



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

MODELO GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
PRIORITARIA PARA BUSES A PARTIR DE DATOS MASIVOS

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

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RICARDO ANDRÉS CUBILLOS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAIME GIBSON ALDUNATE
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE
MIGUEL A. FIGLIOZZI

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR

AL GRADO DE: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE Y AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL

POR: RICARDO ANDRÉS CUBILLOS GONZÁLEZ

FECHA: MARZO 2018

PROFESOR GUÍA: MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ

MODELO GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA PRIORITARIA PARA BUSES A PARTIR DE DATOS MASIVOS

Se modela linealmente el paso medio por bus, medido como el inverso de la velocidad (Daganzo, 1997) a través de la metodología propuesta por Cortés et al. (2011). Esta información es provista por pulsos GPS emitidos por los buses del sistema público de Santiago y Portland, Oregon, Estados Unidos.

Para esto, se utilizan bases de datos que entregan información sobre la operación en los paraderos. En Santiago se estiman subidas y bajadas a partir de la metodología propuesta por (Munizaga y Palma, 2012) y se infieren detenciones en paraderos a partir de esto. En Portland existe información por bus a nivel de paradero, indicando el número de subidas, bajadas, uso de rampa para sillas de ruedas e indican el horario de llegada real y horario programado de cada bus. Toda la información es obtenida de manera masiva.

El caso de estudio contempla tres ejes principales de Santiago: Macul sentido Sur - Norte, Carmen sentido Norte - Sur y Grecia sentido oriente - poniente y en Portland: Powell sentido oriente - poniente. En total se modelan 37,3 kilómetros de vialidad con información de varios días entre 07:00 y 21:00.

Aprovechando la masividad de los datos, se propone un método novedoso para detectar incidentes en los distintos puntos de los ejes estudiados. Este resulta coherente y eficiente, ya que compara sólo entre observaciones que corresponden al mismo lugar y media hora, comparando distintos días.

Se hace énfasis en detectar variables para los esquemas de prioridad e identificar sus impactos en la operación de los buses, considerando tráfico mixto, pistas sólo bus y corredores. Se propone una nueva forma de modelar la demora en intersecciones, generando variables mudas multiplicadas por la densidad de intersecciones. Se descompone la demora en intersecciones en tres tipos de variables: demora uniforme base, demora uniforme extra y demora excedente.

Los principales resultados muestran que el tiempo de crucero es muy distinto según la prioridad la prioridad en la que circulan los buses, siendo más eficientes en corredores, luego en pistas sólo bus y finalmente, tráfico mixto. Las demoras en intersecciones varían significativamente, especialmente ante la presencia de alta congestión. La demora en paraderos cumple la relación inversa paso medio por prioridad. Además, se encuentra una novedad que en Santiago, el tiempo consumido por pasajero disminuye cuando hay más de 20 pax/bus-km. Por último, se distinguen diferencias entre servicios expresos y normales.

Al sincero cariño que podemos entregar,

Agradecimientos

De una universidad y facultad que me ha dado mucho en cada aspecto relevante para mí. Vida y más vida.

La gente que trabaja en la U, los tíos de la entrada, las tías que me abrieron los sábados la puerta de civil para trabajar en esto, don Oscar y un sinfín de personas que han estado presentes y me han ayudado de una u otra forma. Al quinto piso y todos esos buenos momentos diarios.

El básquet, su ritmo, la metáfora constante que hacía en mi día a día y los buenos momentos, todos esos buenos momentos que me ha dado en esta facultad.

La familia que está todos los días conmigo, que los llevo en todas las cosas buenas que me han pasado y que cada logro mío es más suyo que mío.

A Paulina y su paciencia, de esfumar el mal ánimo en mí y acompañarme y aconsejarme constantemente.

Agradecer a todo el equipo docente que siempre me ha acompañado. En especial a los miembros de Transporte incluyendo a todos los profes y personas que ahí trabajan. En especial a su buena onda y disposición.

A la profe Marcela que realmente me apoyó en todo sentido, en todo momento. Su consejo y forma de guiarme a hacer este trabajo fue indispensable para que llegue este día y todas las enseñanzas que sumé en este proceso. Al profe Jaime, por su ayuda en que este trabajo saliera a flote. Por enseñarme su manera de trabajar y de entender la ingeniería.

Al profe Miguel por recibirme en mi viaje, su disposición a recibirme en todo momento y permitirme vivir una de las mejores experiencias de mi vida.

Llegado este día, lo único que tengo para decir, es gracias a todos, que todo esto estuvo muy bueno.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Revisión bibliográfica	4
2.1. Modelación de predicción en tiempo real	4
2.2. Enfoque exponencial	6
2.3. Modelos de regresión	7
2.4. Metodologías para procesar datos	9
2.4.1. Metodología base para cálculo de velocidad y pasos	9
3. Caso de estudio y análisis de datos	11
3.1. Definición de ejes	12
3.2. Datos	16
3.2.1. Variables generadas a partir de los datos	17
3.3. Outliers	19
3.3.1. Outliers I: Buses aislados	19
3.3.2. Outliers II: Buses en presencia de incidentes	21
3.4. Descripción de ejes: Matta - Grecia (sentido Oriente - Poniente)	23
3.4.1. Descripción de la velocidad	24
3.4.2. Descripción del flujo de buses	25
3.4.3. Descripción de la demanda	25
3.5. Descripción de ejes: Carmen - Las Industrias (sentido Norte - Sur)	27
3.5.1. Descripción de la velocidad	28
3.5.2. Caracterización del flujo de buses	28
3.5.3. Caracterización de la demanda	29
3.6. Descripción de ejes: Macul - Los Leones (sentido Sur - Norte)	31
3.6.1. Descripción de la velocidad	31
3.6.2. Caracterización del flujo de buses	32
3.6.3. Caracterización de la demanda	33
3.7. Descripción de ejes: Powell	34
3.7.1. Descripción de la velocidad	35
3.7.2. Caracterización del flujo de buses	36
3.7.3. Caracterización de la demanda	36
3.8. Análisis en conjunto	37
3.8.1. Líneas de servicios	38
3.8.2. Tipo de infraestructura	40
3.8.3. Análisis Portland	43

4. Modelación	47
4.1. Modelación del tiempo de cruce	47
4.2. Modelación de demora en paraderos	49
4.3. Modelación de demora en intersecciones	51
5. Resultados y análisis	56
5.1. Proceso de estimación para Santiago	56
5.1.1. Generalidades	56
5.1.2. Modelos por tipo de prioridad	58
5.1.3. Modelo general	59
5.2. Análisis de resultados para Santiago	64
5.2.1. Análisis de parámetros	64
5.2.2. Análisis de componentes	70
5.3. Proceso de estimación para Powell	78
5.3.1. Generalidades	78
5.3.2. Modelo Powell	79
5.4. Análisis de parámetros para Powell	82
6. Conclusiones y recomendaciones	86
6.1. Recomendaciones y trabajo a futuro	89
Bibliografía	90
Anexo	95
A. Modelos preliminares Santiago	95
B. Modelos preliminares Powell	97

Índice de Tablas

3.1.	Resumen de observaciones y datos generales para cada eje	18
3.2.	Número de outliers I removidos para cada eje	21
3.3.	Resumen incidentes por eje	23
3.4.	Información general para Eje Matta - Grecia	23
3.5.	Lista de servicios en eje Grecia - Matta	24
3.6.	Información general para eje Carmen - Las Industrias	27
3.7.	Lista de servicios en eje Carmen - Industrias	28
3.8.	Información general para eje Macul - Los Leones	31
3.9.	Lista de servicios en eje Macul - Los Leones	31
3.10.	Información por tramo Powell Blvd, <i>Portland</i>	34
3.11.	Criterio para definir el grado de atraso (Dlate)	46
4.1.	Lista de tramo - período para los distintos ejes con posible demora excedente	53
5.1.	Modelo estimado	61
5.2.	Resumen agregado de valores estimados v/s observados para cada tramo y bloque de períodos	62
5.3.	Modelo complementado	63
5.4.	Valores detenciones de buses	67
5.5.	Variables mudas de demora excedente por tramo-período	68
5.6.	Distribución del paso medio de viaje por período (s/km)	70
5.7.	Distribución del paso medio por tipo para servicios normales	71
5.8.	Distribución del paso medio por tipo para servicios expresos	72
5.9.	Frecuencia de detenciones para servicios expresos	73
5.10.	Distribución de la demora en intersecciones	74
5.11.	Distribución demora en intersecciones para servicios normales	75
5.12.	Frecuencia de detenciones para servicios normales	75
5.13.	Distribución de demora en intersecciones por tipo para servicios expresos . .	76
5.14.	Porcentaje de demora excedente sobre demora total en intersecciones semaforizadas	76
5.15.	Distribución de la demora media en paraderos por período	77
5.16.	Distribución de la demora en paraderos por período para servicios normales .	77
5.17.	Distribución de la demora en paraderos por período para servicios expresos .	78
5.18.	Modelo Powell	81
5.19.	Variables mudas de demora excedente por tramo-período	84
6.1.	Tiempo de cruce para distintas prioridades en Santiago	88

A.1. Modelo para corredor de 1 pistas	95
A.2. Modelo para pistas sólo bus	96
B.1. Modelo Powell sin tramos 9, 11 y 15	97
B.2. Modelo Powell diferenciando tiempo por detención en paraderos	98

Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de pulsos GPS en rutas trazadas. Fuente: Cortés et al. (2011)	10
2.2.	Proyección de pulsos GPS en rutas trazadas. Fuente: Cortés et al. (2011) . .	10
3.1.	Vista satelital de Santiago con ejes escogidos. <i>Fuente: Google Earth</i>	12
3.2.	Vista satelital de Santiago con ejes escogidos y tramos. <i>Fuente: Google Earth</i>	14
3.3.	Vista satelital de Powell Blvd, Portland. Ruta 9 completa. <i>Fuente: Google Earth</i>	15
3.4.	Vista satelital de Powell Blvd, Portland. Tramos a analizar. <i>Fuente: Google Earth</i>	15
3.5.	Diagrama explicativo para el boxplot.	20
3.6.	Observaciones con boxplot, filtro 4.0 RIC y 2.5 RIC para un tramo y período en eje Macul	20
3.7.	Observaciones de paso medio para eje Macul - Los Leones para un tramo-período con boxplot para cada día: Lunes 23, Martes 24, Miércoles 25, Jueves 26 y Viernes 27 de Septiembre.	22
3.8.	Velocidad comercial en eje Matta - Grecia. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	24
3.9.	Flujo de buses en eje Matta - Grecia <i>Fuente: Elaboración propia</i>	25
3.10.	Demanda de subida en eje Matta - Grecia	26
3.11.	Demanda de bajada en eje Matta - Grecia	26
3.12.	Detenciones en eje Matta - Grecia	27
3.13.	Velocidad comercial en eje Carmen - Las Industrias	28
3.14.	Flujo de buses en eje Carmen - Las Industrias	29
3.15.	Demanda de subida en eje Carmen - Las Industrias	29
3.16.	Demanda de bajada en eje Carmen - Las Industrias	30
3.17.	Detenciones en eje Carmen - Las Industrias	30
3.18.	Velocidad comercial en eje Macul - Los Leones	32
3.19.	Flujo de buses en eje Macul - Los Leones	32
3.20.	Demanda de subida para cada tramo en Eje Macul - Los Leones	33
3.21.	Demanda de bajada para cada tramo en Eje Macul - Los Leones	34
3.22.	Detenciones en eje Macul	34
3.23.	Velocidad comercial en eje Powell	35
3.24.	Flujo de buses en eje Powell	36
3.25.	Demanda de subida en eje Powell	37
3.26.	Demanda de bajada en eje Powell	37
3.27.	Detenciones en eje Powell	38
3.28.	Ejemplos de paso medio por tipo de servicio	39
3.29.	Ejemplos de paso medio por tipo de servicio	39

3.30. Paso medio en Matta tramo 9 por tipo de servicio.	40
3.31. Paso medio para cada tramo, identificando su prioridad.	41
3.32. Paso medio v/s demanda total, todas las observaciones.	42
3.33. Paso medio v/s detenciones, todas las observaciones.	42
3.34. Paso medio v/s demanda total, observaciones de pista sólo bus.	43
3.35. Paso medio v/s flujo, observaciones de corredores de 1 pista.	43
3.36. Paso medio v/s demanda total, todas las observaciones (Powell).	44
3.37. Paso medio v/s detenciones, todas las observaciones (Powell).	45
3.38. Paso medio v/s nivel de atraso, todas las observaciones (Powell).	46

Capítulo 1

Introducción

Para asegurar el buen funcionamiento del transporte público, existen ciertos indicadores que permiten evaluar la eficiencia de los buses. Los más utilizados han sido el tiempo de viaje (en segundos) que demora un bus en recorrer desde un origen a un destino, la velocidad comercial (km/h) o el paso, entendido como el inverso de la velocidad (s/km) para cierto tramo (Daganzo, 1997). Estos han sido objeto de estudio pues el tiempo que demoran en viajar es parte de la calidad del servicio que perciben los usuarios. Además, para los operadores es importante por estar relacionado con los costos de operación.

Una manera de mejorar la velocidad comercial de los buses es aplicar medidas de prioridad en el uso de vías, donde la gama de opciones va desde el tráfico mixto, pista sólo bus hasta corredores segregados y BRT (Bus Rapid Transit). Sin embargo, no existen metodologías claras para evaluar la inversión de infraestructura prioritaria, principalmente por la falta de cuantificación del impacto de estas sobre los sistemas de transporte de buses. Además, se desconoce el impacto explícito de otras políticas existentes como servicios expresos (con menos detenciones que un servicio normal) y de zonas pagas, que son paraderos especiales donde se valida la tarifa en el andén y los pasajeros suben y bajan simultáneamente por todas las puertas.

La velocidad comercial ha sido estudiada desde varios enfoques, debido al alto interés que genera en los sistemas de transporte público. Se reportan por ejemplo, análisis cuantitativo de variables relevantes sin modelar (Levinson, 1983; Dueker et al., 2004), modelos exponenciales (Gibson et al., 1989), modelos lineales (Gibson et al., 2015; Diab y El-Geneidy, 2012) y análisis cualitativo (Fernández, 1999).

Para la ciudad de Santiago, Gibson et al. (2015) realizó un detallado análisis de Avenida Santa Rosa en el cual se comparan sus diferentes tipos de prioridad, que incluyen tráfico mixto y corredor segregado de dos pistas utilizando como variable de análisis el paso medio de los buses. Esto lo realizó analizando el paso medio de los buses separando en varios tramos el eje, y considerando períodos de 30 minutos para cada observación, de modo de comparar los distintos tramos y períodos del día entre sí.

El presente estudio consiste en el desarrollo de un modelo a través de regresión lineal

múltiple para evaluar el paso medio (inverso de la velocidad) para distintos tipos de prioridad y servicios para buses del transporte público. Se decide de forma lineal, ya que se ha observado que estos modelos son capaces de reproducir el paso como función de sus variables explicativas y son de fácil interpretación (Nikovski et al., 2005). No ocurre lo mismo con la velocidad comercial, en donde existen modelamiento del tipo exponencial, siendo más difícil la interpretación de parámetros (Fernández, 1999). La modelación se hará con datos de la ciudad de Santiago y se evaluarán pistas de tráfico mixto, una y dos pistas sólo bus y corredor segregado de una pista por sentido con pista extra de adelantamiento en paraderos.

El caso de estudio consiste en el análisis de tres ejes dentro de la ciudad: Carmen-Industrias, Grecia-Matta y Macul-Los Leones. Los datos provienen de una semana completa (de lunes a viernes) durante septiembre 2013. En total se tienen 27,02 kilómetros de vías siendo en su mayoría corredores y pista sólo bus. Para comparar los distintos tipos de prioridad se utiliza la metodología propuesta por Gibson et al. (2015), separando cada eje en tramos según su prioridad. Las observaciones se agrupan por tramo y período de 30 minutos desde las 07:00 hasta las 21:00.

La información de velocidad de los buses se construye a partir de diagramas espacio-tiempo, a través de interpolaciones de los puntos GPS de cada bus. La información de subidas y bajadas viene a través de estimaciones hechas a partir de la tarjeta *bip!* (Munizaga y Palma, 2012), la que es el único medio pago del sistema de buses. Esta información es un estimado, que no considera la evasión, la cual se estima para la fecha en un 23 %.

Adicionalmente, se incorpora un análisis para un eje en la ciudad de Portland, Oregon (Estado Unidos). En este caso se analiza una sección de una de las arterias principales de la ciudad (Powell Blvd) en donde opera un servicio de buses. El sistema de buses funciona distinto al de Santiago, con horario de pasada en los paraderos, menores flujos de buses y menor demanda. Sin embargo, los buses también generan información pasiva a través de pulsos GPS y con sistemas de conteo automático de pasajeros en paraderos. Se aplica la misma metodología y las observaciones se agrupan por tramo y período de 20 minutos desde las 07:00 hasta las 21:00.

El objetivo general de esta tesis es generar un modelo econométrico de paso medio de buses que considere la mayor cantidad de tipos de infraestructura prioritaria, encontrando variables explicativas capaces de cuantificar el impacto de estas en el tiempo de cruce, demoras en paraderos y demora en intersecciones. Para esto se utiliza un gran número de datos provenientes de los sistemas GPS ubicados en todos los buses del sistema de la ciudad de Santiago, combinando información de distintos ejes. Además está el estimar con la misma metodología un modelo para la ciudad de Portland.

La contribución de esta tesis a la literatura es el aporte cuantificado en el paso medio de tipos de prioridad que no han sido evaluadas anteriormente. Más específicamente, detallar el aporte de cada tipo de vía en las tres componentes básicas de la velocidad. Además, se realiza un análisis de los servicios expresos, en donde se logra detectar los beneficios de este en los distintos tipos de vía, más allá de detenerse menos.

Una segunda contribución viene dada por incorporar este análisis en ejes con distintas características en sus variables descriptivas. Existe una alta diferencia entre número de servi-

cios, flujo de buses, niveles de demanda por bus y tipos de servicios existentes entre los ejes escogidos. El incorporar todos estos factores en un solo modelo, combinando la información de distintos ejes, permite generalizar resultados y extender sus conclusiones con lo que ya se ha obtenido anteriormente. En el caso de Gibson et al. (2015), se poseían valores muy bajos de demanda y flujo de buses, lo que no permitía ver efectos por demanda mayores que en este trabajo sí se presentan, ya que existen períodos en donde las demandas superan los 40 pax/bus-km.

Por otra parte, se contribuye con un método de detección de *outliers* que aplica herramientas estadísticas y también criterios que son más adecuados para distinguir entre buses aislados que fallan y también de incidentes que ocurren en las vías durante ciertos períodos. Esto es posible debido al gran número de datos que el sistema genera, teniendo varias observaciones para cada día, en cada tramo y período escogido.

Por último, se hace un contraste de resultados al estimar modelos para dos ciudades con diferentes sistemas de buses, características demográficas, tecnologías y vialidad. Esto permitirá hacer un comparación detallada de los resultados para las tres componentes del paso medio.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

Dada la relevancia que tiene la velocidad de los buses en las distintas circunstancias a las que son sometidos en el transporte público, es que esta ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas. Tecnologías de localización automática de vehículos (AVL), métodos de conteo de pasajeros (APC) y método de pago electrónico han sido implementados por distintas autoridades de transporte (Crout, 2007; Schweiger, 2003), lo que ha permitido obtener información masiva y detallada de la operación de los sistemas de transporte. Esto ha facilitado que muchos estudios se enriquezcan y se puedan proponer innovaciones tanto operacionales, en tiempo real como de planificación para el mejor desplazamiento de los buses.

En el presente capítulo, se presentan distintos enfoques con los que se modela actualmente la velocidad comercial de los buses, describiendo también para qué tipo de propósitos se escoge uno u otro. Además, se explica la metodología con que se procesan los datos obtenidos a partir de la operación de los buses de Santiago, lo que presenta un interesante desafío dada su masividad.

2.1. Modelación de predicción en tiempo real

Una línea de investigación muy estudiada ha sido el utilizar la información disponible de los buses para hacer predicción de velocidad o paso en tiempo real y predecir tiempo de llegada a paraderos, que es una extensión de lo mismo. Para esto, distintos métodos se han empleado, enfocados principalmente en los tiempos de viaje observados entre dos puntos.

Chakroborty y Kikuchi (2004) calcula el tiempo de viaje de los buses en ciertos arcos para estimar, mediante factores, el tiempo de viaje de automóviles en determinados arcos. Estima relaciones lineales entre automóviles y buses, asumiendo que los vehículos privados tienen que ir a mayor velocidad por el hecho de tener menos puntos de detención. La ecuación 2.1 refleja la transformación lineal en donde estima los parámetros a y b , donde ATT_p es el tiempo medio de automóviles predicho, BTT es el tiempo medio de los buses (medido en terreno) y TST es el tiempo de buses en paraderos.

$$ATT_p = a + b(BTT - TST) \quad (2.1)$$

Patnaik et al. (2004) calcula tiempo de llegada de buses a paraderos con modelos de regresión utilizando información histórica de tiempo de viaje, demanda y demora en paraderos. En su modelo, calcula desde un punto i el tiempo a todos los distintos puntos j aguas abajo basándose en la distancia, períodos del día y promedio de paradas y tiempo de detención.

Shalaby y Farhan (2004) utilizan filtros de Kalman, para predecir el tiempo de viaje y de detención entre paraderos. Estos son algoritmos predictivos que utilizan recursividades lineales que se actualizan para estimar parámetros de un modelo, tomando como medida de rendimiento los errores y las varianzas de las observaciones consideradas como *input* y *outputs*. Combinando información de tiempos de viaje y demanda de la misma hora en los últimos tres días, más información del período anterior en el mismo día es capaz de tener outputs de la llegada y partida de buses en paraderos. Son capaces de predecir la espera o apuro por retraso en *schedule*.

Otros autores utilizan métodos de clusterización como vecinos más cercanos. Baptista et al. (2012) propone un método para predecir tiempo de viaje de buses mediante *K-Nearest Neighbour*, que se basa en observaciones pasadas de buses en el mismo trayecto, dándole más relevancia a observaciones ocurridas más recientemente. Propone descomponer el tiempo en tres componentes: tiempo de crucero, demora en paraderos y demora en intersecciones semaforizadas, generando un modelo para cada componente. Fan y Gurmú (2015) utilizan tres modelos de predicción de tiempo de viaje: promedios históricos, filtros de Kalman y Artificial Neural Network(ANN). ANN tiene un mejor rendimiento que el resto, utilizando sólo información de pulsos GPS (AVL) para predicción en tiempo real. Kumar et al. (2015) utilizan filtros de Kalman para predecir la llegada de buses con un rango de +/- 5 minutos. La predicción se puede utilizar para proveer estimación de llegadas en tiempo real.

Sin embargo, estos estudios se basan en utilizar información histórica de los buses para predecir comportamiento, sea el tiempo de viaje, velocidad o hora de llegada y salida. Para tales propósitos, los resultados son bastante interesantes, pero no explican detalladamente cómo afectan distintas variables explicativas en la velocidad. Con respecto al tipo de relación entre el tiempo de viaje y sus variables, Nikovski et al., 2005 compara cuatro métodos basados en *machine learning algorithms*. Basándose en información histórica para predecir el tiempo de viaje en Dublin, concluye que modelos de regresión lineales son competentes en términos de precisión para predecir tiempo de viaje. Además, son más simples de computar con respecto a otros métodos más complejos (árboles de regresión, KNN, redes neuronales y locally-weighted regressions). Finaliza justificando la aplicación de modelos de regresión lineales para modelar dicha variable, sin negar que podrían existir relaciones más complejas entre las variables que necesiten métodos más sofisticados.

2.2. Enfoque exponencial

Otra manera de modelar la velocidad comercial es a través de especificaciones exponenciales. Cohen (1984) y Gibson et al. (1989) encontraron una fuerte correlación entre la velocidad y la frecuencia de detenciones en forma de exponencial negativa. Schneider (2013) realiza un análisis detallado de la literatura en este enfoque de modelación que se muestra a continuación. La ecuación 2.2 muestra la expresión exponencial de la velocidad.

$$V_c = V_0 * e^{-\alpha f_d} \quad (2.2)$$

donde:

V_c : velocidad comercial promedio (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)

V_0, α : parámetros de calibración

En este modelo V_0 puede interpretarse como la velocidad que alcanza un bus entre paradas y α como el efecto marginal producido por una parada extra.

También se han propuesto relaciones más complejas como la de Fernández (1999) en que se incorpora, además de la frecuencia de detenciones, el tiempo que dura cada detención. La ecuación 2.3 muestra la expresión exponencial de la velocidad, incluyendo la el tiempo que dura cada detención. Con este modelo Fernandez (1996) hace una evaluación ex-post del corredor segregado de Avenida Grecia.

$$V_c = V_0 * e^{(-\alpha f_d + \beta t_d)} \quad (2.3)$$

donde:

V_c : velocidad comercial promedio (km/h)

f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)

t_d : tiempo que dura cada detención (s/det)

V_0, α, β : parámetros de calibración

Fernandez y Valenzuela (2003) proponen especificaciones aún más complejas, con el objetivo de recoger otros efectos sobre la velocidad comercial. En este caso los datos utilizados corresponden a una base generada a partir de vehículos instrumentados circulando por algunas rutas de la ciudad de Santiago, donde se encuentra distintos tipos de prioridad al transporte público: tráfico mixto, pistas sólo bus y vías segregadas, pero en su mayoría los datos corresponden a pista sólo bus. Los efectos adicionales incorporados son el efecto del sentido de viaje, efecto de hora punta y distinción para vehículos con caja de cambio automática. La especificación calibrada se presenta en la ecuación 2.4.

$$V_c = (V_0 + V_0' * \delta_s + V_0'' * \delta_p) * e^{-[\alpha + \alpha' * \delta_{f_d}] * f_d + (\beta + \beta' * \delta_{t_d}) * t_d} \quad (2.4)$$

donde: V_c : velocidad comercial promedio (km/h)
 f_d : frecuencia de detenciones por cualquier causa (paradas/km)
 t_d : tiempo que dura cada detención (s/det)
 δ_s : variable muda activa para sentido oriente-poniente
 δ_p : variable muda activa para período punta mañana (7:00 a 9:00)
 $\delta_{f_d}, \delta_{t_d}$: variables mudas activas para vehículos con caja de cambios automática
 V_0, α, β : parámetros de calibración

Además, se propone una especificación donde se agrega una variable muda para cuando hay pista sólo bus, y se separan los tipos de detenciones en paraderos y en intersecciones, enfatizando la importancia de agregar estas variables. La variable muda para tipo de prioridad resulta no significativa y la separación de las variables frecuencia y tiempo de detención en paraderos e intersecciones mejora el ajuste del modelo.

Si bien esta forma de modelar ajusta bastante y es una manera completamente válida para dimensionar el fenómeno de la velocidad en variables, no es la manera más práctica para separar los efectos de distintos fenómenos que causan mayor o menores valores de velocidad. Los valores de los parámetros de las variables no son de fácil interpretación y el uso de la variable "frecuencia de paradas" no es fácil tanto de medir como de llevar a recomendaciones prácticas en términos de mejora.

Por otra parte, la obtención de datos para este modelo requiere mediciones en terreno tanto del tiempo de detención como la frecuencia de detenciones.

