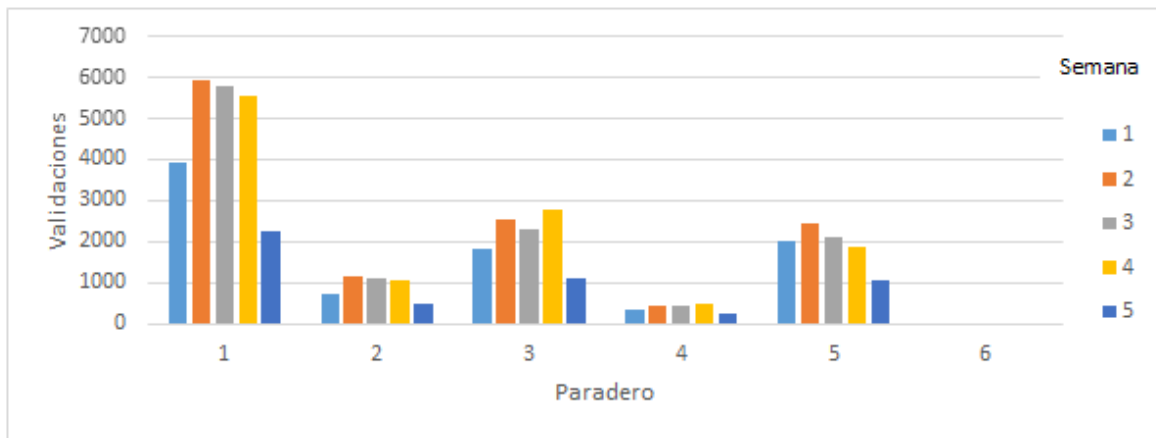


Figura A.5: Validaciones de estudiantes por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas

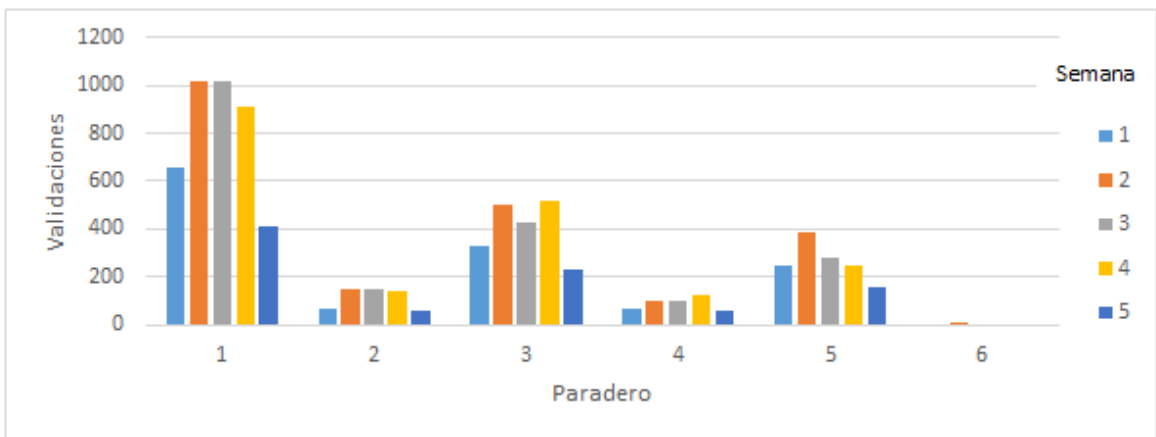
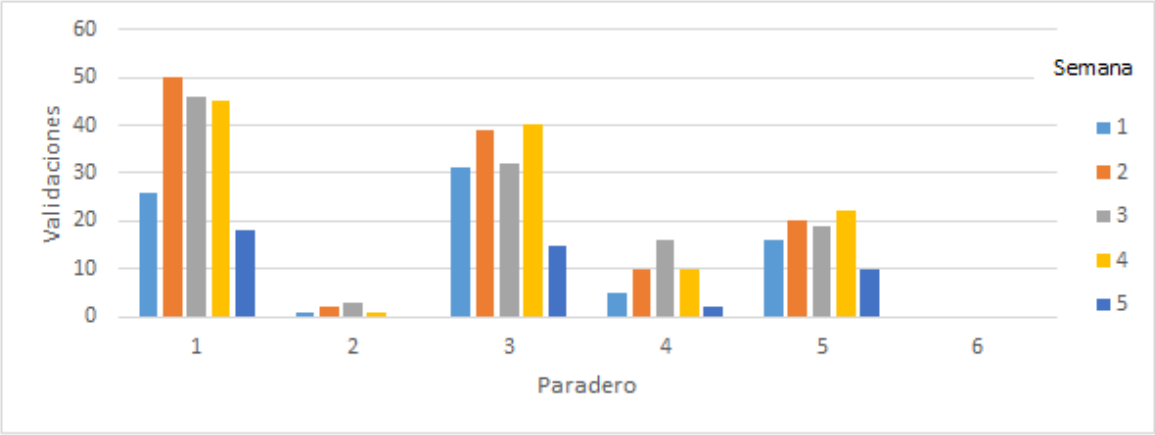