2.3. Modelos de regresión

El enfoque de regresión lineal múltiple ha sido frecuentemente utilizado para la modelación del tiempo de viaje y paso medio de los buses, principalmente por su capacidad de interpretación de los estimadores y así entender de manera detallada las relaciones entre variables que lo explican. La ecuación 2.5 muestra la formulación clásica de un modelo de regresión lineal múltiple, en donde Y refleja la variable a explicar y es explicado por una serie de variables independientes (X) multiplicadas por sus coeficientes (β). Estos últimos permiten una fácil interpretación del efecto de la variable explicativa X_i sobre el fenómeno que se desea explicar.

$$Y(X) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (2.5)$$

De los referentes en la literatura, se puede mencionar el trabajo de Levinson (1983), en donde se analizó un conjunto de datos medidos en terreno para ciudades de Estados Unidos con el fin de caracterizar las diferencias en tiempo de viaje para buses. Luego de probar una serie de variables, se concluye que las más relevantes son el número de paraderos por milla, el lugar en donde circulan los buses en la ciudad, aceleraciones/deceleraciones y tiempo en paraderos.

Por otra parte, Abkowitz y Engelstein (1983) utiliza información automática de tiempo de pasada de buses en ciertos puntos de sus recorridos para realizar modelos lineales de tiempo de viaje, en donde encuentra que tanto subidas y bajadas, intersecciones semaforizadas y la proporción del recorrido en que se puede estacionar afectan en su rendimiento.

Existen variables que son bastante intuitivas que afectan el tiempo que demora en recorrer un bus cierta sección: el largo de la sección recorrida, detenciones en semáforos, en paraderos y el número de pasajeros que suben y bajan. Incluso Ma et al. (2015) y Glick y Figliozzi (2017) encontraron una relación cuadrática de las subidas en el tiempo en paraderos. Las intersecciones semaforizadas aparecen frecuentemente (Abkowitz y Engelstein, 1983; Gibson et al., 2015; Tirachini, 2013; Ma et al., 2015; Feng et al., 2015).

Gracias a la cuantificación de las variables que afectan de forma más directa al tiempo de viaje/paso, es que ha sido posible estudiar de manera más detallada el impacto de distintos factores. Strathman et al. (1999), Diab y El-Geneidy (2012), Ma et al. (2015) y Tirachini (2013) encuentran que el tiempo de viaje disminuye si los buses salen atrasados de los paraderos. Además, se ha observado que el intervalo programado hace que los buses demoren más (Strathman et al., 1999). La experiencia del conductor o años de experiencia de los operadores (Kimpel et al., 2005; El-Geneidy y Vijayakumar, 2011) y si el bus es troncal o alimentador (Strathman et al., 2002) afectan en el rendimiento de buses. Además, variables geográficas como la cantidad de lluvia y nieve muestran afectar la velocidad de los buses (Ma et al., 2015; Diab y El-Geneidy, 2012).

Strathman et al. (2002) evalúa el rendimiento de distintos operadores. (Tétreault y El-Geneidy, 2010; Diab y El-Geneidy, 2012) estiman la disminución del tiempo de viaje por implementar servicios expresos y (Strathman et al., 1999; Albright y Figliozzi, 2012) utilizan estos modelos para examinar las variables que se relacionan con la confianza en el servicio y la adherencia al horario programado. Tirachini (2013) realiza mediciones en terreno a través de encuestas a bordo de los buses para estimar modelos de tiempo de viaje en distintas zonas y líneas de buses de la ciudad de Sydney. Las variables explicativas que aparecen en el modelo son la distancia, periodos del día, demora en intersecciones, demora en paraderos, demora en rotondas, número de pasajeros en transferencia en paraderos y detención en paraderos, además de variables por zona de la ciudad y línea de buses. Luego, calcula los beneficios de mejorar la tecnología de pago en buses y lo compara con la implementación de pistas sólo bus.

Debido a que el sistema de buses y de circulación de vehículos tiende a estar en constante mejora, es que aparecen distintas tecnologías que se empiezan a aplicar teniendo como uno de los objetivos el medir su impacto en el tiempo de viaje de los buses. Los modelos de regresión han sido una herramienta utilizada con frecuencia, por la facilidad para hacer evaluaciones antes/después para cierta tecnología. En Montreal, una serie de medidas se han ido implementando como modernización del sistema de pago, pistas sólo bus y servicios expresos los cuales pueden ser medidos en un sólo modelo en el tiempo de viaje de los buses (Diab y El-Geneidy, 2012; Surprenant-Legault y El-Geneidy, 2011) y en el efecto de cada uno en la desviación estándar del tiempo de viaje (Diab y El-Geneidy, 2012). De esta forma ha sido posible medir el real impacto de distintas medidas como Transit Signal Priority (TSP) que corresponden a sistemas automatizados que dan prioridad a los buses en intersecciones

semaforizadas (Diab y El-Geneidy, 2012; Kimpel et al., 2005). Kimpel et al. (2005) realiza comparaciones en los tiempos medio de viaje antes y después de la implementación de este tipo de tecnología, concluyendo que estos reducen de muy escasa manera los tiempos medios de viaje. Slavin et al. (2013) analiza la implementación de SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) que son sistemas de coordinación de redes de intersecciones semaforizadas en función de una serie de variables como el flujo entre calles. El impacto de estas tecnologías parece depender mucho de la hora del día y del sentido en que circulen los buses.

Es interesante estudiar el efecto del tipo de vía en la cual los buses circulan. Distintos estudios se encuentran en la literatura. Zhang et al. (2014) logra hacer un análisis de la velocidad de los buses en distintos tipos de arterias en la ciudad de Pekín, encontrando que los buses circulan más rápido si es que van en un corredor o pista prioritaria en una autopista. Por otra parte, la implementación de pistas sólo bus ha sido medido (El-Geneidy y Vijayakumar, 2011; Diab y El-Geneidy, 2012) y el efecto en intersecciones, detenciones y tiempo de cruce en corredores segregados (Gibson et al., 2015). Además, Ma et al. (2015) utiliza un método de regresión denominado SURE (Seemingly Unrelated Regression Equations) para determinar efectos del tiempo de viaje en buses y su variabilidad para autopistas urbanas, avenidas arteriales y circulación en el centro de la ciudad de Brisbane, Australia.

2.4. Metodologías para procesar datos

2.4.1. Metodología base para cálculo de velocidad y pasos

Los buses del sistema público de Santiago están equipados con sistemas de localización automática de vehículos (AVL), los cuales generan gran cantidad de datos por día, ya que entregan un pulso GPS cada 30 [segundos] y cada 5 [segundos] en la ciudad de Portland, Oregon. Cortés et al. (2011) elaboró una metodología para calcular velocidad comercial a partir de estos pulsos, para los distintos buses, según qué líneas estén operando.

Dado que cada bus opera una ruta o servicio, es necesario asignar los pulsos que los buses emiten en una ruta respectiva. Para esto, el primer paso es construir líneas georeferenciadas que definan las rutas que realizan las líneas de buses. Una vez demarcadas las rutas, cada pulso GPS de un bus se proyecta al punto más cercano de su ruta, tal como muestra la Figura 2.1. Un proceso especial se debe realizar en caso de que el bus tenga trayectorias con curvas muy pronunciadas o gire perpendicularmente en una calle. De esta forma, se tendrán los puntos proyectados sobre las rutas para calcular distancias y tiempos.

Con los puntos proyectados, se determinan las trayectorias de los buses en una grilla espacio-tiempo, en donde el bus avanza en distancia por sobre la ruta proyectada. Además de asignarle la ruta, se le asigna el servicio, la patente y el sentido de cada bus. De esta forma, no sólo se pueden calcular diagramas para una sólo línea, sino que agrupar líneas que pasen por los mismos ejes, que es lo que permite analizar ejes con todas sus líneas.

La Figura 2.2 permite visualizar las trayectorias en la grilla (líneas punteadas) viendo distintos buses recorriendo cuatro tramos en distintos períodos del tiempo. Mediante inter-

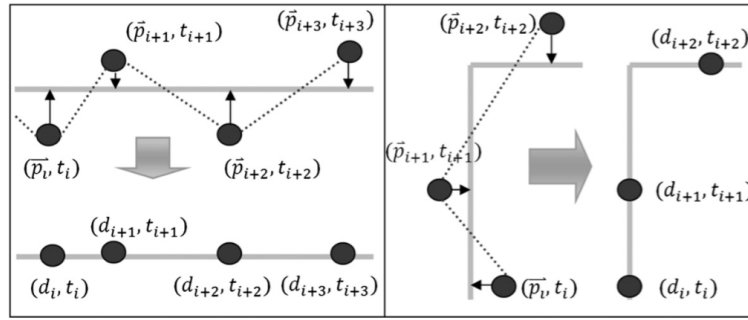


Figura 2.1: Diagrama de pulsos GPS en rutas trazadas. Fuente: Cortés et al. (2011)

polaciones lineales es posible calcular una distancia recorrida y un tiempo recorrido en cada una de las celdas, tal como indican las distancias D_1^r y D_2^r y los tiempos T_1^r y T_2^r para dos buses en la celda en color gris.

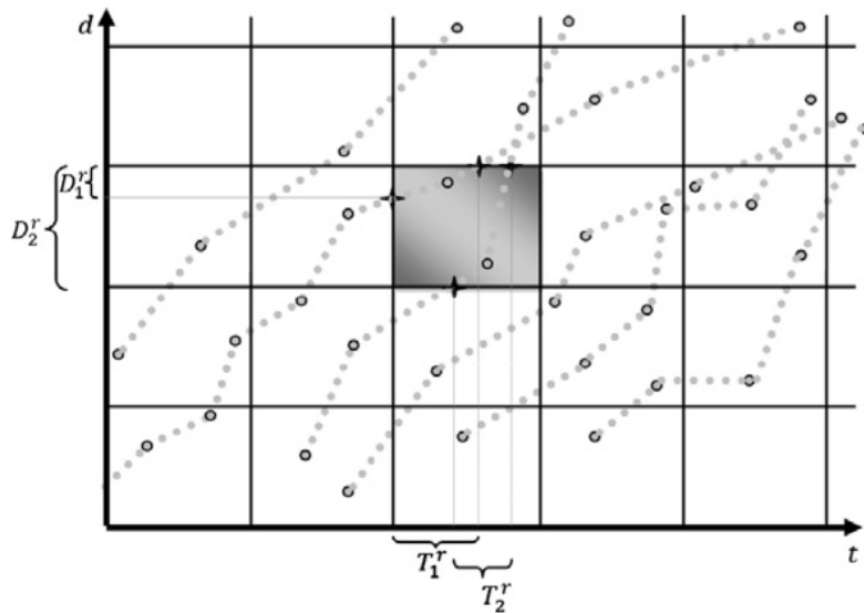


Figura 2.2: Proyección de pulsos GPS en rutas trazadas. Fuente: Cortés et al. (2011)

De esta forma se puede obtener las distancias y tiempos de recorrido para cada bus en cada celda. Los márgenes de las celdas pueden ser definidos por el modelador y así calcular las velocidades para todos los buses que crucen en los períodos de tiempo y segmentos a convenir.

La disponibilidad de pulsos GPS para los buses del sistema de transporte público es un excelente aporte para conocer la ubicación de estos en el tiempo. Sin embargo, estas observaciones por sí solas no entregan información tan útil, como podría lograrse a través de alguna metodología que asocie los buses con sus trayectorias y además entregue valores de la velocidad (o paso) en distintos puntos. Para esto se aplica una metodología para calcular las distancias y tiempo que recorre un bus dada una grilla espacio-tiempo (Cortés et al. (2011)).

Capítulo 3

Caso de estudio y análisis de datos

En el siguiente capítulo se presentan las fuentes de datos y se describen los casos de estudio. Se escogen distintos ejes y se observan sus características principales, que permiten entender las similitudes y diferencias entre estos. Esto facilita la toma de decisiones para generar los modelos, desde el enfoque de modelación hasta la generación de variables.

Para comprender de manera adecuada las variables que inciden en la velocidad comercial y su relación con el tipo de infraestructura se realiza un análisis por separado a cada uno de los ejes. Una vez dimensionada las características particulares de cada uno de los ejes, se procederá a análisis más profundo que incluye la información de todos los sectores.

Transantiago es el sistema de transporte público de la ciudad de Santiago, Chile y que surge a partir de la necesidad de modernizar el sistema anterior y mejorar la calidad de servicio de una ciudad que tiene 6,5 millones de habitantes, dividido en 32 comunas que generan diariamente en un día laboral más de 5,3 millones de viajes en transporte público (de Transporte y Telecomunicaciones, 2012). Está operativo desde el año 2007 y fue diseñado con una red troncal alimentador en donde Metro es la columna vertebral de su funcionamiento. Los servicios y las tarifas son integradas y por diseño tienen que realizar más transbordos. Además, se modernizó la tecnología de los buses, siendo más cómodos, habilitados para discapacitados y tendría un potente sistema de información. Se renovó toda la flota, la cual cuenta con dispositivos GPS y se eliminó el pago de la tarifa en efectivo, reemplazado por una Smartcard. El sistema se pensó con una red de corredores segregados y un nuevo diseño de paraderos, esperando reducir la interacción bus-auto y bus-bus (Muñoz y Gschwender, 2008). La infraestructura dedicada disponible son vías de tráfico mixto, de pista sólo bus con distinto número de pistas para otros vehículos, dos pistas sólo bus con distinto número de pistas para otros vehículos, corredores de 1 pista con y sin adelantamiento en paraderos y corredor segregado de dos pistas. Los corredores están físicamente separados del resto del tráfico y para las pistas sólo bus existen distintos métodos de demarcación y segregación, todos parciales, ya que permiten el ingreso de otros vehículos para ciertas excepciones. Por otra parte, existen servicios expresos que se detienen en menos paraderos que un servicio normal y zonas pagas, que son paraderos especiales donde se valida la tarifa en el andén y los pasajeros suben y bajan simultáneamente por todas las puertas.

El otro caso a estudiar se ubica en la ciudad de Portland. Esta queda geográficamente ubicada en la costa noroeste de Estados Unidos, en el estado de Oregon. Posee una población de 1,5 millones de personas en su área suburbana en una superficie de 1.380 kms². Este es operado por Tri-County Metropolitan Transportation District of Oregon (TriMet), el cual maneja un sistema integrado de buses, tranvías, trenes suburbanos y transfer de discapacitados. Estos están integrado a través de la tarifa, la cual se paga por un determinado intervalo de tiempo (2,5 horas o día completo) que permite utilizar cualquier modo disponible del sistema. Los buses operan con un sistema de itinerarios fijos desplegados en una *timetable* en cada uno de los paraderos. Las frecuencias son cercanas a 1 bus cada 12 minutos en horarios fuera de punta y 1 cada 6 minutos en períodos punta (Feng, 2014). Cuentan con avanzada tecnología, desde portabicicletas hasta rampas automáticas para discapacitados en los buses (TriMet, 2017). Además, cuenta con contador automáticos de subidas y bajadas en cada paradero para cada bus, GPS en cada paradero y últimamente se han implementado dispositivos GPS de alta resolución, cada 5 segundos emite un pulso (Glick et al., 2015).

3.1. Definición de ejes

Se escogen varios ejes en distintos lugares de la ciudad de Santiago. Se define un número suficiente para observar la mayoría de los tipos de prioridad por las que circulan los buses con respecto al resto del tráfico, es decir, corredores de buses, pistas sólo bus y tráfico mixto. Siguiendo los pasos del modelo realizado para Santa Rosa (Gibson et al., 2015), se escogen los siguientes ejes: Matta-Grecia (sentido Oriente-Poniente), Macul - J Alessandri- Los Leones (sentido Sur - Norte) y Carmen-Las Industrias (sentido Norte - Sur). La Figura 3.1 muestra la distribución espacial en la ciudad y sus respectivos tipos de prioridad.

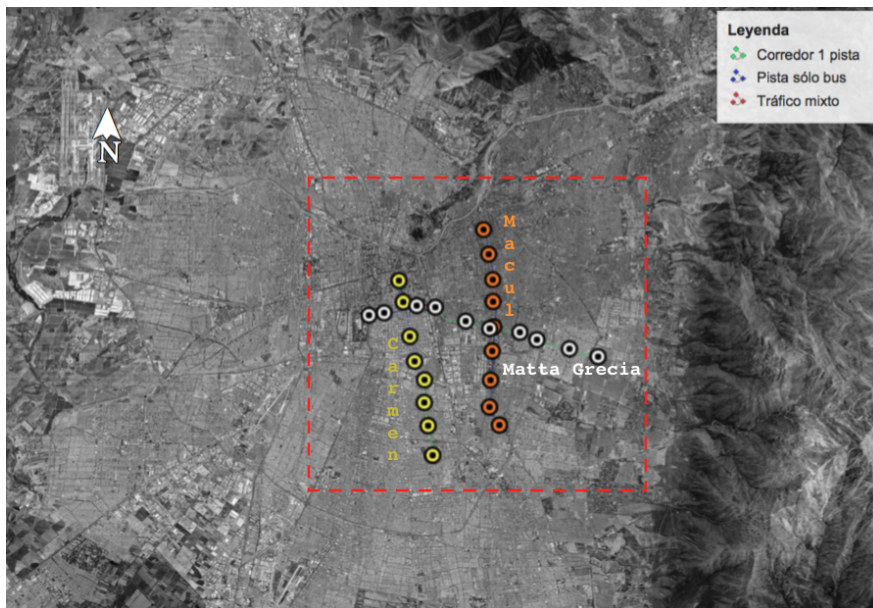


Figura 3.1: Vista satelital de Santiago con ejes escogidos. *Fuente: Google Earth*

Cada uno de los ejes es dividido en tramos, los cuales son definidos según los siguientes

criterios:

1) Cada tramo debe tener un mismo perfil geométrico, es decir, tipo de prioridad y número de pistas.

2) Dentro del mismo tramo deben circular los mismos servicios de buses, es decir, que ningún servicio entre o salga en medio del tramo.

3) Los límites entre tramos deben estar definidos a más de 150 [m] de intersecciones semaforizadas y paraderos.

4) Considerar el largo de cada tramo dentro de un rango acotado, cercano a los 1.000 [m]. En ciertos casos pueden haber tramos más cortos o largos, lo que de todas maneras es corregido en las variables al ser normalizadas por la distancia.

Los ejes elegidos no sólo varían en sus tipos de prioridad, sino que tienen composiciones distintas en: número de servicios, flujo de buses, demanda de pasajeros y nivel de congestión vehicular. Esta variabilidad permite tener un análisis más extenso, por la heterogeneidad entre las observaciones.

Para el caso de Portland, se estudia un servicio que corresponde a la ruta 9, en dirección oriente - poniente conectando un suburbio llamado Gresham con el centro de la ciudad. Esta va a través de una avenida llamada Powell Blvd que es una calle principal en la ciudad. El intervalo promedio es de 15 minutos en períodos fuera de punta y de 6-7 minutos en los horarios punta (Feng, 2014). Al final de la ruta se ingresa al centro de la ciudad, saliendo de Powell.

Las zonas se pueden dividir en tres: la más oriental que es de baja densidad de actividades, con baja densidad de semáforos y poca actividad, luego una zona más próxima a la ciudad con mayor actividad, desde el cruce de autopistas y mayor concentración de actividades y la tercera una zona de alta actividad incluyendo cruces importantes, el paso de un puente y luego la zona del centro de la ciudad que tiene alta actividad. La Figura 3.1 muestra los distintos tramos en que se dividió la ruta 9, desde el suburbio de Gresham (este) hasta el centro de la ciudad (oeste). El recorrido completo es dividido en 19 tramos, analizando en detalle desde el tramo 8 hasta el tramo 15, encuadrados en rojo en la Figura 3.1.

La Figura 3.4 muestra los tramos que se analizan con más detalle y van del 8 al 15. Además, se indican distintos cruces importantes, siendo el más relevante el cruce con una gran autopista. Además, a la izquierda del extremo poniente se ubica un puente que cruza el río hacia el centro de la ciudad. Los tipos de infraestructura presentes son principalmente tráfico mixto con 1, 2 o 3 pistas. Existe en algunos tramos una pista compartida que va entre ambos sentidos, la cual puede ser usada en ciertos casos por los buses. Esta pista sirve para adelantar, pero los paraderos siguen estando en la pista de la derecha, por lo que no es correcto considerarla una pista sólo bus.

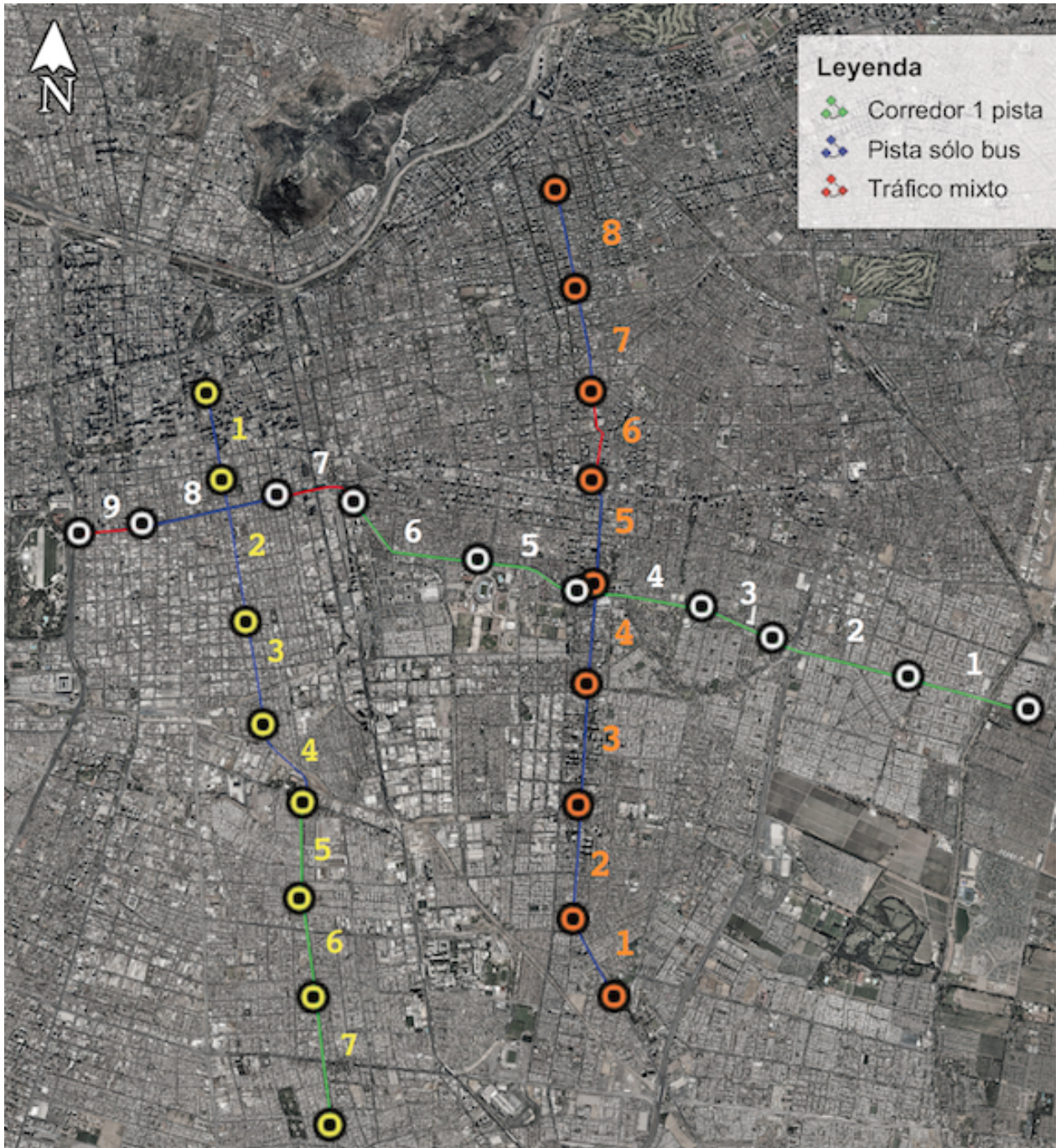


Figura 3.2: Vista satelital de Santiago con ejes escogidos y tramos. *Fuente: Google Earth*

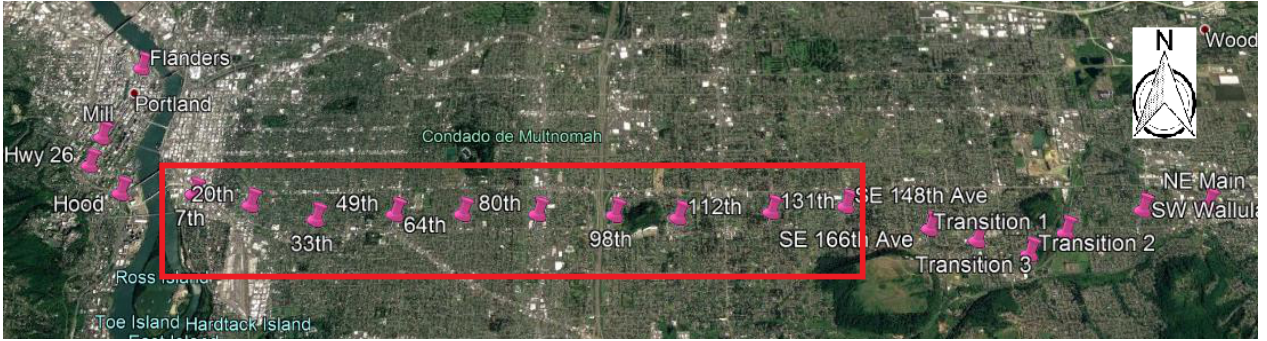


Figura 3.3: Vista satelital de Powell Blvd, Portland. Ruta 9 completa. Fuente: Google Earth



Figura 3.4: Vista satelital de Powell Blvd, Portland. Tramos a analizar. Fuente: Google Earth

3.2. Datos

Las fuentes de datos para **Santiago** son las siguientes:

Distancia y tiempo por bus: Pulsos GPS cada 30 segundos para cada bus en operación de Transantiago. Estos son procesados a través de la metodología presentada anteriormente en una grilla espacio-tiempo (Cortés et al., 2011), teniendo por separado la distancia y el tiempo para cada bus. Cada observación indicará el servicio, patente, día, tramo, período (de 30 minutos), distancia y tiempo por el que circulan los buses.

Subidas por paradero: Se obtienen de estimaciones hechas a partir de los datos disponibles por las transacciones de tarjeta bip!, en donde cada tarjeta marcada será una subida. Cada una de estas subidas es hecha en un bus con identificación única del viaje y servicio que está realizando, lo que permite asignar esa transacción (que entrega su posición y tiempo) a un paradero del servicio que se ofrece. Cada observación indicará el bus, paradero, período, tramo y contabilización de subida (una en todos los casos).

Bajadas por paradero: Se obtiene una estimación de cada una de las bajadas a partir de los datos de movilidad de las tarjetas bip!, en donde cada etapa y viaje es asignado a un paradero mediante una metodología que observa los servicios utilizados, los paraderos o estaciones disponibles y los viajes realizados por dicho usuario utilizando cada una de las *smartcards* (Munizaga y Palma, 2012). Cada observación indicará el bus, paradero, período, tramo y contabilización de bajada (existen factores de expansión). La estimación del paradero de bajada tiene un error de un paradero (antes o después), pero al trabajar con el total de bajadas por tramos es posible reducir el efecto de este error.

Datos de semáforos: Se tiene información sobre las redes coordinadas y los distintos ciclos que operan en cada semáforo durante el día.

Las fuentes de datos para **Portland** son las siguientes:

Distancia y tiempo por bus: Pulsos GPS cada 5 segundos para cada bus en operación de TriMet. Estos son procesados a través de la metodología presentada anteriormente en una grilla espacio-tiempo (Cortés et al., 2011), teniendo por separado la distancia y el tiempo para cada bus. Cada observación indicará el servicio, patente, día, tramo, período (de 20 minutos), distancia y tiempo por el que circulan los buses.

Información paradero a paradero: Los buses y paraderos están equipados con dispositivos que reconocen cuando los buses entran y salen de los paraderos. Además, el bus está equipado con contadores automáticos de pasajeros en cada puerta, los cuales cuentan cuantas personas entran y salen por puerta en cada paradero. Además entregan información de uso de rampa para silla de ruedas, número de puertas abiertas, hora de llegada, hora de salida, horario planificado de salida y carga del bus.

Toda esta información es posible de juntar a través de algoritmos de cruce de datos. Estas bases de datos serán clasificadas y organizadas de tal forma que permitan evaluar en sus

diferentes componentes el paso medio de los buses en cada uno de los ejes escogidos.

3.2.1. Variables generadas a partir de los datos

La información disponible viene de manera muy desagregada, lo que es una buena característica. Para observar distintos comportamientos de la velocidad de buses, será conveniente agregar los datos en distintos niveles para que el análisis de datos sea más valioso.

En general, se utilizarán tres niveles de agregación de los datos en donde la variable en estudio será el paso medio de los buses, definido como el inverso de la velocidad:

- Paso medio para tramo-período (tp)

$$PM_{tp} = \frac{\sum_{tp}(Tiempo)}{\sum_{tp}(Distancia)} \quad (3.1)$$

- Paso medio para día-tramo-período (dtp)

$$PM_{dtp} = \frac{\sum_{dtp}(Tiempo)}{\sum_{dtp}(Distancia)} \quad (3.2)$$

- Paso medio para día-tramo-período-tiposervicio (dtps)

$$PM_{dtps} = \frac{\sum_{dtps}(Tiempo)}{\sum_{dtps}(Distancia)} \quad (3.3)$$

- Paso medio para alguna variable (x)-tramo-período (xtp)

$$PM_{xtp} = \frac{\sum_{xtp}(Tiempo)}{\sum_{xtp}(Distancia)} \quad (3.4)$$

Las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.4 son las utilizadas para todos los pasos de análisis, ya que generando uno u otro tipo de agregación se identifican distintos fenómenos que ocurren y es posible verificar consistencia en los datos. En particular, la ecuación 3.1 es el valor más agregado y permite ver en términos generales como se comporta la velocidad en los tramos en comparación a los otros tramos. Permite identificar horarios punta, puntos de congestión y comparar la infraestructura.

La ecuación 3.2 es la variable que se utilizará como observación para el modelo, es decir, es el nivel de agregación que representa la variable dependiente. Esta variable permite ver la variabilidad entre los distintos días para el mismo tramo-período, distinguiendo la demanda y el número de detenciones para cada observación. Para el caso de Portland en donde se

utilizan 4 semanas, pero por sus bajas frecuencias cada período tiene menos observaciones, se agrupa por día de la semana (Lunes, Martes, Miércoles, Jueves y Viernes).

La ecuación 3.4 permite contrastar el paso medio con respecto a distintas variables, tales como tipo de buses, servicios expresos o normales, separar por servicios y así varias variables. Esto permite dar cuenta del comportamiento del paso medio ante distintas posibles variables que estén afectando su comportamiento.

Además de las tres agregaciones que se mencionan anteriormente, se utilizan observaciones de la manera más desagregada, es decir mirando cada bus en cada tramo-período. En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las principales características para cada eje y los tramos escogidos. El número de observaciones para cada bus y tramo varía, puesto que el flujo de buses varía. Ya que mientras más líneas pasen por un eje, más observaciones se tendrán debido a un mayor flujo de buses. En particular, el eje Powell tiene las observaciones de todo un mes y tiene menos observaciones que una semana en algunos ejes en Santiago.

Tabla 3.1: Resumen de observaciones y datos generales para cada eje

Eje	Carmen	Macul	Matta Grecia	Powell
Observaciones	9.479	29.000	32.779	11.430
Largo total [km]	7,70	8,67	10,65	10,31
Nº tramos	7	8	9	8
Largo medio tramo [km]	1,10	1,08	1,18	1,28
Nº de servicios	2	4	8	1

El flujo de buses se calcula a partir de los datos de distancia recorrida de los buses. Se asume que en un período pasa un bus si es que recorre todo el tramo, es decir, la distancia recorrida por el bus se divide por el largo del tramo. Este valor indicará el el flujo de buses para cada tramo-período, tal como indica la ecuación 3.5.

$$flujo_{dtp} \left[\frac{buses}{hora} \right] = \frac{\sum Distancia_{dtp}}{LargoTramo_t} \quad (3.5)$$

Para el caso de la demanda por bus, se tienen las subidas y bajadas, las cuales son divididas por el flujo de buses para que se relacione con las unidades del paso medio en s/km. Éste número se obtiene dividiendo el total generado por el programa para cada tramo-período por la cantidad de buses correspondiente, calculado con la ecuación 3.5. Para hacer consistente la demanda de pasajeros entre los distintos tramos, se normaliza dividiendo por la longitud de estos. Así, la demanda queda expresada pax/bus-km.

Para el número de detenciones por bus se asume que el bus se detiene si hay subidas y/o bajadas asignadas a él para un cierto paradero-tramo-período. Luego, se suman estas detenciones por tramo-período y se obtiene el total de detenciones para cada tramo-período.

Al igual que para las subidas y bajadas, interesan las detenciones por bus. Esta variable se obtiene dividiendo el total por tramo-período mencionado en el párrafo anterior, por la cantidad de buses correspondiente, calculados por la ecuación 3.5. Para hacer consistentes las detenciones entre los distintos tramos, se normaliza dividiendo por la longitud de éstos. Así, las detenciones quedan expresadas en det/bus-km.

Estas variables generadas a partir de los datos disponibles son las que permiten el análisis que viene a continuación.

3.3. Outliers

Distintas situaciones hacen que un bus circule a cierta velocidad. Al ser vehículos que circulan en la calle, interactúan tanto con peatones, otros vehículos y, por lo tanto, pueden sufrir de hechos inesperados como accidentes del mismo bus, accidente de otros vehículos, cierre inesperado de pistas, reparación y/o mantención de vías, congestiones por eventos especiales como espectáculos masivos, entre otros. Este trabajo, al estar enfocado en modelar la velocidad de los buses con componentes comunes para distintos días de la semana, requiere detectar ciertos incidentes y removerlos de la modelación, puesto que está ocurriendo un fenómeno puntual y el bus no está en las condiciones que se quiere.

Este tipo de incidentes no son de fácil detección, por lo que se ha dividido en dos pasos su identificación.

- I) Buses aislados que salen de operación o se quedan detenidos (o casi detenidos).
- II) Buses que se enfrentan a una situación especial de la calle, en donde se observa que todos los buses andan a menor velocidad.

3.3.1. Outliers I: Buses aislados

El caso de buses aislados corresponde a aquel en que por algún problema propio del bus, este no circula a la velocidad esperada. El tipo de problema que podría generar estos casos son pana del vehículo, accidente, falla del GPS o algún otro evento que reduce la velocidad considerablemente de un vehículo en particular con respecto al resto de los buses circulando en el mismo tramo durante el mismo período.

Para darle una solución sistemática a este problema, se utiliza la herramienta gráfica llamada boxplot, que permite detectar puntos aislados o outliers. Esta herramienta identifica en la distribución de los datos el primer cuartil ($Q1$; 25 - percentil), la mediana (50 - percentil) y el tercer cuartil ($Q3$; 75 - percentil). Además, se define un valor denominado RIC, que corresponde a la distancia intercuartil ($Q3 - Q1$). Tal como se observa en la Figura 3.5, se define Ls y Li , que corresponde a 1.5 veces la distancia alejada de $Q3$ o $Q1$ según corresponda (Potter et al. 2006). Los valores superiores a Ls o inferiores a Li son considerados outliers.

La aplicación de este método se hace agrupando las observaciones por tramo y períodos de media hora y se observa la distribución del paso. Esto se sustenta en que en los distintos días de la semana las velocidades debiesen tener una distribución similar, lo cual se cumple en todos los tramos, excepto aquellos que poseen una congestión extremadamente elevada, que hace a la variabilidad entre días muy alta. Sólo se buscarán datos atípicos de valores altos, que corresponden a vehículos con velocidades muy bajas. Velocidades muy altas no se consideran por computador, ya que los buses del sistema tienen un límite de velocidad por computador que viene corregido previamente en los datos.

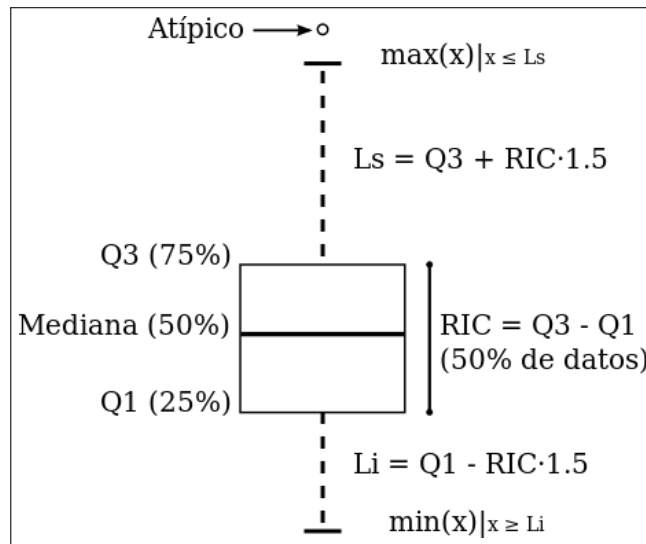


Figura 3.5: Diagrama explicativo para el boxplot.

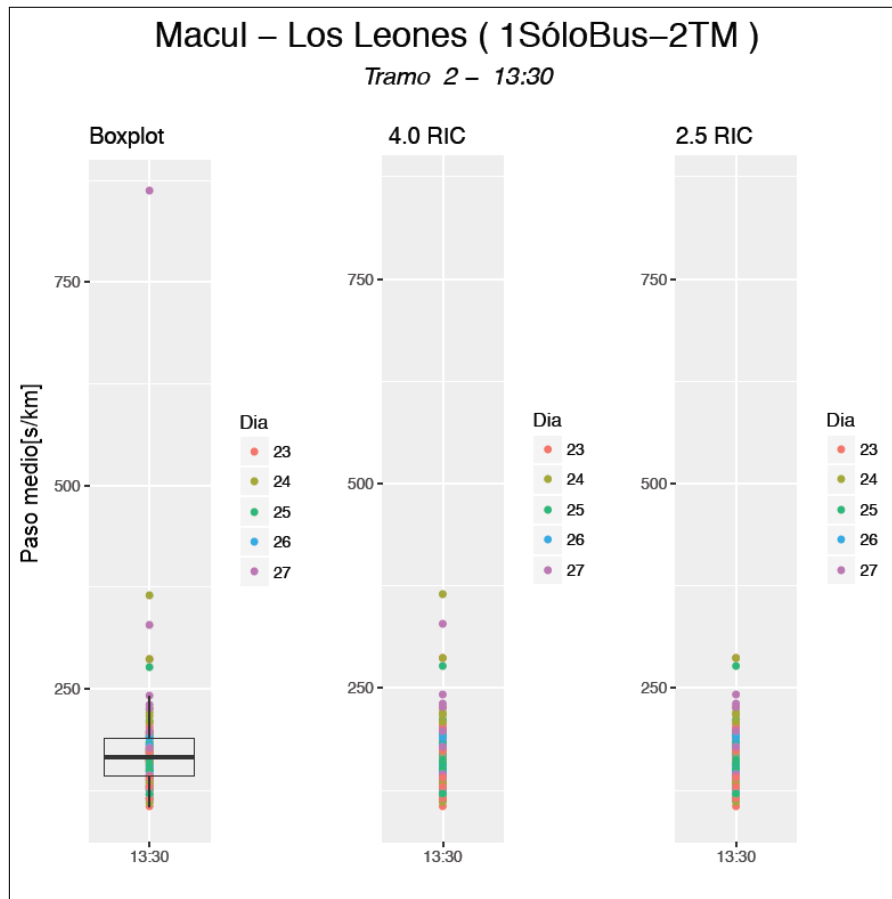


Figura 3.6: Observaciones con boxplot, filtro 4.0 RIC y 2.5 RIC para un tramo y período en eje Macul

En la Figura 3.6 se muestran tres gráficos del mismo tramo - período para un eje. Se utiliza el paso como variable, ya que al ser vehículos con velocidades muy bajas, es más fácil de distinguir datos atípicos. Esto porque en tramos donde la velocidad promedio es baja, el

paso medio de un outlier será más alto que el resto. En el primer gráfico el boxplot sugiere 5 observaciones como outliers, en donde una de estas tiene un valor significativamente más alto que el resto. Los otros dos gráficos representan un valor de L_s modificado, en donde se varía el valor 1.5 que acompaña a RIC. De esta forma, se busca relajar este criterio por sobre este valor, viendo en el ejemplo que al usar un valor de 4,0 sólo desaparece una observación (aquella con un valor mayor a 750 [s/km]), mientras que al usar un valor 2,5 también se eliminan otras dos observaciones.

El objetivo es sólo eliminar buses que evidentemente sean buses con problemas de circulación aislados, mientras que pueden haber otros que efectivamente tenga una demanda alta puntual, demora excesiva en una intersección o incluso una mezcla de los dos. Para evitar remover estos últimos, se decide dejar este valor en 4 (que originalmente es 1,5). Al estar comparando este proceso para cada eje en cada tramo-período, se realiza un algoritmo que se encarga de remover de la base de datos cada una de las observaciones seleccionadas. En la Tabla 3.2 se resume el número de observaciones que son removidas. En ningún caso se remueve más allá del 1% de los datos para Santiago, es decir, el número de outliers de este tipo es muy bajo. En el caso de Powell, se remueven 1,46% de los datos debido a que se está analizando un sólo servicio de baja frecuencia, lo que indica mayor dispersión de los datos.

Tabla 3.2: Número de outliers I removidos para cada eje

Eje	Datos totales	Datos s/outliers	Outliers	% Outliers
Macul	25.768	25.522	246	0,95%
Matta-Grecia	29.038	28.751	287	0,99%
Carmen	8.593	8.512	81	0,94%
Powell	9.017	8.895	132	1,46%

3.3.2. Outliers II: Buses en presencia de incidentes

Al ser expuestos a diferentes factores en las calles, los buses son afectados por otros vehículos, peatones y otros elementos que pueden causar demoras. En este trabajo se busca modelar la velocidad de los buses para los distintos tipos de vías que hay para los buses, teniendo en cuenta que a ciertas horas circulan más pasajeros en los buses como en las calles. Sin embargo, a veces ocurren ciertos hechos que aumentan el paso de los buses de manera atípica. Ejemplos de esto son accidentes entre autos en la calle, la acción de vehículos de emergencias detenidos en una pista o el cierre de estas por algún motivo particular que tienen que ver comúnmente con emergencias. Al ser estos incidentes excepcionales, es posible aislarlos.

Para esto, se comparan las observaciones dado un tramo-período y se agrupan por día de la semana. Hecho esto, se gráfica un boxplot para cada uno de los días, identificando visualmente la ubicación de la mediana y los cuartiles. Si en algún día ocurrió un incidente, este resulta de fácil detección debido a que todas o la gran mayoría de los buses circulando en tal día van a tener un valor más elevado en su paso medio y el resto de los días tendrán una distribución similar del boxplot entre si.

En la Figura 3.3.2.a se observa lo que ocurre en la mayoría de los casos: existe variabilidad

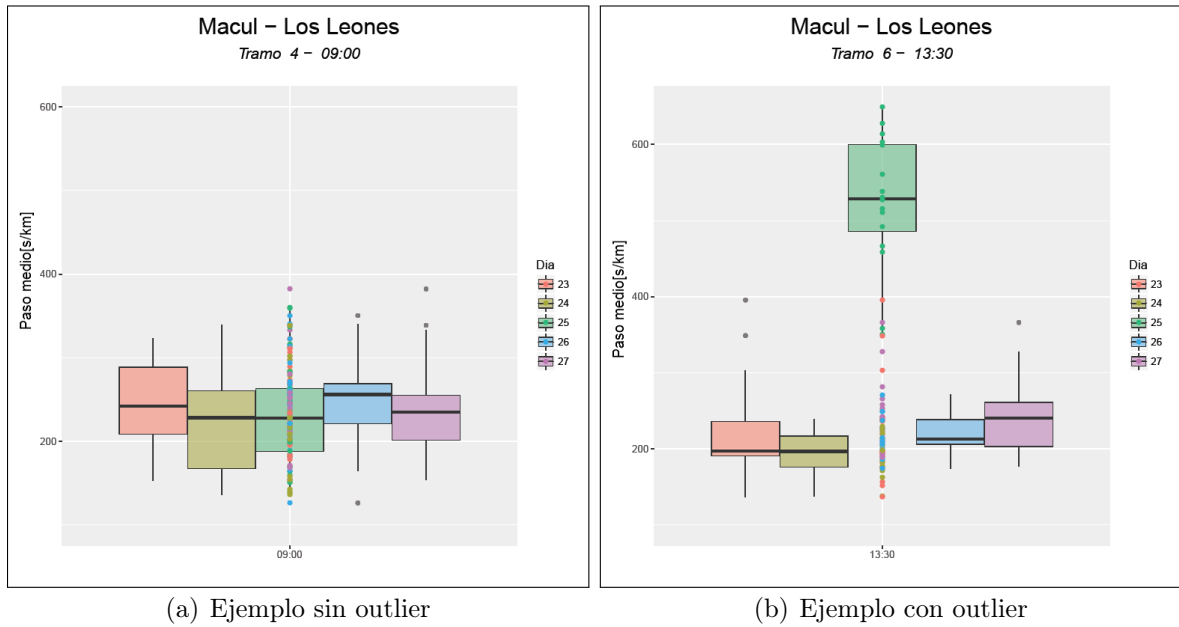


Figura 3.7: Observaciones de paso medio para eje Macul - Los Leones para un tramo-período con boxplot para cada día: Lunes 23, Martes 24, Miércoles 25, Jueves 26 y Viernes 27 de Septiembre.

entre los distintos días, pero en un rango razonable y esperable. Es relevante ver el valor de la media y de los cuartiles (límites de cada caja), en donde los valores oscilan entre 200 s/km y 300 s/km. En cambio en la Figura 3.3.2.b se ve que para el día Miércoles todas las observaciones se encuentran en un valor mucho más elevado, lo que se asume como un incidente del tipo que se está buscando. Este tipo de observaciones debe ser removido, ya que ocurre un hecho puntual fuera de las condiciones normales de operación que es lo que se quieren modelar. Se observan cada una de las ilustraciones para todos los ejes en estudio, separándolos por tramo y período (ver Cd Anexo/incidentes).

Calibración de detección incidentes

Al observar gráficamente todos los ejes, para cada tramo-período se definieron qué días eran incidentes. Luego, se procedió a buscar un método para que filtrara estos días. El método busca relacionar las medias, medianas y varianzas agrupadas y a partir de esto, ser capaz de identificar qué grupo de velocidades son notoriamente menores.

El método utilizado se basa en buscar incidentes por separado para cada tramo-período. La detección de estos será a partir de la comparación de medianas del paso medio de cada día por separado con la mediana de todas las observaciones del tramo-período. La ecuación 3.6 muestra el criterio para detectar los outliers.

Si:

$$Mediana_{dtp} \geq Mediana_{tp} + \Delta P \Rightarrow outlier \tag{3.6}$$

Donde:

d: día
t: tramo
p: período

Luego de un proceso de calibración, el valor ΔP se definió en 50 s/km, ya que fue el que mejor se ajustó al proceso manual. Es decir, un día-tramo-período es removido si la mediana de sus observaciones es mayor a 50 s/km que a la mediana de todas las observaciones de dicha semana.

El número de incidentes totales removidos con este método está resumido en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resumen incidentes por eje

Eje	Incidentes	Observaciones totales	Observaciones s/incidentes	% Eliminadas
Macul	15	900	885	1,66 %
Matta- Grecia	40	1.350	1.310	2,96 %
Carmen	24	1.050	1.026	2,28 %
Powell	95	5.987	5.892	1,58 %

3.4. Descripción de ejes: Matta - Grecia (sentido Oriente - Poniente)

El eje Matta - Grecia tiene un largo total de 10,65[kms] el cual es dividido en 9 tramos. Consta de tres tipos de prioridad: tráfico mixto, 2 pistas sólo bus y corredor segregado de una pista (con adelantamiento en paraderos). En la Tabla 3.4 se muestra qué tramos corresponden a cada tipo de infraestructura. Además, está la presencia de zonas pagas en tres tramos (2, 4 y 7).

Tabla 3.4: Información general para Eje Matta - Grecia

Tramo	Prioridad	Nº Pistas	Largo [m]	Semáforos/km	Paraderos/km	Detalles
1	Corredor (1 Pista)	2	1278,8	5,5	2,3	desde Cousinho Macul hasta Altiplanos
2	Corredor (1 Pista)	2	1357,8	4,4	2,2	desde Altiplanos hasta Playa Ancha
3	Corredor (1 Pista)	2	913,8	3,3	1,1	desde Playa Ancha hasta Alcalde Mocnkeberg
4	Corredor (1 Pista)	3	1204,3	4,2	1,7	desde Alcalde Monckeberg hasta Exequiel Fernandez
5	Corredor (1 Pista)	3	1129,9	5,3	1,8	desde Exequiel Fernandez hasta Campo de Deportes
6	Corredor (1 Pista)	3	1565,4	5,1	1,9	desde Campo de Deportes hasta Crescente Errazuriz
7	Tráfico Mixto	3	720,3	6,9	1,4	desde Crescente Errazuriz hasta Cuevas
8	2 Pistas Sólo Bus	3	1832,7	4,4	3,3	desde Cuevas hasta San Diego
9	Tráfico Mixto	3	648,2	4,6	1,5	desde San Diego hasta San Ignacio

Ocho servicios son lo que circulan por este eje: seis durante todo el día y dos que operan en horarios limitados. La Tabla 3.5 muestra la lista de los distintos servicios presentes en el eje. Uno de estos últimos es un servicio expreso (506e). Debido a incompatibilidad entre los datos de velocidades y demanda, no fue posible considerar el 10% de los buses. Esto implica que la muestra aquí considerada no es la total circulando, pero sí es suficientemente representativa. Sin embargo, el flujo de buses aquí representado no corresponde al total de buses de la realidad.

Tabla 3.5: Lista de servicios en eje Grecia - Matta

Servicio	Tramos
506	todos
506e	todos
506	todos
507	todos
507c	todos
510	todos
511	1 → 5
516	2 → 6

La dirección analizada es Oriente - Poniente, que conecta una zona residencial (Peñalolen) con centro de actividades (Ñuñoa) y luego con una zona del centro de la ciudad (Santiago centro).

Se trata un eje con una alta movilidad de personas, porque conecta con líneas de metro (intermodalidad), hay foco de actividades (comerciales y educacionales) y finalmente hasta una zona céntrica y con alta actividad comercial.

3.4.1. Descripción de la velocidad

En la Figura 3.8 se muestran las velocidades promedio para cada tramo durante el día. El corredor posee los valores más altos de velocidad durante el día (línea sólida), con el tráfico mixto y pistas sólo bus con valores más bajos. Observando sólo los tramos de corredor, se observan tramos con velocidades mayores que otros. Esto se debe al nivel de actividad de pasajeros, como también al cruce de intersecciones importantes

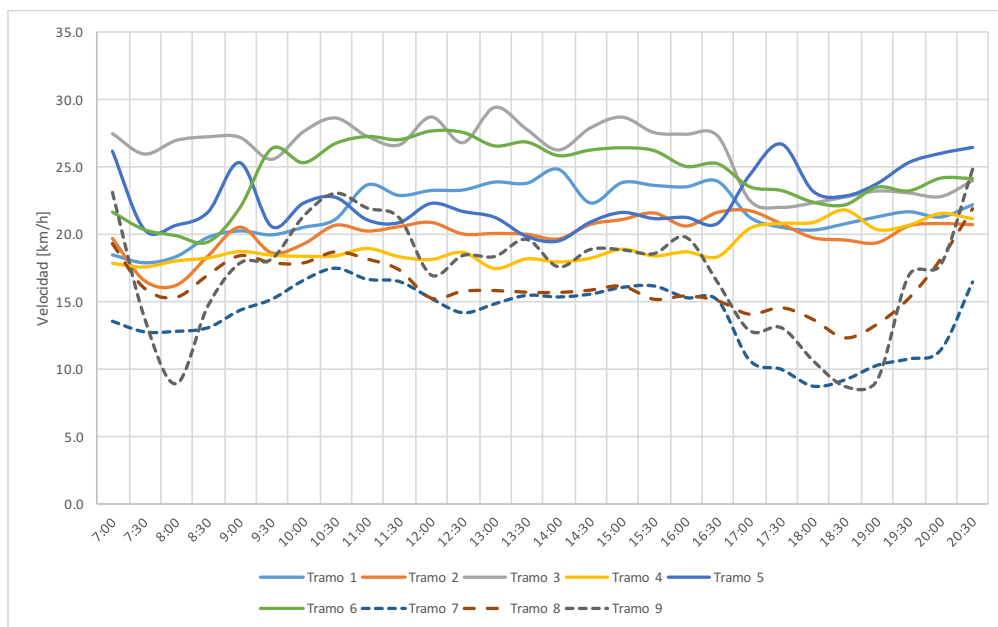


Figura 3.8: Velocidad comercial en eje Matta - Grecia. Fuente: Elaboración propia

Analizando por períodos del día, se aprecia un claro efecto de punta mañana para todos los tramos, siendo más pronunciado en los tramos de tráfico mixto y pista sólo bus. La punta tarde también es posible de detectar en los tramos 7, 8 y 9, pero en el corredor segregado no es tan notorio.

3.4.2. Descripción del flujo de buses

En la Figura 3.9 se puede ver que hay un flujo variable entre los tramos. Esto se debe que hay distinto número de servicios por tramo. El flujo de buses es alto en todos los tramos, siendo los de mayor valor (hasta 80 buses/hora) los tramos correspondientes al corredor de buses, lo que tiene bastante sentido por ser el más eficiente.

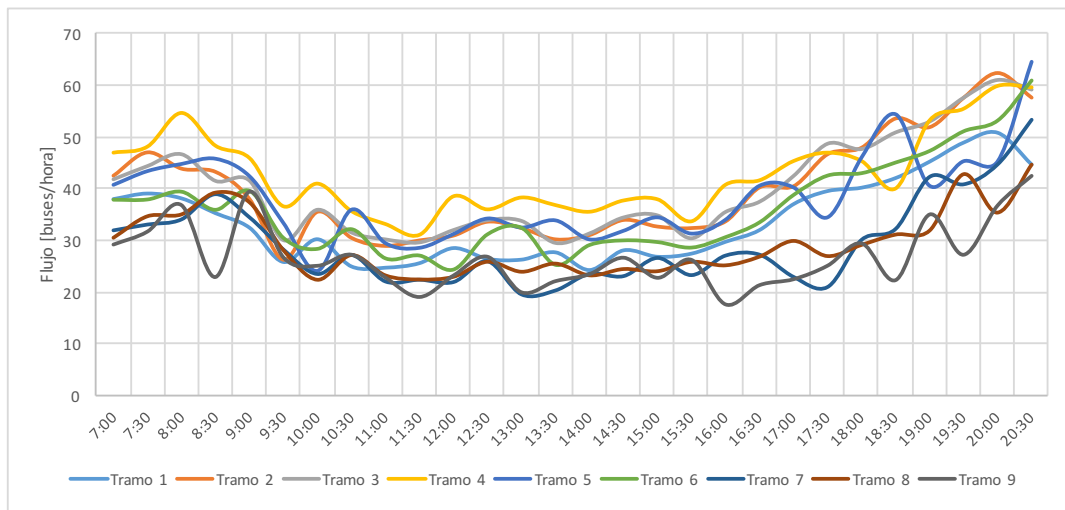


Figura 3.9: Flujo de buses en eje Matta - Grecia *Fuente: Elaboración propia*

Por otra parte, se observan claros aumentos del flujo en punta mañana y tarde. Esto porque existen dos servicios (506e y 507c) que sólo operan en estos períodos, además que los servicios que operan durante todo el día tienen frecuencias mayores en los períodos punta. Esto sin duda es relevante, ya que la capacidad de los corredores no es infinita y un mayor flujo incide en el paso.