Figura A.6: Validaciones de adultos mayores por semana y paraderos en tramo dirección sur, entre las 6:00 y las 9:30 horas



Anexo B

Modelos

B.1. Modelo autoregresivo con servicios 506 y 506e

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Regularidad en el paradero anterior (rezago)	0.976 (399.7)	0.89183 (203.34)
constante	0.026 (7.1)	0.053 (23.1)
R-cuadrado	0.935	0.819
Error	0.044	0.14

B.2. Primera estimación de modelos con servicios 506 y 506e

Modelo inicial estimado con el método de mínimos cuadrados ordinarios.

Variables	Regularidad	Regularidad
	Indicador Continuo	Indicador Discreto
	Coefficientes (t-stat)	Coefficientes (t-stat)
Número consecutivo de paradero	-0.003 (-48.3)	-0.006 (-42.3)
Distancia entre el paradero evaluado y el anterior a este	-0.002 (-0.3)	-0.026 (-1.8)
Una pista solo bus	-0.001 (-0.9)	-0.014 (-1.9)
Dos pistas solo bus	-0.005 (-1.2)	0.002 (0.2)
Corredor segregado	0.016 (5.7)	0.046 (7.4)
Paradero zona paga	-0.001 (-0.1)	0.012 (0.6)
Paradero anterior es zona paga	-0.01 (-1.1)	-0.018 (-0.9)
Demora uniforme promedio en semáforos	-0.0001 (-1.8)	0.0001 (0.7)
Dos semáforos coordinados	0.006 (1.5)	0.012 (1.5)
Tres semáforos coordinados	0.001 (0.3)	-0.005 (-0.5)
Cuatro semáforos coordinados	0.015 (1.8)	-0.0007 (-0.04)
Seis semáforos coordinados	-0.005 (-0.3)	-0.055 (-1.4)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (4 y 2)	0.03 (1.2)	0.027 (0.5)
Semáforos coordinados en dos redes diferentes (3 y 8)	0.022 (0.8)	-0.027 (-0.4)
Bloqueo de tráfico	-0.003 (-1.2)	-0.009 (-1.7)
Frecuencia programada	-0.011 (-27.2)	-0.028 (-33.2)
Proporción de expediciones desviadas	-0.073 (-6.5)	-0.094 (-3.8)
Regularidad en el despacho	0.646 (59.7)	0.381 (26.6)
Congestión	-0.01 (-2.1)	-0.01 (-1)
Presencia de semáforo no coordinado	0.004 (0.3)	0.026 (1)
Proporción de expediciones que son del mismo tipo de bus que la expedición anterior	0.019 (3.9)	0.012 (1.1)
Proporción de expediciones que realizan la misma acción que la expedición anterior a esta	0.015 (4.4)	0.035 (4.8)
Subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.0002 (-6.6)	-0.0002 (-2.1)
Coefficiente de variación de subidas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.078 (-17.3)	-0.114 (-11.6)
Coefficiente de variación de bajadas de pasajeros acumuladas promedio por expedición en cada paradero	-0.037 (-10.4)	-0.089 (-11.3)
Edad promedio de buses	0.002 (1.7)	0.002 (0.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 21 % y 40 %	-0.039 (-10.2)	-0.111 (-13.1)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 41 % y 60 %	-0.048 (-11.9)	-0.115 (-12.9)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 61 % y 80 %	-0.051 (-12.5)	-0.108 (-12.1)
El porcentaje de buses articulados que han pasado por el paradero está entre 81 % y 100 %	-0.031 (-6.8)	-0.061 (-6.2)
constante	0.437 (32.5)	0.9 (39.4)
R-cuadrado	0.485	0.327
Error	0.122	0.269