3.4.3. Descripción de la demanda

En este eje se observan tramos con mucha actividad de pasajeros, mientras otros tienen muy baja demanda. Las Figuras 3.10 y 3.11 muestran la demanda de subida y bajada respectivamente. Se puede ver que los tramos 3, 5, 6 y 9 son poco demandados durante todo el día, mientras que el tramo 1 tiene alta actividad durante la punta mañana y baja actividad durante el resto del día. Luego vienen los tramos 2, 4 y 8 que poseen una actividad considerable durante todo el día con más de 10 pax/bus-km, con ciertos peaks marcados en los horarios puntas en especial en la mañana para el tramo 2, lo que corresponde a una estación intermodal con una de las líneas de metro. Por último, se logra ver que el tramo 7

que también tiene una estación de metro cercana, tiene unos niveles de demanda muy por sobre el resto. Esto implica que este tramo será removido de la modelación, ya que sus valores de demanda generarán problemas en los parámetros del modelo, al estar muy influenciados por estas observaciones.

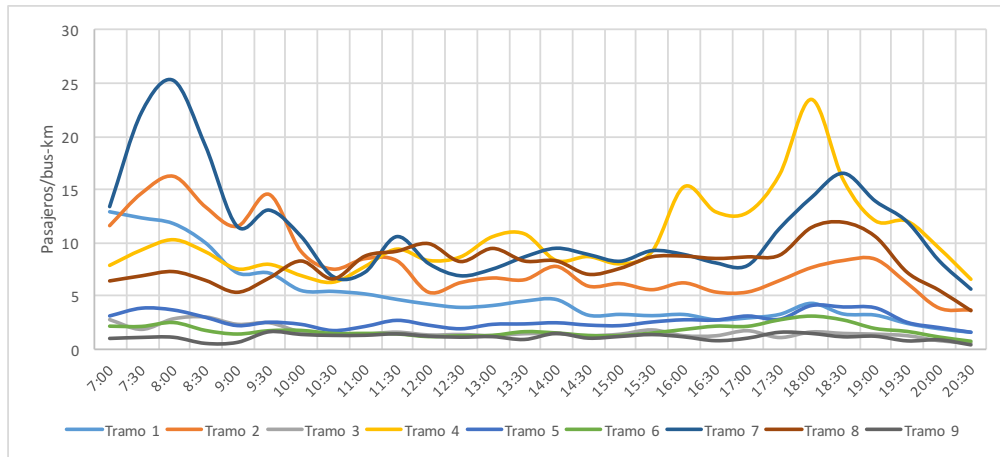


Figura 3.10: Demanda de subida en eje Matta - Grecia

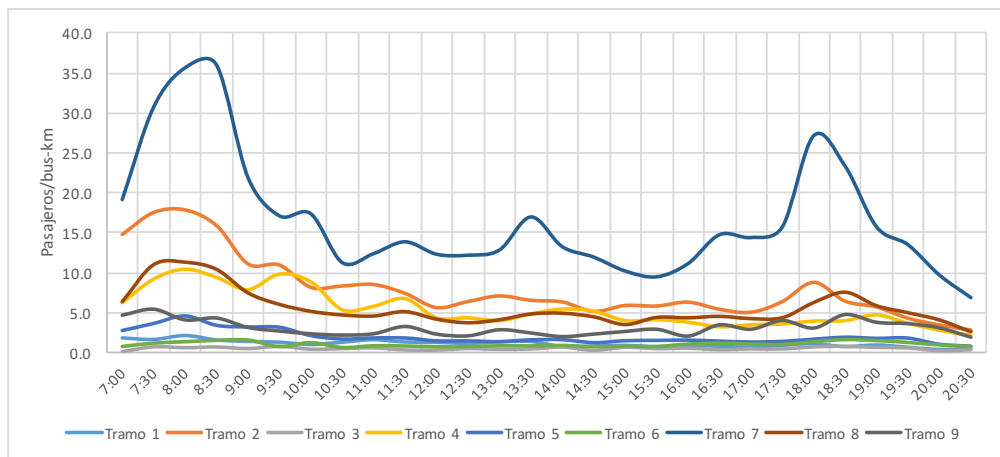


Figura 3.11: Demanda de bajada en eje Matta - Grecia

La Figura 3.12 muestra las detenciones promedio durante el día para cada tramo. Se puede ver que las detenciones van de 0,5 a 3 det/bus-km. El tramo 3 tiene valores por debajo al resto de los tramos, ya que sólo tiene 1,1 paraderos/km, además que los servicios expresos no se detienen en este tramo. Por otra parte, el tramo 8 tiene el valor más alto durante el día, y también el con más paraderos/km. El resto de los tramos se encuentra entre medio de estos dos, con valores entre 1 y 2 det/bus-km. Es posible notar que no hay una relación directa entre número de detenciones y demanda, en particular se observa que el tramo 7 tiene muy pocas detenciones para el alto nivel de demanda existente.

En términos generales, es posible identificar que este es un eje con con focos de alta actividad, con altos flujos de buses y por ende de pasajeros. No sólo hay tránsito de pasajeros de un lugar a otro, sino que aparecen múltiples destino y por ende, subidas y bajadas en

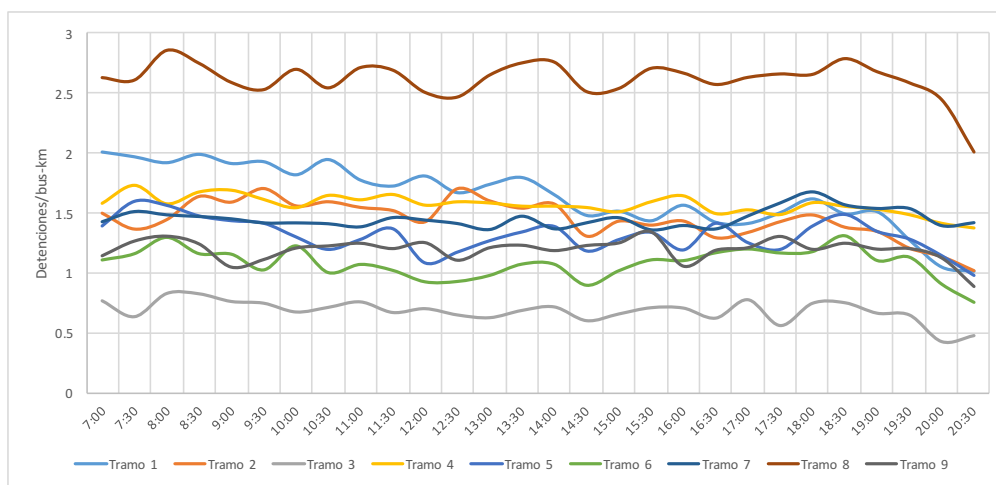


Figura 3.12: Detenciones en eje Matta - Grecia

distintos tramos. Aún así, hay harta variabilidad en el nivel de demanda entre tramos, lo que va a enriquecer el proceso de modelación.

3.5. Descripción de ejes: Carmen - Las Industrias (sentido Norte - Sur)

El eje Carmen - Industrias tiene un largo total de 7,7 [kms], el cual es dividido en 7 tramos. Consta de dos tipos de prioridad: 1 pista sólo bus y corredor segregado de una pista (con adelantamiento en paraderos). En la Tabla 3.6] se muestra qué tramos corresponden a cada tipo de infraestructura. La dirección es Norte - Sur conectando el centro de la ciudad con comunas periféricas del sur (San Joaquín y La Granja).

Tabla 3.6: Información general para eje Carmen - Las Industrias

Tramo	Prioridad	Nº Pistas	Largo	Semáforos/km	Paraderos/km	Detalles
1	1 Pista Sólo Bus	3	1013,2	4,9	3,9	desde Curico hasta Coquimbo
2	1 Pista Sólo Bus	3	1370,0	2,9	2,9	desde Coquimbo hasta Ñuble
3	1 Pista Sólo Bus	3	1109,3	4,5	2,7	desde Ñuble hasta Carlos Silva
4	1 Pista Sólo Bus	3	1014,1	3,0	2,0	desde Carlos Silva hasta Carlos Valdovinos
5	Corredor (1 Pista)	3	957,5	2,1	4,2	desde Carlos Valdovinos hasta Comercio
6	Corredor (1 Pista)	1	983,8	4,1	2,0	desde Comercio hasta Las Guayabas
7	Corredor (1 Pista)	1	1250,7	3,2	2,4	desde Las Guayabas hasta Lo Ovalle

Circulan por este eje dos servicios: uno durante todo el día y otro que corresponde a la versión expresa que opera en horarios limitados. La Tabla 3.7 muestra los dos servicios que recorren este eje.

Tabla 3.7: Lista de servicios en eje Carmen - Industrias

Servicio	Tramos
204	todos
204e	todos

3.5.1. Descripción de la velocidad

En la Figura 3.13 se muestran las velocidades promedio para cada tramo durante el día. Los tramos más cercanos al centro de la ciudad son los de menor velocidad en promedio durante el día. Además estos corresponden a pista sólo bus, que en teoría debiesen tener menor valor que el corredor segregado. El tramo 4 es un caso particular por tener velocidades más elevadas. Más adelante se analizará su relación con otras variables.

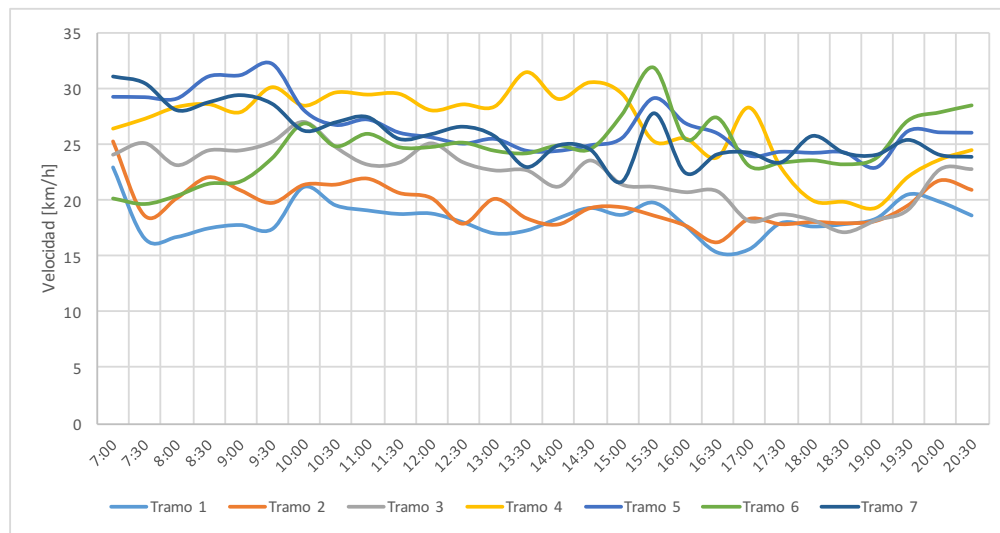


Figura 3.13: Velocidad comercial en eje Carmen - Las Industrias

Se muestran con línea sólida las velocidades del corredor. Se puede ver que estas se encuentran entre los 25 - 35 [km/hr] con una notoria disminución en el tramo 6 durante la punta mañana.

3.5.2. Caracterización del flujo de buses

La Figura 3.14 muestra los flujos de buses para cada tramo durante el día. Lo primero que se observa es que los valores de flujo son bastante bajos, lo que es razonable al ser sólo dos servicios los que operan en el eje y en algunos períodos sólo uno, ya que el servicio expreso opera en períodos limitados.

Además, se observa que el valor del flujo es el mismo para los distintos tramos en el mismo período. Esto hace sentido, ya que en todos los tramos operan los mismos servicios, esté o no funcionando el servicio expreso.

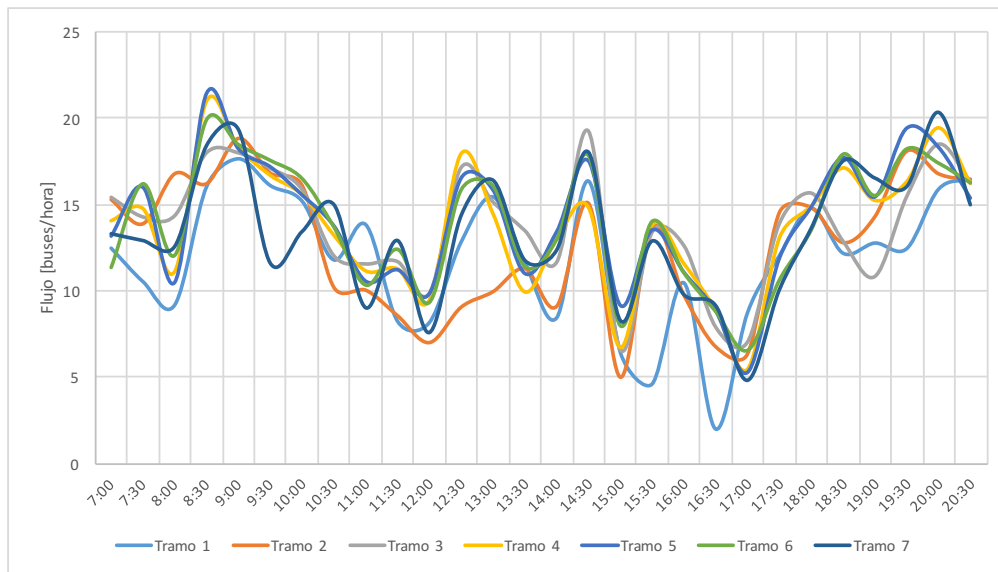


Figura 3.14: Flujo de buses en eje Carmen - Las Industrias

3.5.3. Caracterización de la demanda

La demanda en este eje tiene una tendencia a ser baja (menor a 8 pax/bus-km), excepto en determinados tramos y sólo en ciertos períodos. Dado que se considera sólo un sentido y los servicios se mueven desde el centro (plazas de trabajo) hacia la periferia (zonas residenciales), se observa que los peaks de demanda se encuentran durante la tarde, luego que las personas finalizan su jornada laboral.

Las Figuras 3.15 y 3.16 muestran la demanda de subida y bajada durante el día para cada uno de los tramos respectivamente. Se puede ver que los peaks de subidas se encuentran en la punta tarde, tanto en el centro que tiene actividad comercial, como en el Tramo 5, que posee una alta concentración de paraderos. Interesante resulta ver que hay un punto alto de subidas en la mañana para el tramo 1, el cual está muy cercano a la principal avenida de la ciudad y de una estación de Metro.

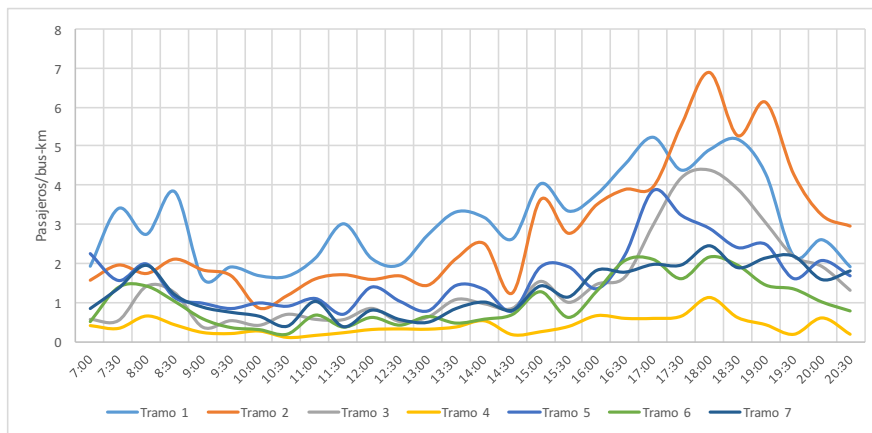


Figura 3.15: Demanda de subida en eje Carmen - Las Industrias

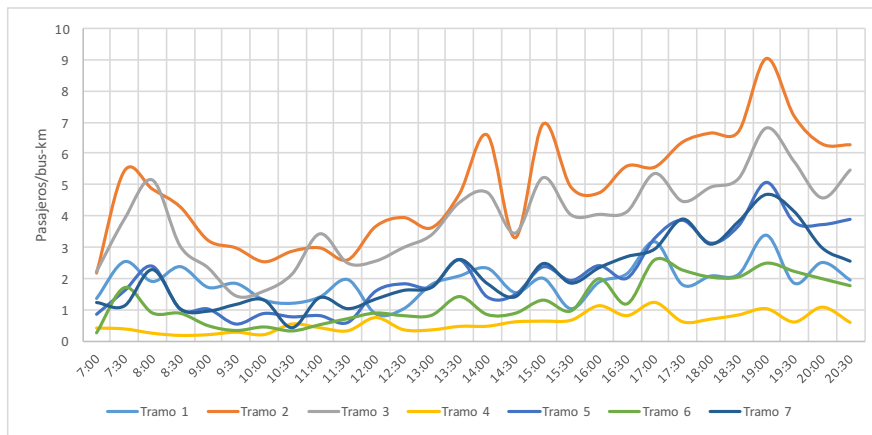


Figura 3.16: Demanda de bajada en eje Carmen - Las Industrias

Las bajadas muestran que el Tramo 2 vuelve a ser en con más actividad, en especial en la tarde. Por otra parte, se vuelve a ver una baja de actividad de pasajeros en bajadas en los tramos de corredor, lo que confirma que son muy poco demandados.

La Figura 3.17 muestra las detenciones promedio durante el día para cada tramo. Se puede ver que las detenciones van de 0,5 a 2,5 det/bus-km. Se observa que el valor de todos los tramos crece en la tarde, al igual que lo visto con la demanda. En general, en la tarde los tramos tienden a duplicar el número de detenciones promedio de la mañana. El tramo 4 tiene valores por debajo al resto durante todo el día. Los primeros tres tramos tienen un comportamiento bastante similar, al igual que los tramos 6 y 7 durante el día.

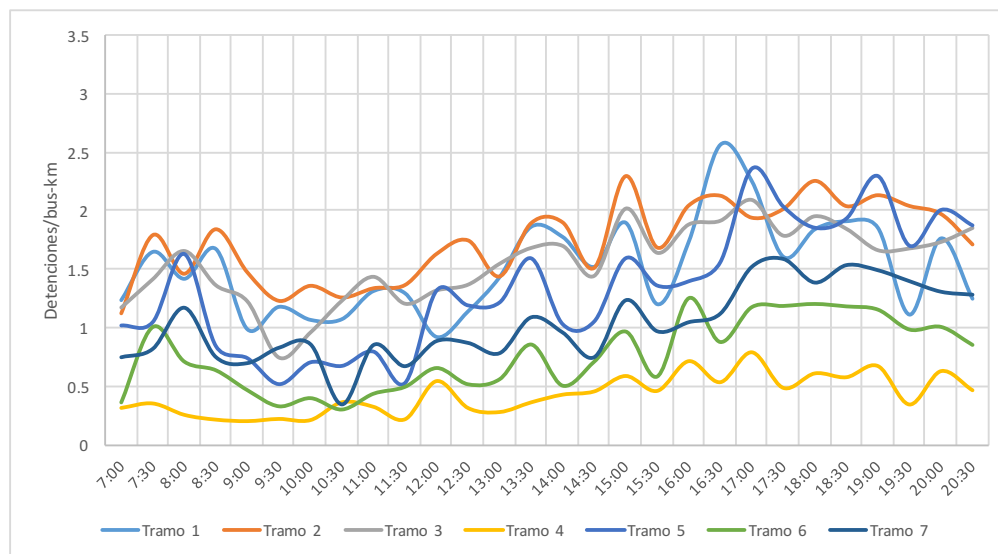


Figura 3.17: Detenciones en eje Carmen - Las Industrias

Los tramos con pista sólo bus son los con mayor actividad de pasajeros, de la comuna de Santiago. Particular es el caso del tramo 4, que tiene demanda casi nula durante todo el día. Esto explica las altas velocidades observadas. Por otra parte, el corredor tiene baja actividad de pasajeros, con pequeños aumentos en períodos punta.

3.6. Descripción de ejes: Macul - Los Leones (sentido Sur - Norte)

El eje Macul - Los Leones tiene un largo total de 7,55 kms dividido en 7 tramos. Consta de dos tipos de infraestructura diferente: tráfico mixto y 1 pista sólo bus, con distinto número de pistas totales. En la Tabla 3.8 se muestra qué tramos corresponden a cada tipo de infraestructura. La dirección es sur - norte conectando una zona periférica de la ciudad (Macul - La Florida) con comunas centrales y actividades comercial y educacionales (Ñuñoa - Providencia).

Tabla 3.8: Información general para eje Macul - Los Leones

Tramo	Prioridad	Nº Pistas	Largo	Semáforos/km	Paraderos/km	Detalles
1	1 Pista Sólo Bus	3	863,9	2,3	3,5	desde El Libano hasta Victor Domingo
2	1 Pista Sólo Bus	3	1118,3	2,3	4,7	desde Victor Domingo hasta Quilin
3	1 Pista Sólo Bus	3	1267,1	3,1	3,1	desde Quilin hasta Rodrigo de Araya
4	1 Pista Sólo Bus	3	1056,6	3,8	3,8	desde Rodrigo de Araya hasta Grecia
5	1 Pista Sólo Bus	3	1129,0	4,5	3,6	desde Grecia hasta Irarrazaval
6	Tráfico Mixto	2	982,4	1,9	2,9	desde Irarrazaval hasta Pedro Lautarao
7	1 Pista Sólo Bus	2	1134,4	2,0	1,5	desde Pedro Lautarao hasta Bilbao
8	1 Pista Sólo Bus	2	1122,5	2,7	2,7	desde Bilbao hasta Traiguen

Circulan por este eje cuatro servicios: dos a lo largo de todos los tramos y otros dos que operan en un número limitado de tramos. La Tabla 3.9 muestra la lista de servicios y los tramos en donde operan.

Tabla 3.9: Lista de servicios en eje Macul - Los Leones

Servicio	Tramos
104	todos
212	todos
106	1 → 4
126	1 → 4
224	1 → 5

3.6.1. Descripción de la velocidad

La Figura 3.18 muestra la velocidad durante el día para cada tramo. Se observa una clara variabilidad de la velocidad durante entre tramos. El tramo 1 tiene velocidades muy altas, comparables a corredores segregados de otros ejes, mientras que hay tramos más similares al tráfico mixto. La variabilidad de velocidad durante el día es significativa y se observa una clara punta mañana, con una disminución en esta en todos los tramos. Esto último tiene sentido, ya que este sentido va hacia el centro de la ciudad, por lo tanto va a ir más congestionada a esa hora dado que es pistas sólo bus y tráfico mixto (invasión).

Por otra parte, el tramo 4 posee velocidades muy bajas en la tarde. Estos valores son problemáticos, ya que velocidades menores a 5 [km/hr] es menor que el caminata, lo que indica valores de congestión altísimos.

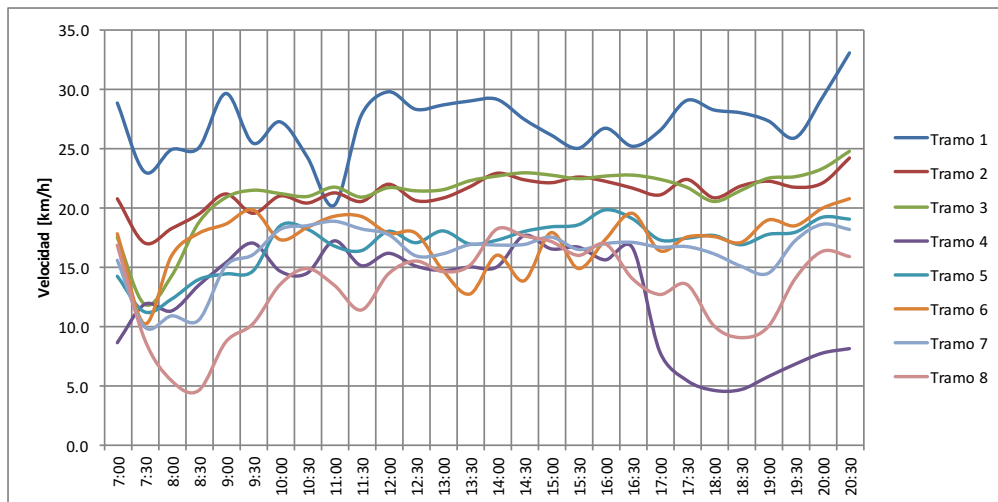


Figura 3.18: Velocidad comercial en eje Macul - Los Leones

Por último, observar que el tramo 6 (tráfico mixto) no resulta ser de velocidades menores a los de pista sólo bus. Se observa que hay tramos con mejores velocidades y otros con peor.

3.6.2. Caracterización del flujo de buses

La Figura 3.19 muestra los flujos de buses durante el día para cada tramo. Se observa que los tramos tienen distintos flujos de buses para un mismo período. Esto se debe a que distinto número de servicios operan en los tramos. Sólo en los tramos 1, 2, 3 y 4 operan los mismos servicios, en donde en este último sale del eje la línea 106. Luego, al terminar el tramo 5, sale del eje el servicio 224, explicando la disminución del flujo para los tramos 6 y 7. Esto es lo que se ve en la ilustración, en donde los primeros tramos tienen valores más altos y similares en donde operan la misma cantidad de líneas, siguiendo una disminución a medida que se avanza en los tramos.

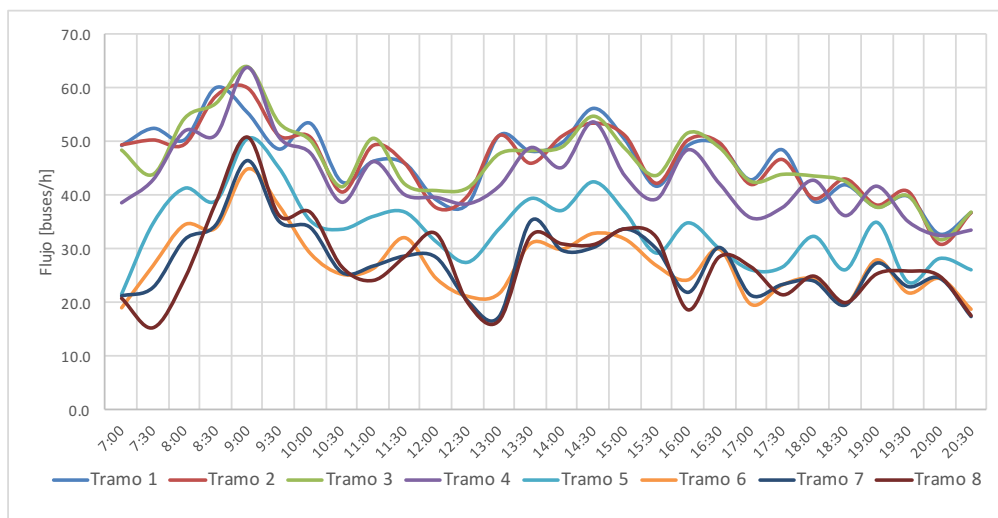


Figura 3.19: Flujo de buses en eje Macul - Los Leones

En términos de la escala de valores, se observa que los flujos están entre 20 y 60 buses/h. Estos valores coinciden con las características de este eje, que conecta con el centro financiero y además posee centros comerciales e importantes establecimientos educacionales en su trayectoria.

3.6.3. Caracterización de la demanda

En este eje se observa que hay tramos con mucha actividad de pasajeros, mientras que otros son de muy baja demanda. Las Figuras 3.20 y 3.21 muestran las demandas de subida y bajada. Se puede ver que que el tramo 1 es muy poco demandado durante todo el día, lo que en parte explicaría sus altas velocidades. Además se observa que es un eje con peaks más altos de bajada que de subida y, por lo visto anteriormente, concentra mayor actividad en la punta mañana. El tramo 4 cruza con una avenida principal (Grecia) y concentra varias actividades (centro comercial y casas de estudios), lo que explicaría el peak de demanda. Lo mismo ocurre con el tramo 6 y 7, en donde hay hartas actividades principalmente comerciales y están cercanos a una estación de la principal línea de Metro de la ciudad (más al norte de donde termina el eje).

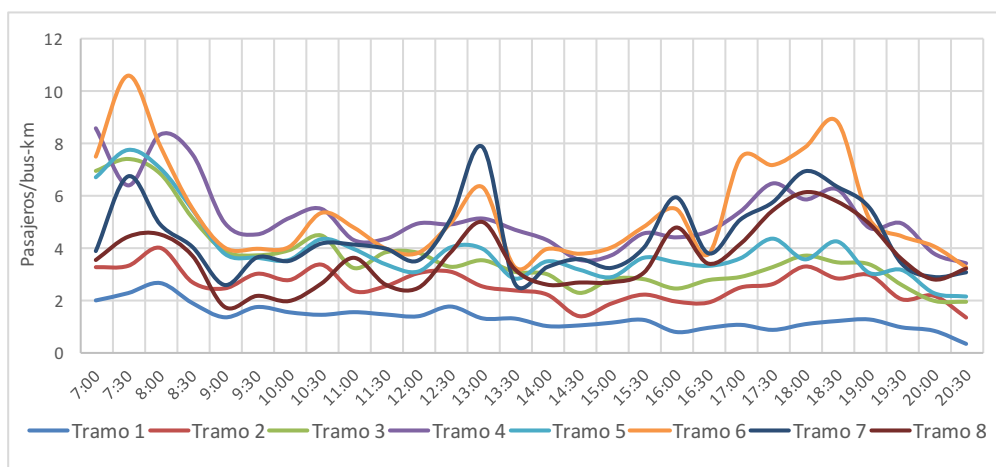


Figura 3.20: Demanda de subida para cada tramo en Eje Macul - Los Leones

La Figura 3.22 muestra las detenciones promedio durante el día para cada tramo. Se puede ver que las detenciones van de 1 a 3,5 det/bus-km. En la punta mañana se encuentran los valores más elevados para cada tramo, al igual que lo visto con la demanda. El tramo 1 posee valores por debajo al resto de los tramos durante todo el día, siendo también el de las velocidades más altas. Por otra parte, el tramo 5 es el que tiene mayores detenciones desde la mañana hasta la punta tarde. El resto de los tramos se mantiene en un rango muy similar (entre 2 y 3 det/bus-km en la mañana y cercano a 2 det/bus-km el resto del día).

En términos generales, es posible identificar que este es un eje con focos de alta actividad, con altos flujos de buses y de pasajeros. No sólo se trasladan pasajeros desde el inicio al fin del eje, si no que aparecen múltiples destinos intermedios y por ende, subidas y bajadas en distintos tramos.

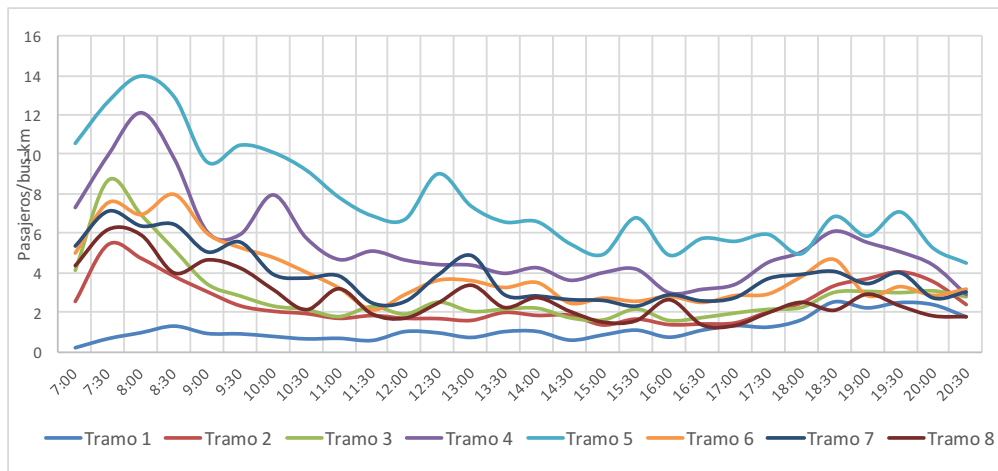


Figura 3.21: Demanda de bajada para cada tramo en Eje Macul - Los Leones

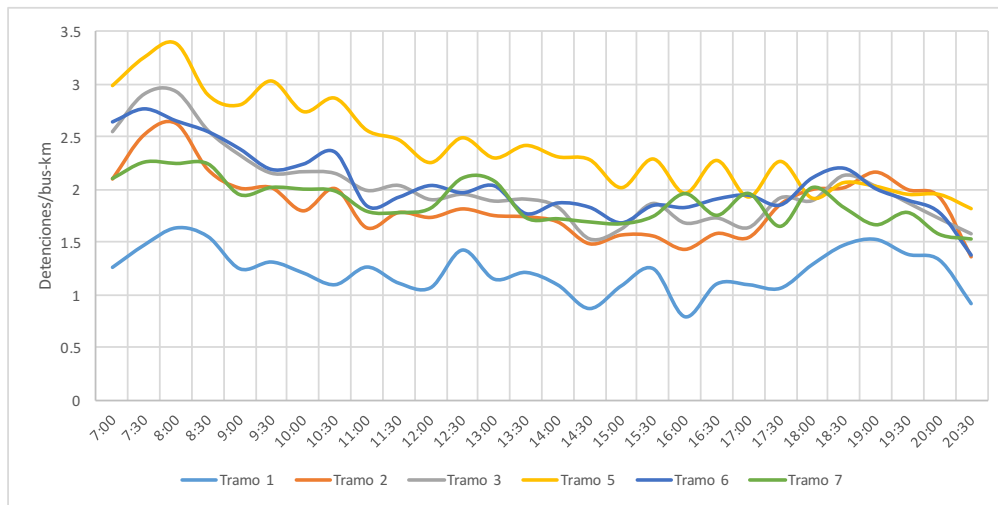


Figura 3.22: Detenciones en eje Macul

3.7. Descripción de ejes: Powell

El eje Powell Blvd tiene un largo total de 10,3 [kms] dividido en 8 tramos. Todos estos son de tráfico mixto, en donde algunos tienen una pista y otros dos. En la Tabla 3.10 se muestran los tramos y sus características principales. En general, se observa una baja densidad de intersecciones semaforizadas y una alta densidad de paraderos.

Tabla 3.10: Información por tramo Powell Blvd, *Portland*

Tramo	Prioridad	Nº pistas	Largo [m]	Paraderos/km	Semáforos/km	Detalles
8	Tráfico mixto	1	1634,0	4,4	1,3	desde SE 131th hasta SE 112th
9	Tráfico mixto	1	1146,8	4,3	1,7	desde SE 112th hasta SE 98th
10	Tráfico mixto	2	1348,1	3,8	3,8	desde SE 98th hasta SE 80th
11	Tráfico mixto	2	1312,2	4,5	3,0	desde SE 80th hasta SE 64th
12	Tráfico mixto	2	1182,5	4,3	1,7	desde SE 64th hasta SE 49th
13	Tráfico mixto	2	1389,3	4,3	1,4	desde SE 49th hasta SE 33th
14	Tráfico mixto	2	1242,5	4,1	2,4	desde SE 33th hasta SE 20th
15	Tráfico mixto	2	1057,7	1,9	1,9	desde SE 20th hasta SE 7th

Una característica interesante de este eje es que al operar con horarios de pasada por cada paradero, el bus puede estar adelantado o atrasado en su operación. En el caso que los buses estén atrasados, la medida que se aplica es que los conductores de los buses tiendan a manejar más rápido. En el caso de que los buses estén adelantados en su horario de pasada, los conductores tienen designados ciertos paraderos para ajustarse a su horario. Estos paraderos se denominan *paraderos timepoint*.

3.7.1. Descripción de la velocidad

En la Figura 3.23 se muestran las velocidades promedio para cada tramo durante el día. Los rangos de velocidad se encuentran entre 10 y 35 km/h, en donde hay un grupo de tramos (9, 11 y 15) que durante la mayor parte del día tiene una velocidad alta (cercana a 25 km/h), otro grupo tiene un rango intermedio de velocidad (tramos 8, 12, 13 y 14) y por separado está el tramo 10, cuyas velocidades son claramente más bajas que el resto. Este último comparte intersecciones con la autopista Veterans Memorial Freeway (I -205).

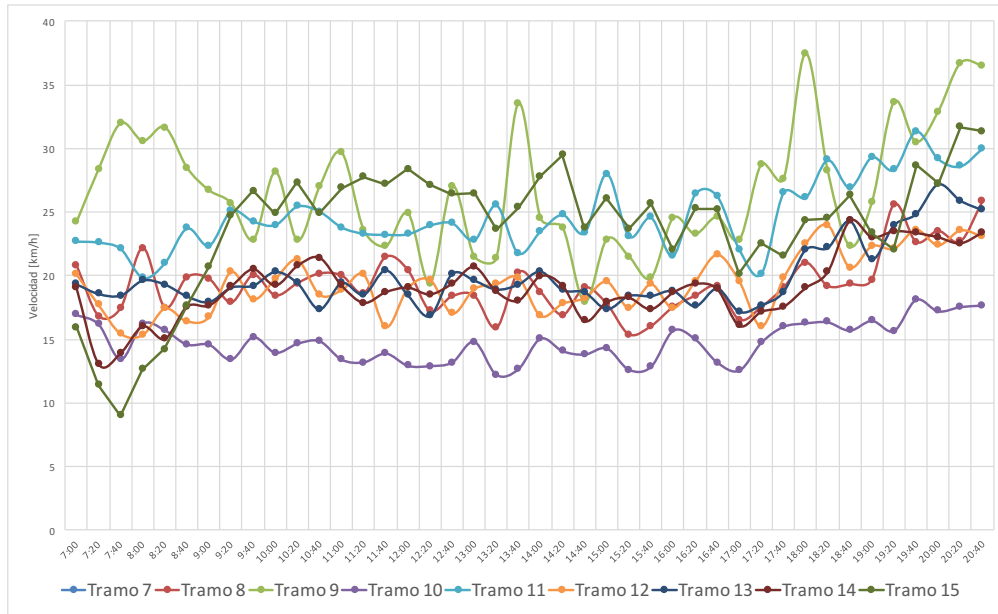


Figura 3.23: Velocidad comercial en eje Powell

Mirando los distintos períodos, es notorio el efecto de punta mañana en donde la velocidad cae principalmente en los tramos posteriores a la autopista (11 en adelante). El punto más crítico se alcanza para el tramo 15, en donde la velocidad es menor a los 10 km/h, siendo que el resto del día este tramo tiene velocidades bastante altas.

En la tarde se pueden ver aumentos de la velocidad para todos los tramos, específicamente después de las 17:00. La tendencia es bastante clara, aumentando la velocidad en algunos tramos más que en otros. Está en sintonía con el hecho de que este tramo va hacia al centro desde un suburbio, lo que implica que en la tarde hayan mayores velocidades, ya que el sentido más cargado es el contrario (desde el centro hacia el suburbio).

3.7.2. Caracterización del flujo de buses

La Figura 3.24 muestra los flujos de buses para cada tramo durante el día. Lo primero que se observa es que los valores de flujo son bajos, lo que es razonable al ser sólo un servicio el analizado, que además es de baja frecuencia. Cabe destacar que este es el único servicio que opera entre los tramos 8 y 13, y se agrega un servicio extra entre los tramos 14 y 15 (el cual no es considerado).

Se observa que durante el día el flujo es bastante parejo con valores cercano a los 4 buses/hora. En la punta mañana este valor aumenta hasta casi 10 buses/hora, lo que refleja una mayor demanda en tales períodos.

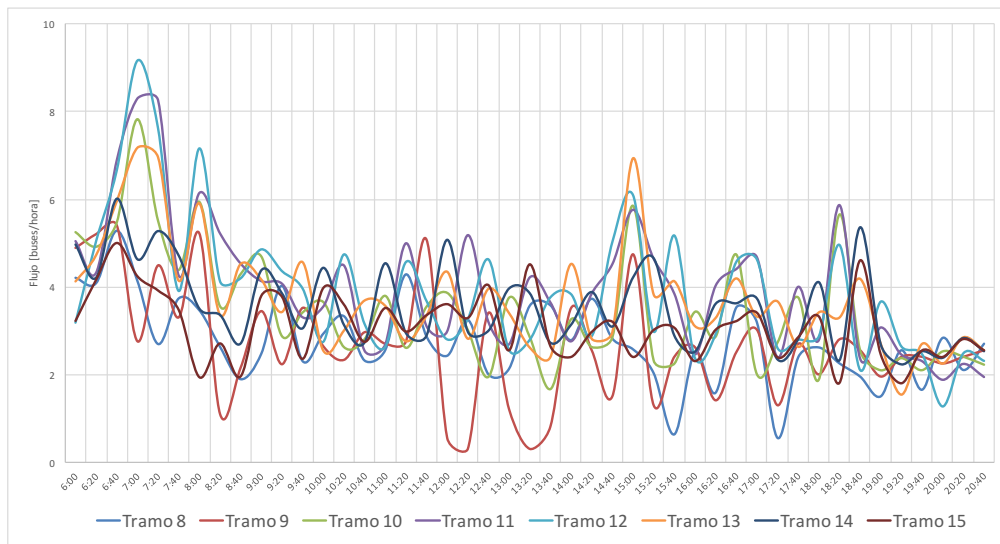


Figura 3.24: Flujo de buses en eje Powell

3.7.3. Caracterización de la demanda

La demanda en este eje son bajas (menores a 6 pax/bus-km) tanto de subida como de bajada, excepto en el tramo 10 alrededor de las 13:30. Las Figuras 3.25 y 3.26 muestran la demanda de subida y bajada durante el día para cada uno de los tramos respectivamente. Se puede ver que en general la demanda es bastante plana en subidas. Existen unas pequeñas alzas en la mañana para los tramos 11, 14 y 15 con respecto al resto del día (alrededor de 2 pax/bus-km adicionales). En la punta tarde se observa que desde las 18:00 todas los tramos tienen una baja en su demanda de subida.

Las bajadas tienen una distribución temporal diferente, pero sigue un patrón bastante plano durante el día. Los peaks por tramos tienden a ser entre las 11:00 y 16:00. De todas formas, son de valores bastante bajos, con algunos tramos más activos que otros. En particular, el tramo 10 tiende a ser el tramo con mayor actividad de bajada y tiene un peak por sobre los 7 pax/bus-km a las 13:20.

La Figura 3.27 muestra las detenciones promedio durante el día para cada tramo. Se

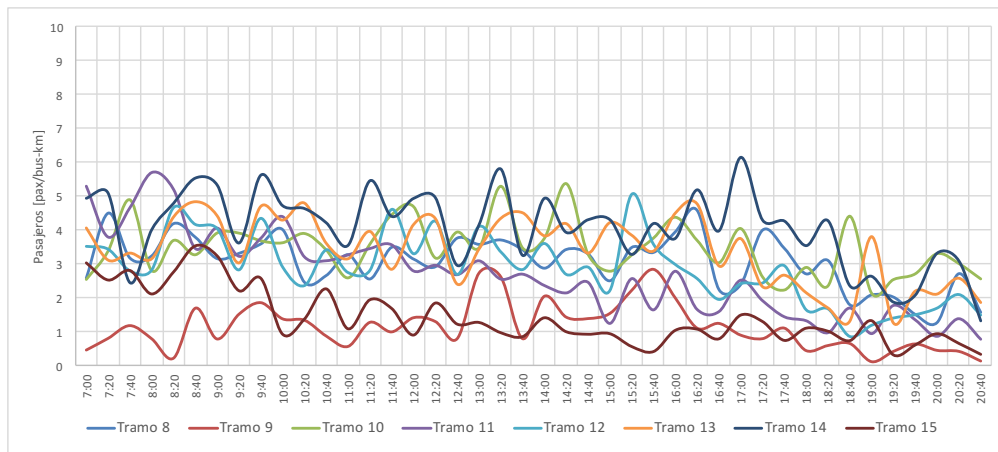


Figura 3.25: Demanda de subida en eje Powell

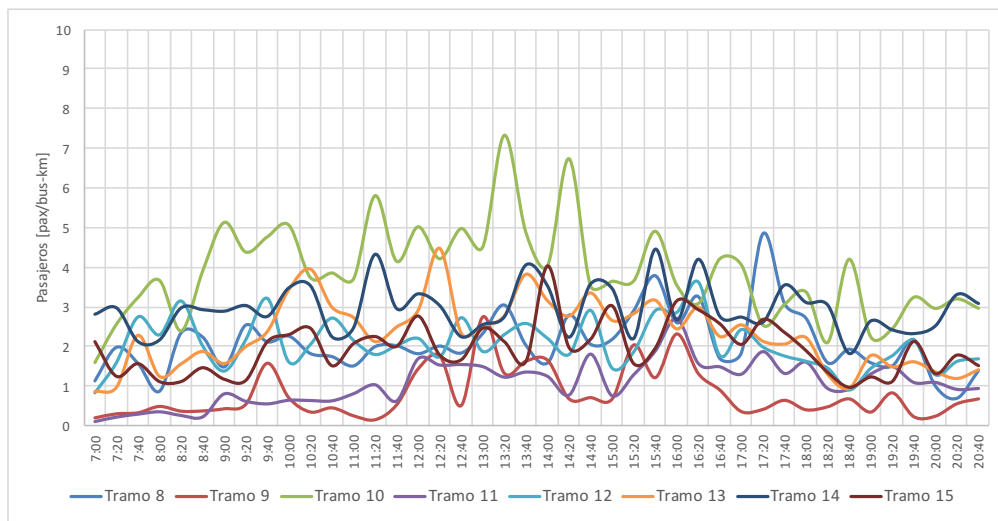


Figura 3.26: Demanda de bajada en eje Powell

puede ver que las detenciones van de 0,5 a 3 det/bus-km. Si se comparan los valores de las detenciones con el número de paraderos por kilómetro, se observa que en casi todos los tramos los buses se detienen alrededor del 50 % de los paraderos. Además, es especialmente particular las pocas detenciones en los tramos 9 y 15. Por otro lado, se observa una disminución para todos los tramos en las detenciones a partir de las 18:00.

3.8. Análisis en conjunto

Una vez hecho el análisis para cada eje, resulta necesario comparar todos los ejes a la vez para encontrar similitudes entre tramos con mismo tipo de infraestructura. Esta etapa permite encontrar las características propias para cada tipo de prioridad y contrastarlas con las otras. Se hacen comparaciones para construir la variable dependiente, determinar las variables independientes y corroborar que los datos tienen un comportamiento adecuado con lo reportado en la literatura.

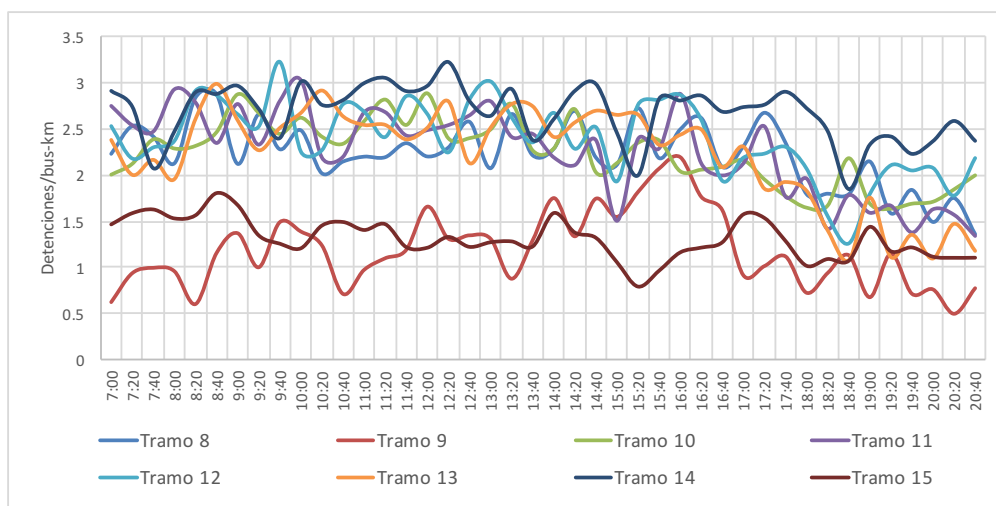


Figura 3.27: Detenciones en eje Powell

A continuación se muestra un análisis a través de herramientas gráficas y tablas de valores en distintos niveles de agregación del paso de los buses y sus variables dependientes.

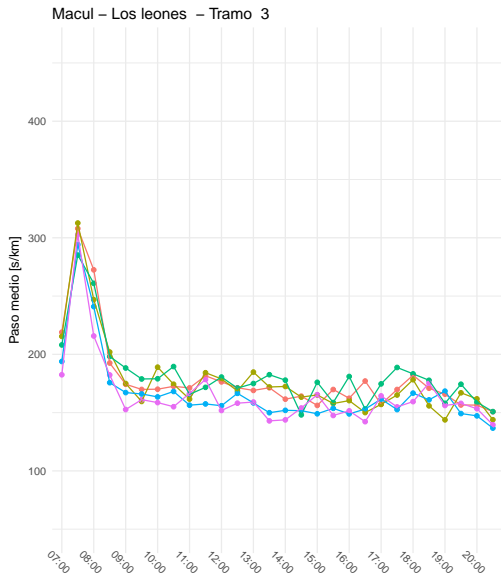
3.8.1. Líneas de servicios

Uno de los criterios adoptados para definir los tramos es que en ellos transiten los mismos servicios. Esto se hace para que no hayan servicios que atraviesen parcialmente un tramo, puesto que al recorrer una fracción del largo total ocurre que no representan el tramo completo, sino una sección acotada y sesgada.

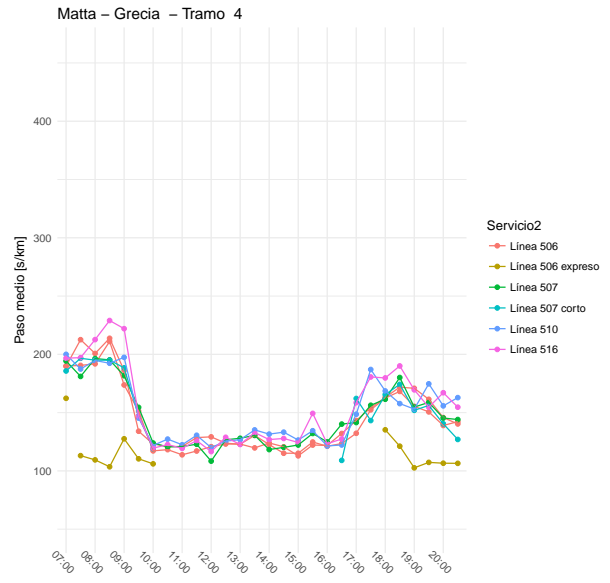
Sin embargo, es necesario verificar que el paso medio sea similar para distintos servicios dado un tramo. En la Figura 3.28 se pueden ver los pasos medios por servicio para un tramo en Macul y otro en Grecia. Se puede observar en la Figura 3.28.a que durante todo el día las distintas líneas tienen un paso medio muy parecido. Al observar todos los tramos, se concluye que mismos servicios sí tienen pasos medios parecidos en mismos tramo-período. Esto permite que los datos se puedan agregar sin la necesidad de distinguir por servicio, permitiendo que los agregados tengan más observaciones en su valor medio.

Esta consistencia entre servicios se cumple para todos los casos (ver Cd Anexo /servicios), excepto en donde operan servicios expresos. Estos muestran una tendencia a tener pasos medios menores al resto en todos los períodos que operan, como se observa en la Figura 3.28.b y más claro en la Figura 3.29. Esto se debe a que realizan menos detenciones, trayendo beneficios directos en demora en paraderos y también posibles ahorros en demora en intersecciones y tiempo de cruce.

Del análisis anterior se concluye que es posible utilizar un agregado del paso medio sin distinguir por línea de buses, excepto para los servicios expresos. Tal como se ve en la Figura 3.29, tanto para el corredor como en pistas sólo bus esto se cumple y así en el resto de los tramos. Un caso particular ocurre en ciertos casos donde aparecen valores muy altos de pasos

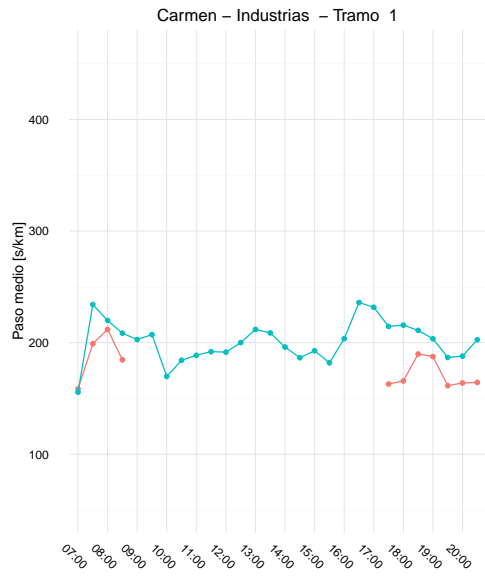


(a) Macul tramo 3

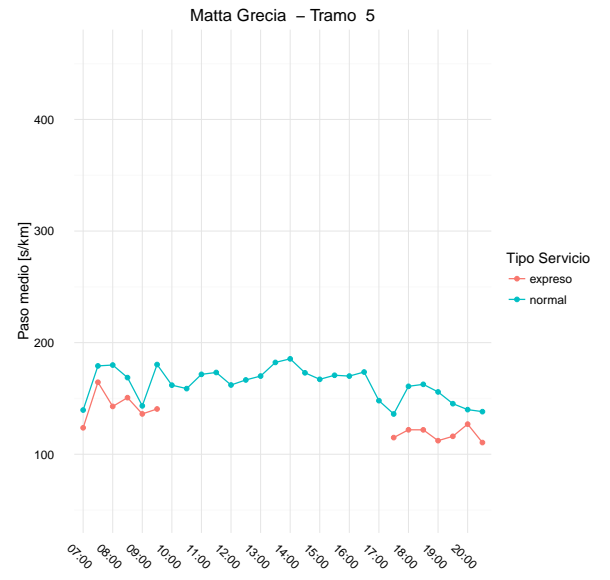


(b) Grecia tramo 4

Figura 3.28: Ejemplos de paso medio por tipo de servicio



(a) Carmen tramo 1 (*Pista sólo bus*)



(b) Grecia tramo 2 (*Corredor*)

Figura 3.29: Ejemplos de paso medio por tipo de servicio

medios. En la Figura 3.30 se observa que los buses expresos tienen pasos medios menores, excepto en los valores más altos. Esto se debe a la existencia de una alta congestión que

afecta a todos los buses.

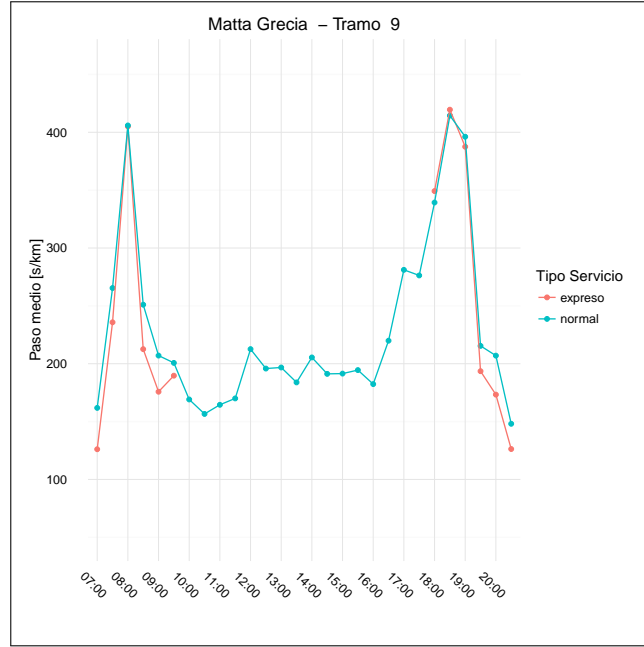


Figura 3.30: Paso medio en Matta tramo 9 por tipo de servicio.

3.8.2. Tipo de infraestructura

Por el nivel de segregación de las pistas, el paso medio debiese ascender en el siguiente orden: corredores, pistas sólo bus y tráfico mixto. Esto no es evidente en los datos, ya que otras variables también afectan en su valor. Sin embargo, debiesen haber tendencias para los distintos tramos durante el día. La Figura 3.31 muestra todos los tramos clasificados por su tipo de infraestructura y no se observa de manera tan evidente esta distribución teórica recién mencionada.

Sin embargo, es posible distinguir distintas regiones en donde sí se cumple esta distribución. Los tramos de corredor tienden a estar en la parte inferior de valores durante el día, sin presencia de peaks muy elevados en horarios puntas. Los tramos de tráfico mixto tienden a estar en la parte superior de los valores, con subidas del paso medio en horarios punta. En cambio, los tramos de pistas sólo bus tienen un comportamiento híbrido, pareciéndose en ciertos tramos al tráfico mixto y en otros a corredores. No queda claro si son comparables a uno u el otro y se deberán analizar otras variables para determinar el comportamiento del paso medio para las pistas sólo bus.

Una variable con la que es posible contrastar el paso medio es la demanda total. Una manera adecuada de comparar los efectos de la infraestructura es observar el paso medio con la demanda. La Figura 3.32 muestra el paso medio en el eje de las ordenadas y la demanda total (en pasajeros/bus-km) en el eje de las abscisas. Cada observación representa un dia-tramo-período-tipo usando la ecuación 3.3. Se identifica una relación lineal entre demanda y paso medio, con algunas observaciones que tienden a no seguir esta relación y tienen

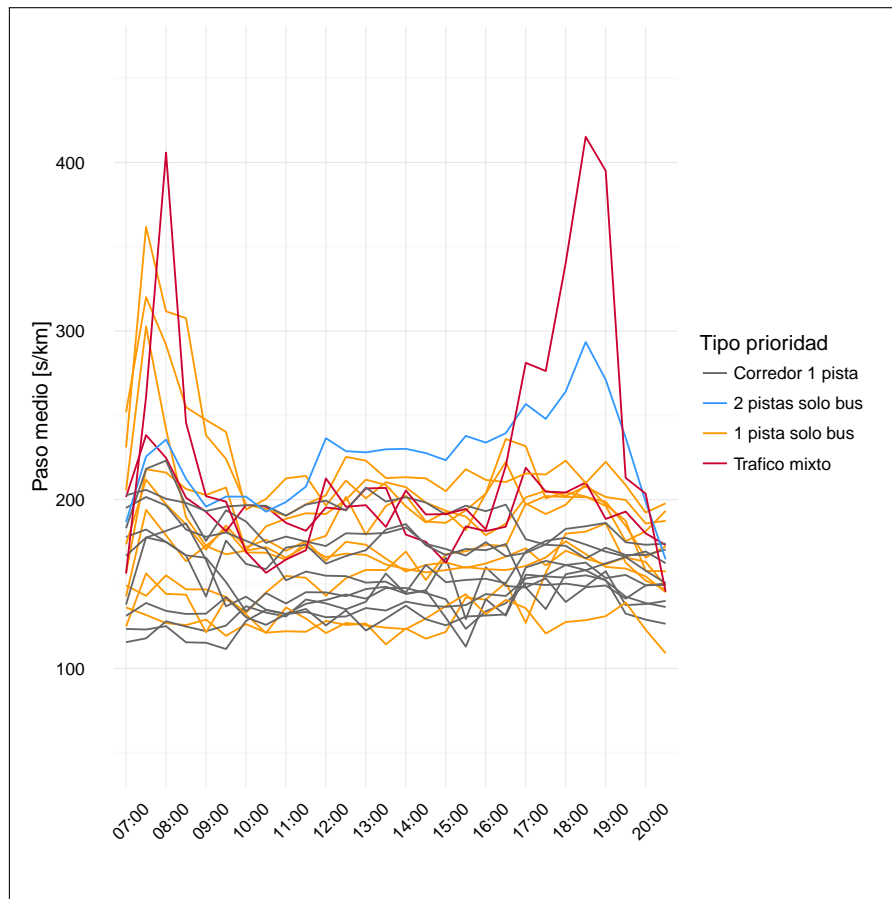


Figura 3.31: Paso medio para cada tramo, identificando su prioridad.

un paso medio muy alto. Esto ocurre cuando hay niveles de congestión muy altos y hay demoras excedentes significativas. Esto implica que la sobre congestión no permite identificar la relación entre demanda y paso medio en el gráfico (aunque esta exista).

Además se observa que luego de un valor cercano a 20 pax/bus-km, la tasa de crecimiento tiende a disminuir con respecto al paso medio. Es posible que haya un mejor aprovechamiento de las puertas (3 o 4) al crecer la demanda, siendo el tiempo de servicio por pasajero menor.

Si se compara el paso medio con las detenciones, también es posible observar una relación lineal creciente clara, tal como se muestra en la Figura 3.33. Esto concuerda con lo encontrado con la literatura. Debiesen identificarse diferencias según los tipos de prioridad, pero que no son reconocibles a este nivel gráfico.

La Figura 3.34 muestra sólo las observaciones de pistas sólo bus, comparando paso medio y demanda total. Se separan los distintos tipos de vías por número de pistas y se tiene para cada tipo de prioridad una curva de pendiente muy similar (regresión simple por tipo). Se observa que 'dos pista sólo bus' y '1 pista sólo bus - 2 pista autos' son bastante similares en su intercepto y pendiente, mientras que '1 pista sólo bus - 1 pista autos' tiende a estar desplazada verticalmente hacia arriba, indicando sistemáticamente una velocidad menor. Esta es una diferencia a tener en consideración, la que no está relacionada con la demanda, por lo que es probable que esté relacionada al tiempo de cruce y/o a demora en intersecciones.

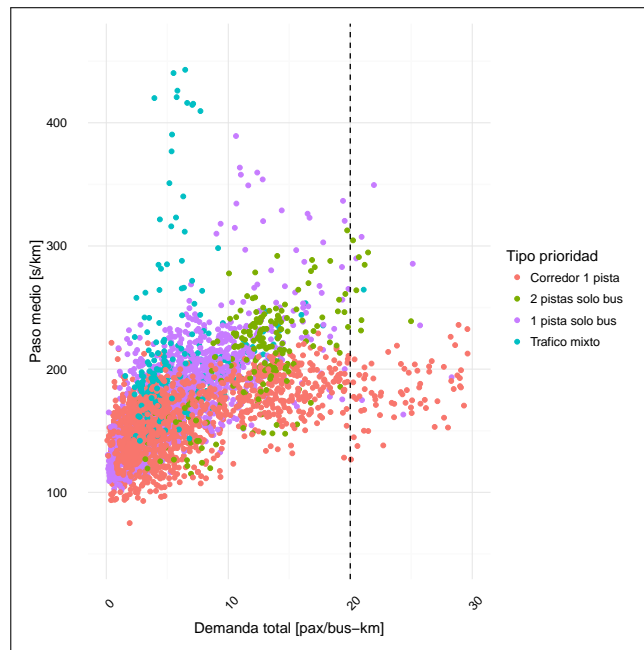


Figura 3.32: Paso medio v/s demanda total, todas las observaciones.

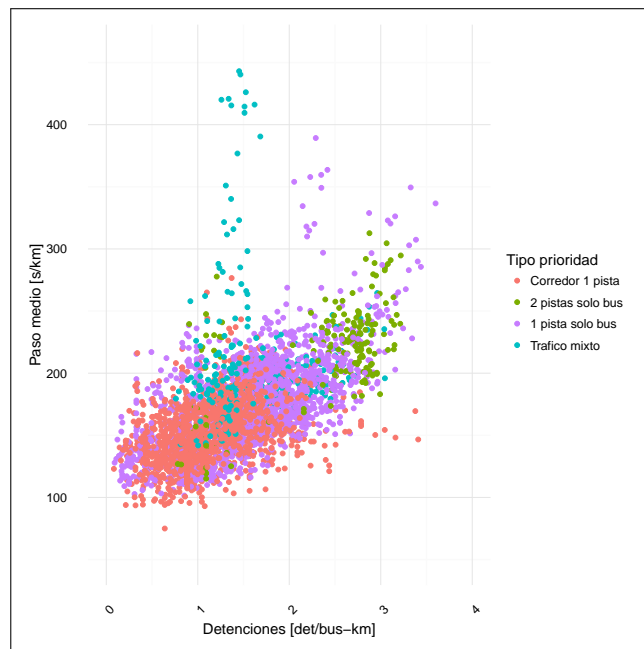


Figura 3.33: Paso medio v/s detenciones, todas las observaciones.

Por último, se compara el paso medio con el flujo de buses en las observaciones del corredor, para ver si existe una relación creciente entre ellos. En la Figura 3.35 se identifican las observaciones para los corredores de ambos ejes que poseen esta prioridad. Es posible observar una tendencia creciente (línea azul) en los datos, aunque se observa una dispersión muy alta. Por lo tanto, es posible que se pueda encontrar en la modelación una especificación del flujo para explicar el paso medio.

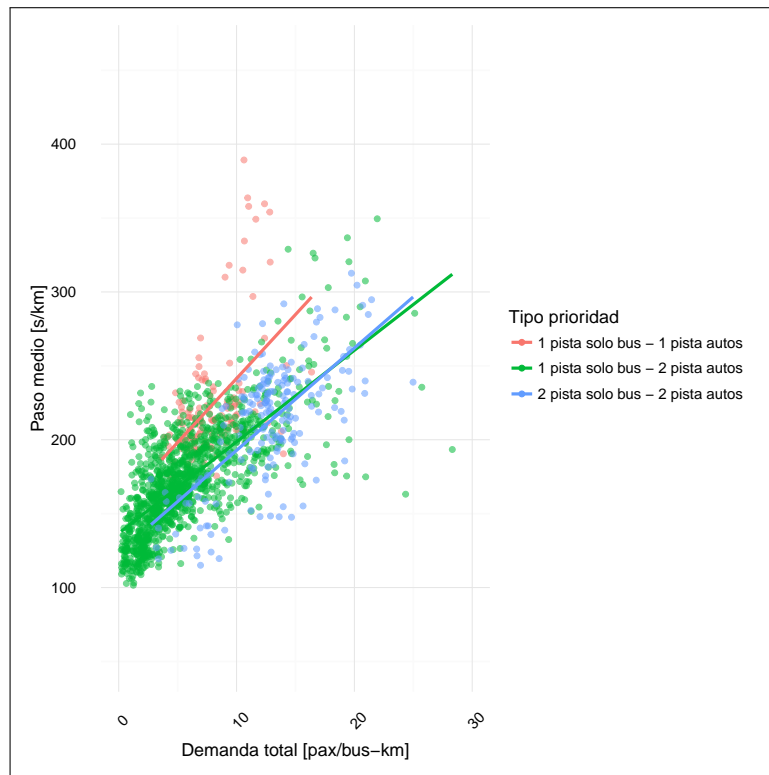


Figura 3.34: Paso medio v/s demanda total, observaciones de pista sólo bus.

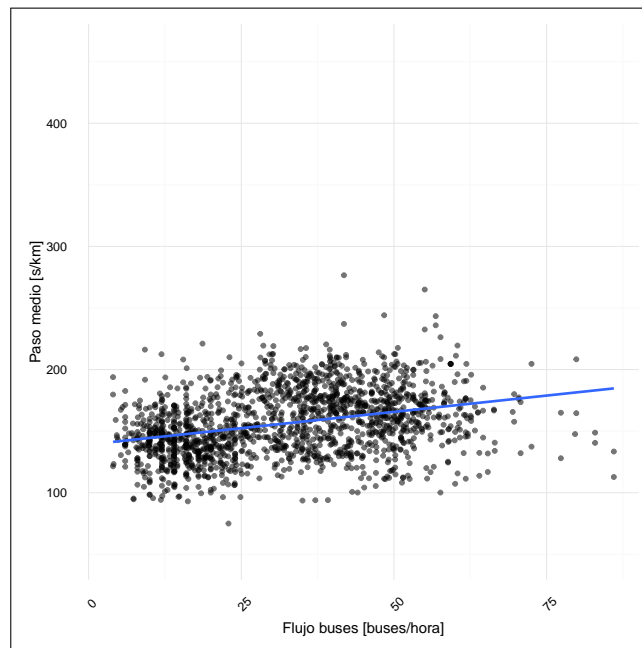


Figura 3.35: Paso medio v/s flujo, observaciones de corredores de 1 pista.

3.8.3. Análisis Portland

En el caso de Portland, no hay un análisis entre ejes, puesto que sólo es uno. Sin embargo, se realiza un estudio más profundo de las relaciones de variables para los distintos tramos.

La Figura 3.36 muestra el paso medio v/s la demanda total para cada una de las observaciones utilizando la ecuación 3.2. Se observa, al igual que en Santiago, una clara tendencia lineal creciente. y las demandas totales no sobrepasan el umbral de 15 pax/bus-km, por lo que no es posible determinar si existen o no efectos no lineales posteriores al umbral de 20 pax/bus-km. En la línea sobre los 300 s/km, se pueden ver observaciones del Tramo 15 que corresponden a los períodos donde existe una mayor congestión, escapando de la región lineal.

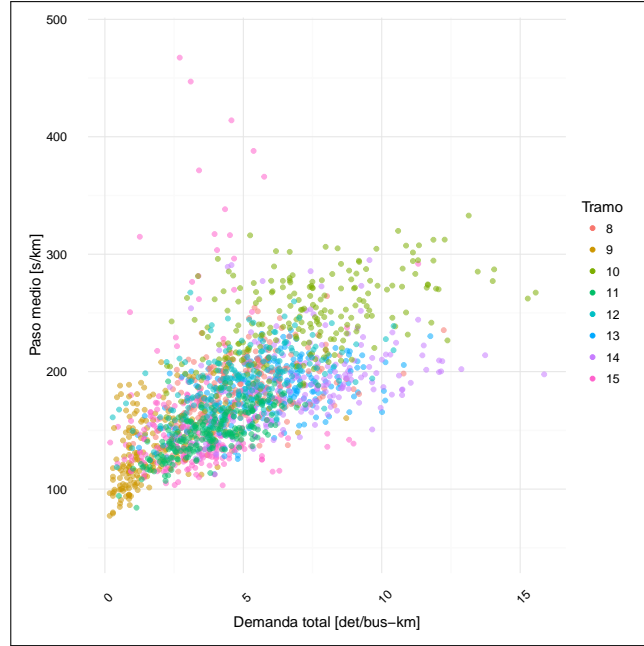


Figura 3.36: Paso medio v/s demanda total, todas las observaciones (Powell).

La Figura 3.37 muestra el paso medio v/s las detenciones (det/bus-km). Se puede ver una tendencia lineal creciente. En particular, se aprecia que el tramo 10 tiene sus observaciones levemente sobre el resto de los tramos y aparecen también las observaciones del tramo 15 afectadas por la congestión. De todas maneras, todos los tramos tienden a crecer con una tasa similar.

Dado que los buses en Portland funcionan con horarios de pasada, estos pueden estar adelantados o atrasados a su horario. Existe información tanto de los horarios de llegada de los buses como de los horarios que debiesen estar en el paradero (en segundos). La ecuación 3.7 muestra la generación de la variable 'LATE', que es un indicador del atraso/adelantado del bus. Si el valor es positivo, indica que el bus está atrasado, en cuyo caso uno esperaría que el conductor opere con cierto grado de apuro. Si el valor es negativo significa que el bus está adelantado en su horario, en cuyo caso se espera que el conductor opere con un grado de retraso, el cual se ve reflejado en demoras forzadas por el conductor en los paraderos *timepoint*.

$$late_{ip} = t_{llegada_{ip}} - t_{fijado_{ip}} \quad (3.7)$$

Donde:

$late_{ip}$: Atraso del bus i en el paradero p (en segundos).

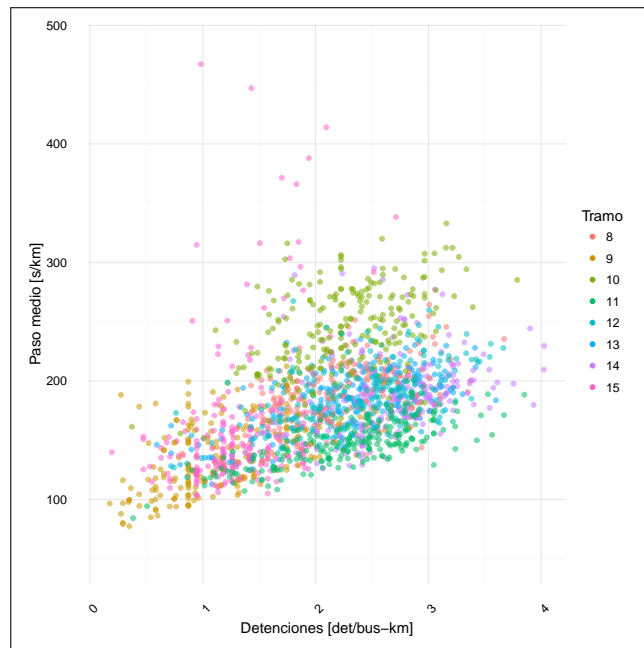


Figura 3.37: Paso medio v/s detenciones, todas las observaciones (Powell).

$tllegada_{ip}$: Hora real de llegada del bus i en el paradero p (en segundos).

$tfijado_{ip}$: Hora diseñada de llegada del bus i en el paradero p (en segundos).

Sin embargo, las observaciones analizadas son agregaciones de varias observaciones en donde cada una tiene un valor de atraso distinto en dos niveles diferentes:

- 1) Cada bus tiene un valor de atraso diferente en cada paradero de un mismo tramo.
- 2) Cada bus tiene un valor de atraso promedio diferente en cada tramo dado un mismo período.

Para resolver el primer nivel, se agregan las observaciones por tramo y período para cada bus, removiendo los paraderos y se calcula el atraso (late) como el promedio del atraso en cada uno de los paraderos del tramo. Luego, se agregan las observaciones por día de la semana, tramo y período(usando la ecuación 3.2) y se vuelve a calcular el valor promedio del atraso.

Por otra parte, se crea la variable 'Dlate' que clasifica el nivel de atraso del bus en categorías, tal como muestra la Tabla 3.11. Este valor es posible de asignar para cada bus en cada paradero e ir agregándolo. Se calcula el promedio para cada bus por tramo al remover los paraderos y luego se calcula en el nivel de día-tramo-período, agregando todos los buses. El rango de este valor en el último nivel de agregación va entre -2,2 y 4 [nivel de adelantado/atraso].

La Figura 3.38 muestra el paso medio v/s el nivel de atraso (Dlate) medio de cada una de las observaciones a nivel tramo período. En ella se ilustran dos regresiones: una para los valores negativos y otra para los valores positivos. Se observa que las pendientes son muy distintas, lo que indica que el comportamiento de los conductores frente a situaciones de llegada atrasada o adelantada es muy diferente. En particular, la pendiente de los buses

Tabla 3.11: Criterio para definir el grado de atraso (Dlate)

Criterio [en segundos atrasados (sad)]	Dlate
$\text{late} \leq -200$	-3
$-200 \leq \text{late} < -100$	-2
$-100 \leq \text{late} < 0$	-1
$0 \leq \text{late} < 100$	1
$100 \leq \text{late} < 200$	2
$200 \leq \text{late} < 300$	3
$300 \leq \text{late}$	4

adelantados es mayor en módulo por el hecho de que los conductores tienen la indicación de esperar en paraderos en caso de ir adelantados a su horario de salida.

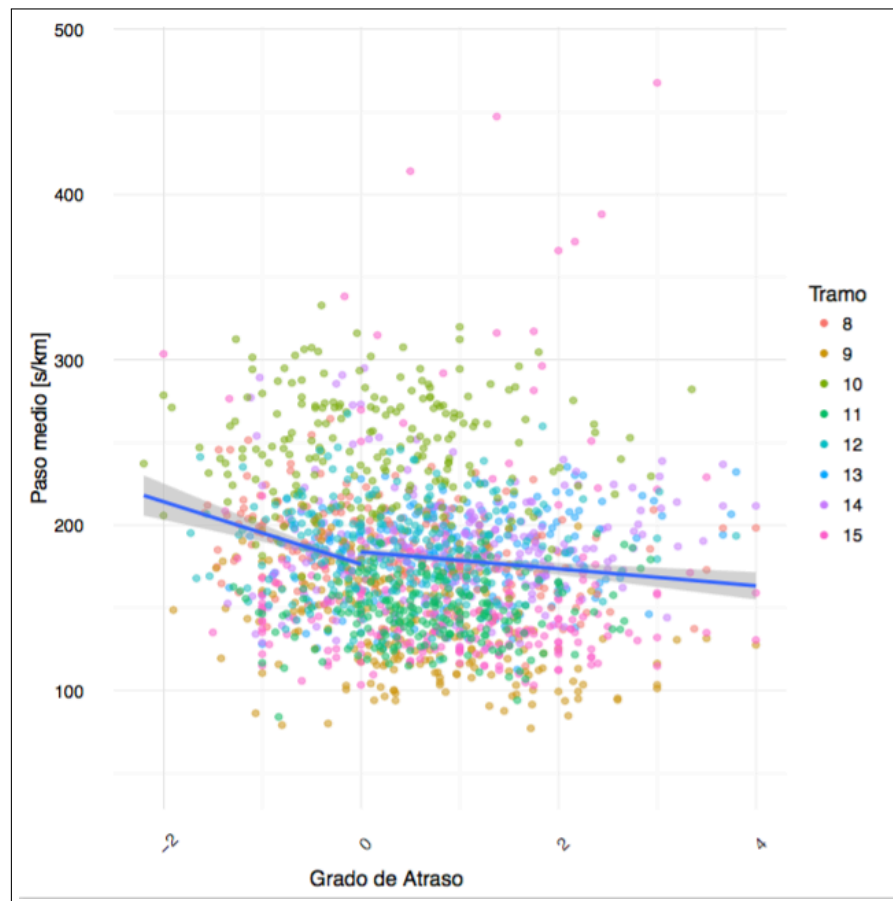


Figura 3.38: Paso medio v/s nivel de atraso, todas las observaciones (Powell).

A través del análisis hecho en este capítulo, es posible identificar las características principales de cada uno de los ejes. Además, se analizan conjuntamente todos los datos, agregándolos en distintos niveles y comparando frente a variables que en la literatura se reportan como explicativas.

Capítulo 4

Modelación

Sobre la base de de los antecedentes revisados, se propone modelar el paso medio en s/km separándolo en sus tres componentes básicas: tiempo de crucero, demora en paraderos y demora en intersecciones, tal como muestra la ecuación 4.1.

$$PM_{tpe} = TC_{tpe} + DP_{tpe} + DI_{tpe} \quad (4.1)$$

Dónde:

PM_{tpe} : paso medio de un bus en un tramo t, período p y tipo de servicio e.

TC_{tpe} : tiempo medio de crucero de un bus en un tramo t, período p y tipo de servicio e.

DP_{tpe} : demora media en paraderos de un bus en un tramo t, período p y tipo de servicio e.

DI_{tpe} : demora media en intersecciones de un bus en un tramo t, período p y tipo de servicio e.

La variable dependiente utilizada en el modelo es el paso medio de buses, ya presentada en el capítulo anterior. Las variables asociadas a las tres componentes explicativas se calcularán para que representen un valor acorde a la variable explicativa y sus parámetros sean de una fácil interpretación. En este capítulo se presenta en detalle la modelación de cada una de las componentes, analizando las variables dependientes y su forma final que se incorporará en el modelo.

4.1. Modelación del tiempo de crucero

El tiempo de crucero corresponde al tiempo que demora un bus en recorrer una sección mientras está en movimiento, excluyendo al tiempo perdido por aceleración o frenado asociado a detenciones en paraderos y/o intersecciones, el que forma parte de las respectivas demoras. Distintos son los factores que inciden en que sea mayor o menor, como el diseño geométrico de las vías, el flujo de vehículos en arcos, elementos mecánicos del vehículo y restricciones de norma, por ejemplo, la velocidad máxima permitida. Por consecuencia, no existe un valor

fijo para este, sino que puede ser explicado a partir de las condiciones particulares en las que circulan los buses.

Para definir variables de modelación hay que tener en cuenta distintas características de la circulación de los buses. En primer lugar, los buses tienen una restricción de norma que corresponde a la velocidad máxima permitida de 50 km/h (72 s/km). El efecto del flujo de vehículos incide según el tipo de prioridad, ya que este supone restringir, total o parcialmente, el ingreso de otros vehículos que no sean buses a las pistas. Si bien la relación flujo-velocidad por pista es aplicable en todos los tramos, sólo se dispone de esta información de manera más específica (aunque no total) en los corredores, donde el flujo existente es únicamente de los buses. Además, se trabaja con datos entre las 07:00 AM y las 21:00 PM, lo que implica que no se debiese esperar variaciones muy significativas de la velocidad de cruceo de los buses en un mismo tipo de vía, salvo donde hay interacción con flujos de autos (pistas sólo bus y tráfico mixto). Estos últimos pueden tener una disminución significativa de flujos de autos en períodos fuera de punta y de baja frecuencia de detenciones en paraderos, que combinados tendrán un efecto de disminución del tiempo de cruceo.

Por lo tanto, habrá variables mudas por tipo de vía que identifiquen el tiempo de cruceo medio de cada una y se incorporarán variables adicionales (con signo negativo esperado), en los tramo-períodos en que se identifiquen las condiciones de flujo vehicular y detenciones en paraderos antes mencionadas. De esta forma se percibirá la disminución del tiempo de cruceo en tramo-períodos específicos. Estas se determinarán en el proceso de estimación del modelo. El intercepto del modelo representará el tiempo de cruceo en los corredores y el resto de las variables mudas se sumarán a este valor. Esto se construye así, puesto que en teoría es el tiempo de cruceo más bajo y es el tipo de vía que tiene más observaciones.

Es razonable considerar una variable muda para el tráfico mixto. Sin embargo, existe una indeterminación de cuantas variables mudas agregar para las pistas sólo bus dado que existen varios perfiles de estas. Se tiene un tramo de 'dos pistas sólo bus', un tramo de 'una pista sólo bus y una pista para otros vehículos' y nueve tramos de 'una pista sólo bus y dos de autos'. Una forma de modelar estos tramos sería colocando una variable muda para cada perfil, pero esto podría no resultar apropiado por la escasez de tramos de 'dos pistas sólo bus' y 'una pista sólo bus y una para autos'. La otra opción es utilizar una única variable muda de tiempo de cruceo para todos los tramos con pista sólo bus, que represente el valor medio de estos. Se hará pruebas al respecto en el proceso de estimación.

Por último, considerar que los servicios expresos se caracterizan por detenerse en menos paraderos que los servicios normales. En algunos tramos ocurre que estos no se detienen en ningún paradero. Es posible que se identifiquen variaciones en el tiempo de cruceo debido a esto, que haga que los buses circulen más rápido, por lo tanto se contempla incorporar variables mudas por tramo-período-expreso. Estas se determinarán en el proceso de estimación del modelo.

En resumen, la ecuación 4.2 refleja la modelación completa del tiempo medio de cruceo, en donde las variables reflejan las distintas consideraciones descritas en esta sección.

$$TC_{tpe} = t_0 + t_2 * PSB_t + t_3 * TM_t + \sum_i t_i * D_{tp} + \sum_j t_j * D_{tp} * TS_e \quad (4.2)$$

Dónde:

TC_{tpe} : tiempo medio de cruce de bus en tramo t, período p y tipo de servicio e.

$CS1_t$: muda que vale 1 si tramo t es de corredor de 1 pista.

PSB_t : muda que vale 1 si tramo t es de pista sólo bus.

$flujo_{tp}$: flujo de buses (buses/h) en corredor de buses para tramo t y período p.

TM_t : muda que vale 1 si tramo t es de tráfico mixto.

D_{tp} : muda que vale 1 si corresponde a tramo t y período p.

TS_e : muda que vale 1 si tipo de servicio 'e' es expreso.

t_1 : Coeficiente a estimar en $\frac{s}{km} * [\frac{buses}{h}]$.

t_2, t_3, t_4, t_i, t_j : Coeficientes a estimar en s/km.

4.2. Modelación de demora en paraderos

La demora en paraderos se debe al tiempo por el hecho propio de detenerse y por la transferencia de pasajeros. La primera parte ocurre por tiempo empleado en acelerar y frenar (asociable a la velocidad de cruce) y al tiempo detenido en el paradero sin que haya transferencia de pasajeros (apertura y cierre de puertas, fiscalización, congestión en paraderos, etc). Por lo tanto, tiene que haber una diferenciación del tiempo perdido consistente con lo establecido para el tiempo de cruce.

Esto queda:

$$DP_{tp} = TPP_{tp} + TTP_{tp} \quad (4.3)$$

Donde:

DP_{tp} : demora media en paraderos de un bus en un tramo t, período p y tipo de servicio e (s/km)

TPP_{tp} : tiempo perdido por el hecho de detenerse en un tramo t, período p (s/km).

TTP_{tp} : tiempo detenido transfiriendo pasajeros en un tramo t, período p (s/km).

Un supuesto importante es que no existe congestión en paraderos. En caso de existir, debiese haber una componente específica que explicase este tiempo extra de los buses en los paraderos en donde probablemente hayan demandas muy elevadas. Con la información que se dispone, no es observable directamente. Sin embargo, la relación entre el paso medio y la demanda total tiende a ser bastante lineal con respecto a la demanda como se vio en el capítulo anterior. Por lo tanto, parece haber evidencia suficiente de que esto no ocurre. En el único caso que esto pudiese ocurrir es en el tramo 7 de Matta, en donde los niveles de demanda son muy elevados y sólo hay un paradero, lo que justifica no considerarlo para este trabajo.

Dado los antecedentes vistos, para la demora en paraderos por el hecho de detenerse (TPP) se utiliza la variable número medio de detenciones ($NMDP_{tp}$) en det/bus-km. Su coeficiente representa el tiempo empleado por aceleración/frenado y en abrir/cerrar puertas. Dada la relación que se establece con el tiempo de crucero, es que se separa el tiempo detenido en paraderos según muestra la ecuación 4.4.

$$TPP_{tp} = t_4 * NMDP_{CStp} + t_5 * NMDP_{SBtp} + t_6 * NMDP_{TMtp} \quad (4.4)$$

Donde:

TPP_{dtp} : tiempo perdido al detenerse para el tramo t, período p [s/km].

$NMDP_{CSt}$: número medio de detenciones en tramos de corredor segregado de 1 pista para tramo t, período p [det/bus-km].

$NMDP_{CSt}$: número medio de detenciones en tramos de pista sólo bus para tramo t, período p [det/bus-km].

$NMDP_{TMt}$: número medio de detenciones en tramos de tráfico mixto para tramo t, período p [det/bus-km].

t_4, t_5 y t_6 : Coeficientes a estimar en s/det.

Por otra parte, el tiempo de transferencia de pasajeros (TTP) se debe al número de subidas y bajadas por bus-km. Usualmente en la literatura se incluye una variable para subida y otra para bajada, con sus respectivos coeficientes. Al estar trabajando con medias y no disponer información detallada de subidas y bajadas por puertas, se decide considerar una sola variable de transferencia que es la suma de las subidas y bajadas del bus (MPT_{dtp}) en pax/bus-km, donde el coeficiente representa el tiempo medio por pasajero transferido en segundos. Además, como se observó en la sección 3.8, hay una baja de este tiempo de servicio para valores sobre 20 pax/bus-km, por lo que se agrega una variable extra para esos casos. No hay razones para esperar que pueda haber diferencia en esta componente por tipo de servicio. La ecuación 4.5 muestra la modelación del tiempo por transferencia de pasajeros.

$$TTP_{tpe} = t_7 * MPT_{tpe} + t_8 * D_{tpe} * (MPT_{tpe} - 20) \quad (4.5)$$

Donde:

TTP_{tp} : tiempo detenido transfiriendo pasajeros en un tramo t, período p (s/km).

D_{tp} : dummy que vale 1 si MPT_{dtp} es mayor que 20.

MPT_{tp} : número medio de subidas y bajadas para tramo t, período p (s/km).

t_7 y t_8 : Coeficientes a estimar en s/pax.

La expresión final que se utiliza para modelar, incluye demora por detención para cada tipo de prioridad y tiempo de transferencia para la demanda total por bus-km diferenciando los valores mayores a 20 pax/bus-km, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$DP_{tpe} = t_4 * NMDP_{CStp} + t_5 * NMDP_{SBtp} + t_6 * NMDP_{TMtp} + t_7 * MPT_{tpe} + t_8 * D_{tpe} * (MPT_{tpe} - 20)$$

(4.6)

En el caso de Portland sólo se dispone de tramos en tráfico mixto. Por lo tanto se utiliza un sólo parámetro por el hecho de detenerse.

Además, se debe considerar el efecto de los buses que pueden ir adelantados al horario que les corresponde. Es decir, tienden a estar detenidos un tiempo adicional sin transferencia de pasajeros para ajustarse a su horario. Dado esto, se consideran los efectos del nivel de adelantado medio de los buses que sería un adicional al tiempo perdido por detenciones (abrir/cerrar puertas y aceleración/frenado). También existe el uso de una rampa para sillas de ruedas que se activa mediante un botón por el conductor, el cual está reportado en los datos cuando y dónde ocurre esto. La literatura reporta que esta operación toma un tiempo considerable, por lo que se incluye una variable que calcula el número medio de uso de rampa por tramo. La ecuación 4.7 muestra la expresión final de esta.

$$TPP_{tp} = t_6 * NMDP_{TMdtp} + t_{adel} * NA_{tp} + t_{rampa} * NMR_{tp} \quad (4.7)$$

Donde:

NA_{tp} : Nivel de adelantado medio para el tramo t y período p [nivel-adel].

NMR_{tp} : Número medio de uso de rampa para el tramo t y período p [rampa/bus-km].

t_{adel} y t_{rampa} : Coeficientes a estimar.

4.3. Modelación de demora en intersecciones

La demora en intersecciones corresponde al tiempo empleado por los buses por el hecho de circular a través de intersecciones semaforizadas. Esta está definida en dos partes que se conocen como demora uniforme y demora excedente.

La demora uniforme corresponde a la demora que se produce por formación y disipación de una cola de vehículos en cada ciclo semafórico de la intersección. Esta depende del tiempo que dura el ciclo, grado de saturación de la vía, razón de duración de luz verde con respecto al ciclo y coordinación entre los semáforos adyacentes. Es necesario recalcar que toda intersección semaforizada tiene presencia de demora uniforme y esta puede variar considerablemente entre períodos y distintas intersecciones.

La demora excedente corresponde a la demora que se produce por colas que no alcanzan a disiparse en el período de verde de un ciclo. Puede ocurrir ocasionalmente por fluctuaciones aleatorias del flujo y/o la capacidad o bien por sobresaturación sistemática de la vía. Puede o no existir en una intersección determinada y que exista en una de ellas no implica que la haya en otra cercana.

Cuando hay demora excedente perceptible, ella es casi siempre mucho mayor que la uniforme. Esto suele ocurrir con grados de saturación mayores al 90 %. Por lo tanto, no es posible que exista en los corredores de buses, ya que el flujo de buses observado en los ejes generará

valores muy por debajo a este límite. Además, la demora uniforme existente tiende a ser mayor cuando hay presencia de demora excedente, con respecto a que no la haya en la misma intersección.

Una manera frecuentemente utilizada para modelar la demora en intersecciones es utilizar una única variable que represente la demora uniforme media por intersección y varias variables mudas que se agregan para captar las demoras excedente en períodos punta en ciertos tramos. (Gibson et al., 2015) demostró que este tipo de enfoque es insuficiente, ya que la demora uniforme es muy variable espacial y temporalmente, por lo que usar una sola variable para recoger su efecto es muy limitado.

Para realizar una modelación explícita de la demora uniforme con variables continuas es necesario disponer de información detallada de la programación de los semáforos. No se dispone de estos datos para este estudio; sin embargo, se conoce el número de intersecciones semaforizadas por tramo y los períodos de aplicación de los diversos planes de operación de las redes de semáforos existentes, incluyendo el tiempo de ciclo de cada uno de ellos. Con esta información y un análisis minucioso de los datos se genera una metodología para la modelación de la demora uniforme en intersecciones.

El punto de partida es especificar demoras uniformes base para cada uno de los tramos, que representan su valor medio típico por intersección para cada tramo. Esta variable es equivalente a la única considerada tradicionalmente como se explicó antes y su coeficiente se expresa en s/int. Para mejorar la modelación se agregan variables extra asociadas a ciertos fenómenos identificables y que se estima son influyentes en la variación temporal de la demora uniforme en un tramo.

La demora excedente no se puede modelar explícitamente pues depende principalmente del grado de saturación, que se desconoce por no haber datos de los flujos de autos. No obstante, es posible deducir de los datos cuándo y dónde es probable que exista. Se aplicará aquí el procedimiento empleado en (Gibson et al., 2015). Este se basa en asumir que cuando el paso medio en un tramo sobrepasa cierto umbral, el exceso corresponde a demora excedente. Los umbrales se definen según el tipo de vía y el nivel de demanda de pasajeros transferidos y su valor se afina en la etapa de estimación del modelo. La demora excedente se especifica como una variable muda asociada a cada tramo-período pertinente y se expresa en s/km. Dependiendo de los valores observados, puede haber una sola variable para todo el período con demora excedente o más de una si se aprecia que hay variaciones importantes dentro del período.

En la Tabla 4.1 se identifican los tramo-períodos con presunta demora excedente para Santiago y Portland. Estas variables toman el valor 1 en los tramo-períodos pertinentes y 0 en otro caso. Su coeficiente representa la demora excedente estimada en s/km.

Se incluirá tres tipos de demoras uniformes extra, adicionales a la base. El primero está asociado a la existencia de demora excedente. Cuando la hay, obviamente debe haber también una demora uniforme mayor que la promedio (base). Se especifica entonces una demora uniforme extra para el período pertinente, que tendrá al menos la duración del período con demora excedente aunque normalmente ella será mayor para dar cuenta de las etapas inicial y final de evolución de la cola excedente. Esto también se afina en el proceso de estimación del

Tabla 4.1: Lista de tramo - período para los distintos ejes con posible demora excedente

Eje	Tramo	Periodo
Macul	3	7:30 - 8:00
Macul	3	8:00 - 8:30
Macul	5	7:30 - 8:00
Macul	5	8:00 - 8:30
Macul	7	7:30 - 8:00
Macul	7	8:00 - 9:00
Matta	8	18:00 - 18:30
Matta	8	18:30 - 19:00
Matta	8	19:00 -19:30
Matta	9	7:30 - 8:00
Matta	9	8:00 - 8:30
Matta	9	8:30 - 9:00
Matta	9	17:00 - 18:00
Matta	9	18:00 - 18:30
Matta	9	18:30 - 19:00
Matta	9	19:00 - 19:30
Gresham	8	15:20 - 15:40
Gresham	8	17:00 - 17:20
Gresham	10	7:40 - 8:00
Gresham	10	11:00 - 13:00
Gresham	10	13:20 - 14:00
Gresham	10	15:20 - 16:00
Gresham	10	16:40 - 17:00
Gresham	10	17:00 - 17:20
Gresham	12	7:40 - 8:00
Gresham	12	8:00 -8:20
Gresham	14	7:20 - 7:40
Gresham	14	7:40 - 8:00
Gresham	14	8:20 - 8:40
Gresham	15	7:00 - 7:20
Gresham	15	7:20 - 7:40
Gresham	15	7:40 - 8:00
Gresham	15	8:00 -8:20
Gresham	15	8:20 - 8:40

modelo. Por ejemplo, si el tramo t tiene una demora uniforme base de 10 s/int y se observa demora excedente entre 07:30 y 08:00, entonces habrá una demora uniforme extra entre, por ejemplo, 07:00 y 08:30 que debe ser de signo positivo.

El segundo tipo de variables se asocia al hecho de que los servicios expresos deben tener menores demoras uniformes que los normales en los tramos en que tienen asignados menos paraderos. Este no es un fenómeno que ocurra en todos los tramos, ya que el ahorro de tiempo viene dado por el mayor aprovechamiento de la coordinación entre semáforos al detenerse en

menos paraderos. Para modelar esto, se agregan variables específicas de demora uniforme extra para los buses expreso en ciertos tramo-períodos, que se suman a las variables base y extras existentes para esos tramo-períodos. El coeficiente de la variable debe ser de signo negativo, pero la suma resultante de los coeficientes de demora uniforme debe ser mayor a 0.

El último tipo de variable de demora uniforme extra que se considera corresponde a períodos en que la programación de los semáforos produce condiciones particularmente favorables o desfavorables para un tramo determinado. Esto suele ocurrir para uno de los sentidos en vías de doble sentido de tráfico, principalmente cuando la coordinación privilegia a uno de ellos. La existencia de esta condición puede detectarse durante el proceso de estimación al comparar valores estimados y observados del paso medio para cada tramo, ya incluidas las demás variables de demora uniforme. Si se encuentra sobre o subestimación sistemática durante un período que aproximadamente coincide con el de aplicación de un cierto plan, es razonable suponer que se debe al fenómeno descrito. Entonces se especifica una demora uniforme extra para ese tramo-período, cuyo signo podrá ser positivo o negativo. Todas las variables de demora uniforme extra se especifican como variables mudas asociadas al tramo-período pertinente y a la respectiva densidad de intersecciones semaforizadas. Sus coeficientes tienen como unidad s/int.

La ecuación 4.8 muestra los términos con los que se modela la demora uniforme.

$$DU_{tp} = (t_{11t} + \sum_p t_{11tp}D_{tp} + \sum_p t_{11tpe}D_{tpe}) * NMI_t \quad (4.8)$$

Donde:

DU_t : demora media uniforme por intersección semaforizada de un bus en tramo t.

t_{11t} : tiempo medio base por intersección semaforizada para tramo t (s/int).

t_{11tp} : tiempo medio extra por intersección semaforizada para tramo t en períodos p (s/int).

D_{tp} : dummy de valor 1 para tramo t y períodos p y 0 si no.

t_{11tpe} : tiempo medio extra por intersección semaforizada para tramo t en períodos p y servicio expreso (s/int).

D_{tpe} : dummy de valor 1 para servicios expresos en tramo t y períodos p y 0 si no.

NMI_t : número medio de intersecciones semaforizadas por tramo t.

Luego, la formulación para la demora total en intersecciones es considerando las distintas demoras uniforme con las demoras excedentes, tal como se muestra a continuación:

$$DI_{tpe} = (t_{11t} + \sum_p t_{11tp}D_{tp} + \sum_p t_{11tpe}D_{tpe}) * NMI_t + t_{e_{tp}} * DE_{tp}$$

Donde:

t_{11t} : tiempo medio base por intersección semaforizada para tramo t (s/int).

t_{11tp} : tiempo medio extra por intersección semaforizada para tramo t en períodos p (s/int).

NMI_t : número medio de intersecciones semaforizadas por tramo.

DE_{tp} : muda que vale 1 para tramo t en períodos p.

te_{tp} : demora excedente promedio en periodos p para tramo t (s/int).

Esta estrategia para modelar permite introducir variabilidad en la demora uniforme sobre bases sólidas, aunque se desconozca la programación detallada de los semáforos. Sin embargo, al usar este método basado en variables mudas tanto para el tiempo de cruce como para las demoras uniformes, existe el potencial que se interprete el ahorro de tiempo tanto de uno como del otro. Es decir, que se esté asignando una parte de ahorro en tiempo de cruce a la demora uniforme o viceversa. A través del análisis de resultados es posible corregir esto.

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los modelos estimados, junto con una descripción y análisis de sus resultados. Esta se dividió en dos pasos: realizar modelos para cada tipo de infraestructura para luego realizar un modelo general incluyendo todas las observaciones. Esto se hace así para comprender el fenómeno por tipo de infraestructura y así asegurar consistencia y robustez para el modelo general.

Los modelos de regresión lineal múltiple tienen distintos estadísticos que permiten validar sus resultados. Los más importantes son el coeficiente de determinación del modelo (R^2) y los estadísticos t-student para las variables. Se espera que el (R^2) sea lo más cercano a 1 que indica el nivel de ajuste o explicación de la varianza de los datos y que los valores t-student sean de al menos 1,96 para ser estadísticamente significativos.

Las estimaciones se realizan mediante códigos programados en R a través de la plataforma RStudio Team (2015).

5.1. Proceso de estimación para Santiago

5.1.1. Generalidades

Como se explicó en el capítulo anterior, se definen variables para las tres componentes principales del paso medio: tiempo de cruce, demora en paraderos y demora en intersecciones. El proceso para la estimación del modelo final fue de detallada interpretación de modelos preliminares, pasando por distintas fases, desde detección de outliers, interpretación y generación de variables extras según los resultados que se iban obteniendo.

El proceso tuvo una primera parte que fue estimar modelos por tipo de prioridad y luego estos fueron unidos en un modelo único. En cada uno de estos modelos, el intercepto corresponde al tiempo de cruce del tipo de prioridad analizado.

Con respecto a las demoras uniformes bases, estas fueron separadas por tramos. Sin em-

bargo, para evitar la colinealidad de estas, es necesario juntar la demora uniforme base de al menos dos tramos. Sino, sería agregar una constante para cada tramo, generando la indeterminación de una de estas. Como consecuencia, uno de los tramos tendría demora uniforme base nula, lo cual no es coherente con la realidad. Para esto, se observan los pasos medios, nivel de demanda y frecuencia de detenciones en los tramos y a partir de las similitudes de estos se decide un criterio para juntar tramos en una demora uniforme base.

Se identifican los tramo-períodos en los cuales existe demora excedente y se agregan las variables mudas correspondientes, junto con una demora uniforme extra en dichos períodos. Dado que las variables de demora excedente son variables mudas y las de demora uniforme extra son mudas multiplicadas por una constante (densidad de intersecciones semaforizadas), esta última variable no puede ser sólo en los mismos períodos, sino que debe incluir al menos uno más. Esto por el mismo problema de colinealidad ya mencionado.

Luego viene la identificación de aquellos períodos en donde se justifica una demora uniforme extra por cambio de flujos y cambios en la coordinación. Para esto se grafican la diferencia entre valores observados y estimados por cada tramo durante el día con los resultados preliminares. Dado un tramo, se identifican períodos continuos en donde se sobreestima o subestima el valor observado. Esto permite identificar dichos períodos y observar qué ocurre con los coeficientes de las variables de demanda de pasajeros, frecuencia de detenciones y , por otro lado, analizar los ciclos promedio de las intersecciones semaforizadas en dichos períodos. Viendo tales parámetros se generan de manera precisa las variables de demora uniforme extras. Se evita además, incluir uno o más períodos que no correspondan a cambios en la demora uniforme.

En ciertos períodos fuera de punta se identifican casos en donde se sobreestima el paso medio. En primera instancia se procede a incorporar una variable de demora uniforme extra que será de signo negativo para dichos períodos, pero en ciertos casos la demora uniforme resultante resulta muy baja o negativo, siendo poco creíble. Dado que son períodos puntas, se prueba la hipótesis de que fuesen disminuciones en el tiempo de cruce, por lo que se agrega una variable muda para dicho período, cuyo coeficiente se interpretará en s/km para el tiempo de cruce. Se observa que el valor resultante tenga sentido con los rangos de valores esperados para el tiempo de cruce e dicho tramo.

Dentro de este proceso, se identifican también las demoras uniformes para los servicios expresos. Como hay observaciones separadas entre servicios normales y expresos, se grafica la comparación entre observados y estimados para ambos tipos. Una vez identificado los valores de demora uniforme extra antes mencionados, se identifican las demoras uniformes extras para expresos en tramos y períodos donde se sobreestima su valor. Esto trae como consecuencia una serie de demoras uniforme extra, pero también este efecto pudo ser recogido en la demora uniforme base en el tramo 3 del corredor Grecia. En este tramo los servicios expresos no tienen detenciones.

La manera iterativa de ir formulando los modelos implica estimar un modelo, chequear el signo, valor y significancia de las variables. Tomar detalles de la coherencia de los valores obtenidos y observar los valores de los pasos medios observados v/s estimados. Para ir determinando el nivel de precisión de estos modelos es muy importante revisar los valores obtenidos para los tiempos de cruce y compararlos con la evidencia reportada en la literatura.

Lo mismo ocurre con los coeficientes por el hecho de detenerse y de servicio por pasajero.

Una vez determinadas todas las variables, se procede a juntar algunas variables como las demoras uniforme base de varios tramos, demoras excedentes y demoras uniforme extras con valores muy similares y que correspondan a un mismo tramo. Se chequea que este proceso no afecte la consistencia encontrada en las otras variables.

Otro detalle que destacó de este proceso de revisión gráfica y numérica de los valores observados y estimados por modelos preliminares fue la detección de incidentes. Estos se comparaban para cada tramo, período y día. De este modo se logró determinar días que mostraban un valor atípico, no detectado por el método usado en las primeras etapas. De todas formas, el número detectado es bastante bajo: un total de 20 observaciones, siendo 15 de Carmen y 5 de Matta- Grecia.

5.1.2. Modelos por tipo de prioridad

Como se mencionó anteriormente, se procede a estimar modelos por tipo de prioridad, partiendo por el corredor de buses. Este no tiene demoras excedentes y los cambios de ciclo debiesen ser una buena aproximación de cuando las demoras medias en intersecciones. Por lo tanto, se definen las variables de demora uniforme base por tramo y se agregan las variables de demora uniforme extra a partir de la comparación entre observados y estimados. En este caso, toda variable de demora uniforme extra agrupará el conjunto de períodos continuos con parecidos ciclos promedio.

Cabe destacar que se probó el flujo de buses en bus/h como variable explicativa del tiempo de crucero. Esta resultó del signo esperado, pero no estadísticamente significativa. Para la demora en paraderos se agrega una variable por el hecho de detenerse y otra por tiempo de servicio. Dado que en el análisis de datos se verificó que existe un comportamiento distinto en la demanda por sobre los 20 pax/bus-km, se agrega una variable extra de tiempo de servicio para los valores mayores a este umbral.

Los resultados de este modelo son bastante coherentes y se pueden observar en el A.1.

En el caso del modelo con tramos de pista sólo bus aparece una indeterminación relevante para definir las variables de tiempo de crucero y de demora uniforme base. Esta disyuntiva surge del hecho que se dispone de tramos con '1 pista sólo bus - 2 autos', con '1 pista sólo bus - 1 autos' y con 'dos pistas sólo bus'; además, hay varios tramos para el primer caso pero solo uno para los dos últimos. Una interrogante es si considerar distintos tiempos de crucero base para cada caso y la otra es cómo diferenciar tiempo de crucero base de demora uniforme base en los casos en que hay un solo tramo. Se decidió que el mejor procedimiento era incluir primero una sola variable de tiempo de crucero base, lo que evita tener problemas de indefinición con la demora uniforme base de tramos determinados. Una vez estimado el modelo para pistas sólo bus con esa definición, se practicarán pruebas para introducir diferenciación en el tiempo de crucero base en el modelo general.

Las variables de demora uniforme base se determinaron procediendo de la manera descrita

anteriormente. En este caso se incorporan variables de demora excedente en los tramos y períodos que existía presunción de su existencia. Observando también el comportamiento del paso medio, se agregan las variables de demora uniforme extra que deben ir asociadas a las demoras excedentes. Teniendo los resultados de estos modelos preliminares, es posible determinar si efectivamente están bien definidas las variables, efectuando modificaciones de períodos en algunos de los casos.

Posterior a esto, se definen las demás variables de demora uniforme extra, observando en períodos de los distintos tramos donde existe sobre o subestimación sistemática. También se probaron distintos supuestos sobre los servicios expresos, encontrando que sólo es significativa una demora uniforme base extra en el tramo de dos pista sólo bus.

En cuanto a la demora en paraderos, se utiliza sólo una variable por el hecho de detenerse, ya que se utiliza sólo un término para el tiempo de crucero y para la demanda no se utiliza el término con demanda mayor a 20 pax/bus-km, ya que hay sólo 3 observaciones que superan dicho límite.

Los resultados de este modelo se pueden observar en la Tabla A.2. Se observa que el tiempo de crucero base tiene un valor razonable, acorde con el coeficiente por el hecho de detenerse, y es también razonable el coeficiente estimado de la demanda de transferencia.

Por último, se estimó un modelo para los tramos de tráfico mixto que eran sólo dos. Esto último indica que sólo se puede tener una variable de demora uniforme base para ambos y luego ir agregando demoras excedentes y demoras uniformes extras. Se identificaron las demoras excedentes correspondientes y las variables de demora uniforme extra asociadas a estas.

A través de la comparación entre observados y estimados, fue posible identificar otros períodos en donde existe demora uniforme extra para cada uno de los tramos. Los valores del intercepto fueron comparados con los recogidos por la literatura, el coeficiente por el hecho de detenerse fue comparado con el de tiempo de crucero y el de la demanda con los vistos en ejes anteriores y lo reportado en la literatura. Con respecto a la demanda, en estos dos tramos no se encuentran valores sobre 20 pax/bus-km, por lo que no se modela este fenómeno.

Los tres modelos por tipo de vía se encuentran en un rango de ajuste aceptable, aunque para el corredor es menor. Esto puede deberse a que en pista sólo bus hay menos observaciones de expresos, que son las que tienen mayor varianzas, por ser sólo un servicio en los períodos que operan y, por lo tanto, el paso medio está calculado con menos observaciones. De todas formas, los resultados dan un claro indicio de que se pueden modelar estas observaciones en conjunto.

5.1.3. Modelo general

Luego de haber realizado la estimación de modelos para los distintos tipos de prioridad de vía, se procede a estimar con todas las observaciones un modelo único para los tres ejes. Dado que el intercepto tiene una interpretación distinta en cada uno de los modelos anteriores, en

este caso se decide asignarlo como el tiempo de cruce base en el corredor y agregar variables mudas tanto para pistas sólo bus como tráfico mixto. . De esta forma, se pueden calcular los tiempos de cruce para las distintas prioridades sumándole su respectiva variable muda al valor del intercepto. Por consecuencia de esto, la variable asociada a las detenciones se diferencia para el tráfico mixto, pistas sólo bus y corredor, por la relación entre el tiempo perdido por detención y la velocidad de cruce.

Se utilizan en primera instancia exactamente las mismas variables que se incluyeron en las etapas anteriores. Debido al gran número de variables es que hubo un proceso de simplificación, que consistió en unir variables con características similares, de unidades idénticas y un valor muy similar en el coeficiente que acompaña a las variables. Luego de estos ajustes y otras redefiniciones menores por significancia estadística, se procede a probar la diferenciación de tiempos de cruce base y tiempos perdidos por detención en vías con pistas solo bus.

Por último, distintas hipótesis existían por corroborar para los servicios expresos. Se observa efectivamente un menor paso medio con respecto a los buses normales bajo las mismas condiciones. Esto se debe principalmente al menor número de detenciones en paraderos lo que puede generar beneficios extras en el paso medio por el hecho de aprovechar mejor la coordinación de semáforos y también, en casos muy particulares, tener un menor tiempo de cruce. Esto se probó con distintas variables y se concluyó que existe un ahorro en el corredor y en dos pistas sólo bus tanto de tiempo de cruce como de demora en intersecciones en ciertos casos, en donde se incorporan variables extras asociadas sólo a los expresos.

Así, el modelo general quedó con un total de 82 variables. De ellas, 9 están relacionadas con el tiempo de cruce, 5 con la demora en paraderos y 68 con la demora en intersecciones. Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 5.1. Todos los coeficientes tienen el signo correcto y son estadísticamente significativos con niveles de confianza 95 % o superiores y el valor de R^2 ajustado (0,85) es satisfactorio considerando la necesaria pérdida de varianza explicada que produce la modelación de demora en intersecciones sin datos de programación de los semáforos.

Para apreciar la calidad del ajuste logrado, en la Tabla 5.2 se presentan los valores del paso medio observado y predicho y su diferencia para cada tramo en períodos agregados y para todo el período considerado. Es posible notar que para algunos tramo-períodos se sobreestima y para otros se subestima, pero que no hay tramos ni períodos sistemáticamente sub o sobre estimados. La gran mayoría de las observaciones (95 %) muestran un error menor al 5 %, lo cual es prueba de la precisión de este modelo. Hay balance entre tipos de vía, ejes y períodos.

Por la forma como se decidió modelar la demora en intersecciones, resulta relevante que tanto el tiempo de cruce como la demora en paraderos estuviese bien modelado y fuese consistente con la evidencia recogida en la literatura. Esto porque al descomponer el tiempo en sus tres componentes básicas y saber que dos de ellas están bien calculadas, entonces la tercera quedará bien explicada en términos de aporte a la variable explicada.

Como se explicó anteriormente, el método de modelación empleado conduce a ciertas indefiniciones entre algunas variables de tiempo de cruce y de demora uniforme en intersecciones

Tabla 5.1: Modelo estimado

Sección	Variables	Unidades	Coficiente	Error std.	t	Sig	
Tiempo de cruceo	Corredor 1 pista (<i>Intercepto</i>)	s/km	96,36	4,9	19,4	***	
	Sólo bus	s/km	16,53	6,3	2,6	**	
	Extra solo bus-Macul Tramo 1 [11:00-14:00 y 17:00-21:00]	s/km	-14,54	2,6	-5,6	***	
	Extra solo bus-Macul Tramo 2 [19:00-21:00]	s/km	-11,39	4,0	-2,8	**	
	Extra solo bus-Carmen Tramo 2 [19:00-21:00]	s/km	-11,95	3,2	-3,8	***	
	Extra sólo bus-Carmen Tramo 4 [10:30-15:30]	s/km	-15,44	3,0	-5,2	***	
	Tráfico mixto	s/km	41,41	12,0	3,5	***	
	Extra tráfico mixto-Macul Tramo 6 [14:00-15:30]	s/km	-13,27	5,9	-2,2	*	
	Extra tráfico mixto-Matta Tramo 9 [10:00-11:30]	s/km	-18,43	4,8	-3,8	***	
	Demora en intersecciones Corredor 1 pista	Carmen-Demora uniforme base Tramo 6	s/int	5,25	1,2	4,2	***
Carmen-Demora uniforme base Tramos 5 y 7		s/int	6,80	1,7	4,0	***	
Carmen-Demora uniforme extra Expreso Tramo 5 [17:30-21:00]		s/int	-4,82	1,7	-2,8	**	
Carmen-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00-10:00]		s/int	10,06	0,8	12,2	***	
Carmen-Demora uniforme extra Tramo 6 [10:00-13:30 y 17:30-20:00]		s/int	3,75	0,8	4,9	***	
Carmen-Demora uniforme extra Expreso Tramo 6 [17:30-20:00]		s/int	-5,62	1,2	-4,8	***	
Carmen-Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00-9:00]		s/int	-5,76	1,1	-5,1	***	
Carmen-Demora uniforme extra Tramo 7 [15:00-17:00]		s/int	3,46	1,3	2,7	**	
Grecia-Demora uniforme base Tramo 1 y 2		s/int	10,56	1,4	7,7	***	
Grecia-Demora uniforme base Tramo 3		s/int	6,83	1,5	4,6	***	
Grecia-Demora uniforme base Tramo 3 Expreso		s/int	-6,97	0,9	-7,9	***	
Grecia-Demora uniforme base Tramo 4		s/int	12,55	2,1	5,9	***	
Grecia-Demora uniforme base Tramo 5 y 6		s/int	5,87	1,6	3,7	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 1 [11:00-14:30]		s/int	-3,80	1,0	-3,8	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00-21:00]		s/int	5,56	0,8	7,3	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00-9:00]		s/int	2,09	1,0	2,0	*	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 3 [17:00-21:00]		s/int	9,19	0,8	11,5	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 [7:00-9:30]		s/int	10,15	1,6	6,3	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 Expreso [7:00-9:30]		s/int	-6,71	1,9	-3,5	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 [9:30-17:00]		s/int	8,66	1,1	7,6	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00-9:30]		s/int	4,41	1,0	4,3	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 5 [9:30-17:00]		s/int	12,38	0,9	14,3	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00-9:30]		s/int	12,73	1,2	10,8	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 Expreso [7:00-9:30]		s/int	-8,28	1,5	-5,4	***	
Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 [17:00-21:00]		s/int	5,82	0,8	7,5	***	
Demora en intersecciones Pistas sólo bus		Macul-Demora uniforme base Tramo 1 y 3	s/int	2,46	1,2	2,1	*
		Macul-Demora uniforme base Tramo 2 y 5	s/int	9,61	1,0	9,7	***
		Macul-Demora uniforme base Tramo 7	s/int	12,48	0,8	16,0	***
		Macul-Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00-12:00]	s/int	2,32	1,0	2,3	*
		Macul-Demora uniforme extra Tramo 3 [7:00-8:30]	s/int	10,70	2,4	4,4	***
	Macul-Demora excedente Tramo 3 [7:30-8:00]	s/km	86,37	10,6	8,1	***	
	Macul-Demora excedente Tramo 3 [8:00-8:30]	s/km	27,38	11,3	2,4	*	
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 3 [9:30-12:00 y 12:00-17:00]	s/int	3,22	0,8	4,2	***	
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00-10:00]	s/int	7,19	0,9	7,6	***	
	Macul-Demora excedente Tramo 5 [7:30-8:00]	s/km	62,66	8,4	7,5	***	
	Macul-Demora excedente Tramo 5 [8:00-8:30]	s/km	29,96	8,4	3,6	***	
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00-10:00]	s/int	2,28	0,9	2,5	*	
	Macul-Demora excedente Tramo 7 [7:30-8:00]	s/km	123,27	8,7	14,2	***	
	Macul-Demora excedente Tramo 7 [8:00-9:00]	s/km	74,91	7,3	10,2	***	
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 7 [10:00-12:30 y 20:00-21:00]	s/int	-3,10	0,7	-4,8	***	
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 1 y 2	s/int	11,82	0,9	12,6	***	
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 3	s/int	3,35	0,9	3,9	***	
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 4	s/int	6,47	1,4	4,6	***	
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00-21:00]	s/int	-2,35	0,5	-4,4	***	
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 2 [14:00-17:00]	s/int	4,33	1,3	3,4	***	
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 3 [17:30-20:00]	s/int	7,90	0,7	12,0	***	
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 4 [18:00-20:00]	s/int	11,71	1,1	10,8	***	
	Matta-Demora uniforme base Tramo 8	s/int	8,38	1,0	8,4	***	
	Matta-Demora uniforme base Tramo 8 Expreso	s/int	-7,30	0,8	-9,6	***	
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [7:30-8:30]	s/int	4,50	1,0	4,6	***	
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [12:00-17:00]	s/int	6,54	0,7	8,7	***	
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [17:00-20:00]	s/int	9,93	1,0	10,4	***	
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [18:00-18:30]	s/km	17,87	7,1	2,5	*	
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [18:30-19:00]	s/km	42,72	7,1	6,0	***	
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [19:00 -19:30]	s/km	23,40	7,1	3,3	***	

(continúa)

que no es posible resolver en el proceso de estimación del modelo. Sin embargo, a la luz de los resultados obtenidos es posible analizar la plausibilidad de que los tiempos estimados en esos casos correspondan total o parcialmente a uno u otro tipo de variable. El sentido de este análisis es asignar con mayor precisión el tiempo a cada componente del paso medio.

Tabla 5.1 (continuación)

Sección	Variables	Unidades	Coficiente	Error std.	t	Sig
Demora en intersecciones Tráfico mixto	Demora uniforme base Macul Tramo 6 y Matta Tramo 9	s/int	5,11	2,3	2,3	*
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:30-8:30]	s/int	7,62	1,9	4,1	***
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 6 [17:00-19:00]	s/int	5,42	1,4	4,0	***
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 9 [7:30-10:00]	s/int	4,40	0,9	4,7	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [7:30-8:00]	s/km	52,45	6,5	8,1	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [8:00-8:30]	s/km	210,14	6,5	32,3	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [8:30-9:00]	s/km	44,61	7,8	5,7	***
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 9 [16:30-19:30]	s/int	8,40	1,9	4,5	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [17:00-18:00]	s/km	55,19	10,3	5,4	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [18:00-18:30]	s/km	128,73	10,3	12,5	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [18:30-19:00]	s/km	204,09	10,9	18,8	***
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [19:00-19:30]	s/km	179,15	10,3	17,3	***
Matta-Demora uniforme extra Tramo 9 [19:30-20:30]	s/int	4,82	1,1	4,5	***	
Demora en paraderos	Detenciones tráfico mixto	s/det	12,71	2,1	6,1	***
	Detenciones pistas sólo bus	s/det	13,61	1,1	12,7	***
	Detenciones corredor 1 pista	s/det	15,20	1,2	13,2	***
	Tiempo de servicio base	s/pax	1,447	0,1	10,9	***
	Extra tiempo de servicio [>20 pax/bus-km]	s/pax	-0,91	0,2	-3,8	***
Nº observaciones = 3.600						Adj R ² = 0,85
Significancia: ***: 0,001 , **: 0,01, *: 0,05						Error medio = 16,77 s/km

Tabla 5.2: Resumen agregado de valores estimados v/s observados para cada tramo y bloque de períodos

	7:00-10:00			10:00-14:00			14:00-17:00			17:00-19:00			19:00-21:00			Prom. Totales			
	Obs.	Est.	Dif	Obs.	Est.	Dif	Obs.	Est.	Dif	Obs.	Est.	Dif	Obs.	Est.	Dif	Obs.	Est.	Dif	
Carmen																			
1	197,1	192,5	-2,4%	192,6	194,2	0,8%	192,7	201,6	4,6%	192,4	190,6	-0,9%	183,4	185	0,9%	191,6	192,8	0,6%	
2	168,6	174,4	3,5%	178,1	175,3	-1,5%	199,2	199,2	0,0%	199,9	190,9	-4,5%	177,7	177,7	0,0%	184,7	183,5	-0,5%	
3	145,7	148,8	2,1%	150,7	151,9	0,8%	166,9	161,6	-3,2%	198,6	191,6	-3,5%	169	174,9	3,5%	166,2	165,8	0,0%	
4	129,1	135,9	5,3%	124,1	124,2	0,1%	135,5	134,8	-0,5%	163,7	161,1	-1,6%	162	156,1	-3,6%	142,9	142,4	-0,1%	
5	118,4	129,4	9,3%	138,3	130,6	-5,6%	139,7	137	-2,0%	144,1	145,1	0,7%	142	143,4	1,0%	136,5	137,1	0,7%	
6	170,2	170,2	0,0%	143,5	141	-1,7%	134,9	134,6	-0,2%	150,8	148,4	-1,5%	135,6	140,5	3,7%	147	147	0,0%	
7	119,4	122,4	2,5%	138,8	134,3	-3,3%	150,7	146,7	-2,7%	144,2	146,6	1,6%	145,5	145,2	-0,3%	139,7	139	-0,4%	
Macul																			
1	138,6	144,7	4,4%	127	129,9	2,3%	134,8	138,2	2,5%	129,1	127,4	-1,4%	125,9	128,4	1,9%	131,1	133,7	2,0%	
2	187	185,2	-1,0%	171,7	172,8	0,6%	161,7	164,9	2,0%	166,9	171,3	2,7%	159,9	159,9	0,0%	169,4	170,8	0,9%	
3	212,5	207,9	-2,1%	168,5	166,8	-1,0%	158,7	160,8	1,3%	168,1	154,9	-7,8%	154,9	152,6	-1,5%	172,5	168,6	-2,2%	
5	267,7	267,7	0,0%	205,6	205	-0,3%	192,6	197,1	2,3%	205,2	196,5	-4,2%	194	191,6	-1,2%	213	211,6	-0,7%	
6	207,7	210,6	1,4%	194,7	190,4	-2,2%	178,1	180,6	1,4%	211,2	211,2	0,0%	185	185	0,0%	195,3	195,6	0,1%	
7	277,4	277,4	0,0%	205,4	206,1	0,3%	212,1	213	0,4%	218,4	218,3	0,0%	205	202,2	-1,4%	223,7	223,4	-0,1%	
Matta Grecia																			
1	182,8	174,7	-4,4%	158,7	156,6	-1,4%	152,4	157	3,0%	174,8	175,4	0,3%	169,2	168,7	-0,3%	167,6	166,5	-0,6%	
2	192,6	197	2,3%	178,2	180,3	1,2%	172,8	174,3	0,9%	174,4	175,7	0,8%	168,8	167	-1,1%	177,3	178,9	0,8%	
3	120,7	118,5	-1,8%	129	131,6	2,0%	131	131,5	0,4%	146,2	147,5	0,9%	145,5	144,2	-0,9%	134,5	134,7	0,1%	
4	185,3	188,8	1,9%	197,6	194	-1,8%	196,4	194,3	-1,1%	173,9	178,7	2,8%	171,2	166,7	-2,6%	184,9	184,5	-0,2%	
5	154,1	155,3	0,8%	169,1	169,5	0,2%	173,4	170,5	-1,7%	139,2	137,3	-1,4%	130,5	133,2	2,1%	153,3	153,2	0,0%	
6	153	155,3	1,5%	134,6	134,1	-0,4%	139,4	134,9	-3,2%	154,8	154,7	-0,1%	147,9	148,1	0,1%	146	145,4	-0,4%	
8	185,4	186,5	0,6%	216	214,9	-0,5%	232,2	231,9	-0,1%	252,1	250,9	-0,5%	201,3	201,8	0,3%	217,4	217,2	-0,1%	
9	237,6	243,1	2,3%	182,1	174,7	-4,1%	198,5	187,9	-5,3%	339,7	339,7	0,0%	232,7	241,3	3,7%	238,1	237,4	-0,7%	

En concreto, se encontraron cinco casos de indefinición potencialmente relevante. Todos ellos se tratan de variables especificadas como demora uniforme (extra en 4 casos y base en uno) que podrían también corresponder a tiempo de crucero y conciernen, salvo una excepción, a servicios expresos. Comparando lo que sucede en los tramo-períodos pertinentes con otros análogos en cuanto a la distribución de ambas clases de tiempo, se pudo concluir que había fundamentos para hacer una asignación parcial a cada clase. Solo en un caso fue posible generar un procedimiento sólido para cuantificar tales asignaciones. En los otros, se decidió repartir el tiempo asociado en partes iguales para el tiempo de crucero y la demora uniforme. De esta forma se agregan 5 nuevas variables como extras para el tiempo de crucero. Cuando aplica la distribución por mitades, sus coeficientes se obtienen multiplicando la mitad del coeficiente de la demora uniforme respectiva por la densidad de intersecciones correspondiente. A su vez, los coeficientes de las variables de demora uniforme pertinentes se reducen a la mitad.

Este modelo, complementado con un análisis post-estimación, es el que refleja los resultados finales para la ciudad de Santiago. En la Tabla 5.3 se observan sus variables y coeficientes finales. Se aprecia que ahora hay cinco variables extras adicionales en el tiempo de cruce, cuatro de ellas para corredores y una para pistas sólo bus. Estos cambios en nada modifican el paso medio total estimado de los tramo-períodos involucrados, de modo que la comparación mostrada en la Tabla 5.2 conserva validez.

Tabla 5.3: Modelo complementado

Sección	VARIABLES	Unidades	Coefficiente
Tiempo de cruce	Corredor 1 pista (<i>Intercepto</i>)	s/km	96,36
	Extra tiempo de cruce expreso Carmen-Tramo 5 [17:30-21:00]	s/km	-5,06
	Extra tiempo de cruce expreso-Carmen Tramo 6 [17:30-20:00]	s/km	-3,83
	Extra tiempo de cruce-Carmen Tramo 7 [7:00-9:00]	s/km	-9,21
	Extra tiempo de cruce-Grecia Tramo 3 expreso	s/km	-11,42
	Sólo bus	s/km	16,53
	Extra solo bus- Macul Tramo 1 [11:00-14:00 y 17:00-21:00]	s/km	-14,54
	Extra solo bus- Macul Tramo 2 [19:00-21:00]	s/km	-11,39
	Extra solo bus- Carmen Tramo 2 [19:00-21:00]	s/km	-11,95
	Extra sólo bus- Carmen Tramo 4 [10:30-15:30]	s/km	-15,44
	Extra tiempo de cruce-Matta Tramo 8 expreso	s/km	-15,94
	Tráfico mixto	s/km	41,41
	Extra tráfico mixto-Macul Tramo 6 [14:00-15:30]	s/km	-13,27
	Extra tráfico mixto-Matta Tramo 9 [10:00-11:30]	s/km	-18,43
Demora en intersecciones Corredor 1 pista	Carmen-Demora uniforme base Tramo 6	s/int	5,25
	Carmen-Demora uniforme base Tramos 5 y 7	s/int	6,80
	Carmen-Demora uniforme extra Expreso Tramo 5 [17:30-21:00]	s/int	-2,41
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00-10:00]	s/int	10,06
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 6 [10:00-13:30]	s/int	3,75
	Carmen-Demora uniforme extra normal Tramo 6 [17:30-20:00]	s/int	3,75
	Carmen-Demora uniforme extra expreso Tramo 6 [17:30-20:00]	s/int	-0,93
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00-9:00]	s/int	-2,88
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 7 [15:00-17:00]	s/int	3,46
	Grecia-Demora uniforme base Tramo 1 y 2	s/int	10,56
	Grecia-Demora uniforme base Tramo 3	s/int	6,83
	Grecia-Demora uniforme base Tramo 3 Expreso	s/int	-3,48
	Grecia-Demora uniforme base Tramo 4	s/int	12,55
	Grecia-Demora uniforme base Tramo 5 y 6	s/int	5,87
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 1 [11:00-14:30]	s/int	-3,80
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00-21:00]	s/int	5,56
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00-9:00]	s/int	2,09
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 3 [17:00-21:00]	s/int	9,19
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 [7:00-9:30]	s/int	10,15
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 Expreso [7:00-9:30]	s/int	-6,71
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 4 [9:30-17:00]	s/int	8,66
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00-9:30]	s/int	4,41
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 5 [9:30-17:00]	s/int	12,38
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00-9:30]	s/int	12,73
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 Expreso [7:00-9:30]	s/int	-8,28
	Grecia-Demora uniforme extra Tramo 6 [17:00-21:00]	s/int	5,82

(continúa)

Tabla 5.3 (continuación)

Sección	Variables	Unidades	Coefficiente
	Macul-Demora uniforme base Tramo 1 y 3	s/int	2,46
	Macul-Demora uniforme base Tramo 2 y 5	s/int	9,61
	Macul-Demora uniforme base Tramo 7	s/int	12,48
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00-12:00]	s/int	2,32
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 3 [7:00-8:30]	s/int	10,70
	Macul-Demora excedente Tramo 3 [7:30-8:00]	s/km	86,37
	Macul-Demora excedente Tramo 3 [8:00-8:30]	s/km	27,38
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 3 [9:30-12:00 y 12:00-17:00]	s/int	3,22
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00-10:00]	s/int	7,19
	Macul-Demora excedente Tramo 5 [7:30-8:00]	s/km	62,66
	Macul-Demora excedente Tramo 5 [8:00-8:30]	s/km	29,96
Demora en intersecciones	Macul-Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00-10:00]	s/int	2,28
Pistas sólo bus	Macul-Demora excedente Tramo 7 [7:30-8:00]	s/km	123,27
	Macul-Demora excedente Tramo 7 [8:00-9:00]	s/km	74,91
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 7 [10:00-12:30 y 20:00-21:00]	s/int	-3,10
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 1 y 2	s/int	11,82
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 3	s/int	3,35
	Carmen-Demora uniforme base Tramo 4	s/int	6,47
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00-21:00]	s/int	-2,35
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 2 [14:00-17:00]	s/int	4,33
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 3 [17:30-20:00]	s/int	7,90
	Carmen-Demora uniforme extra Tramo 4 [18:00-20:00]	s/int	11,71
	Matta-Demora uniforme base Tramo 8	s/int	8,38
	Matta-Demora uniforme base Tramo 8 Expreso	s/int	-3,65
Demora en intersecciones	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [7:30-8:30]	s/int	4,50
Pistas sólo bus	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [12:00-17:00]	s/int	6,54
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 8 [17:00-20:00]	s/int	9,93
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [18:00-18:30]	s/km	17,87
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [18:30-19:00]	s/km	42,72
	Matta-Demora excedente Tramo 8 [19:00 -19:30]	s/km	23,40
	Demora uniforme base Macul Tramo 6 y Matta Tramo 9	s/int	5,11
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 6 [7:30-8:30]	s/int	7,62
	Macul-Demora uniforme extra Tramo 6 [17:00-19:00]	s/int	5,42
	Matta-Demora uniforme extra Tramo 9 [7:30-10:00]	s/int	4,40
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [7:30-8:00]	s/km	52,45
	Matta-Demora excedente Tramo 9 [8:00-8:30]	s/km	210,14
Demora en intersecciones	Matta-Demora excedente Tramo 9 [8:30-9:00]	s/km	44,61
Tráfico mixto	Matta-Demora uniforme extra Tramo 9 [16:30-19:30]	s/int	8,40
	Matta-Demora un excedente Tramo 9 [17:00-18:00]	s/km	55,19
	Matta-Demora un excedente Tramo 9 [18:00-18:30]	s/km	128,73
	Matta-Demora un excedente Tramo 9 [18:30-19:00]	s/km	204,09
	Matta-Demora un excedente Tramo 9 [19:00-19:30]	s/km	179,15
	Matta-Demora un uniforme extra Tramo 9 [19:30-20:30]	s/int	4,82
	Detenciones tráfico mixto	s/det	12,71
	Detenciones pistas sólo bus	s/det	13,61
Demora en paraderos	Detenciones corredor 1 pista	s/det	15,20
	Tiempo de servicio base	s/pax	1,447
	Extra tiempo de servicio [>20 pax/bus-km]	s/pax	-0,91

5.2. Análisis de resultados para Santiago

5.2.1. Análisis de parámetros

El intercepto tiene un valor de 96,36 s/km - equivalente a 37,36 km/h- y corresponde al tiempo de cruce base en el corredor de 1 pista. Este valor ha sido medido en otro estudio

reciente para un par de tramos del corredor Grecia, y se encontró un valor muy similar (95,5 s/km).

Sumando la variable 'Tráfico mixto' al intercepto, se tiene el valor del tiempo de cruce del tráfico mixto, con un valor de 137,77 s/km o bien de 26,1 km/h. La referencia más cercana de este valor es de 132,64 s/km (Gibson et al., 2015) hecha para otro eje de la ciudad de Santiago (Avenida Santa Rosa). Dado que el tráfico mixto puede operar en distintas condiciones influenciado altamente por el nivel de flujos vehiculares, actividades y congestión, este coeficiente tiene un valor similar.

Sumando la variable 'Pista Solo Bus' al intercepto, se tiene el valor del tiempo de cruce de las pistas sólo bus que da un valor de 112,90 s/km o bien 31,89 km/h. Esto implica una disminución de la velocidad con respecto al corredor. El valor obtenido tiene mucho sentido, puesto que está entremedio del coeficiente de tráfico mixto y corredor de una pista.

Esta coherencia de menor a mayor obtenida para los tiempos de cruce es consistente con lo reportado en la literatura. También tienen sentido entre ellas, lo que indica que el tiempo de cruce está razonablemente bien modelado.

En distintos períodos aparecen variables asociadas a una disminución en el tiempo de cruce para ciertos tramo-períodos. Estas situaciones ocurren por una reducción significativa del flujo de automóviles que interactúa con los buses y/o de la frecuencia de detenciones en paraderos.

En el caso de los corredores el tiempo de cruce disminuye a valores entre 87,15 y 91,3 s/km para los servicios normales. En el caso del Tramo 3 de Av. Grecia llega a 84,94 s/km para servicios expresos, sin paraderos en el tramo. Estos valores están claramente por sobre el tiempo de cruce para un corredor de dos pistas (79,4 s/km) reportado por Gibson et al. (2015).

En el caso de una pista sólo bus y dos pistas de autos, el tiempo de cruce disminuye a valores entre 97,45 y 101,5 s/km para todos los servicios en horarios que son de bajo flujo de autos en el sentido considerado. Este rango de valores es muy acotado y se parece bastante al tiempo de cruce del corredor de 1 pista. Esto hace sentido, puesto que en los períodos y tramos en donde aparecen este tipo de variables, se espera que las pistas sólo bus operen en condiciones óptimas para las cuales fueron diseñadas, por lo tanto, la invasión debiese ser muy baja o nula y se asemejaría a un corredor de una pista.

En el caso de dos pistas sólo bus se encuentra una disminución en el tiempo de cruce para servicios expresos, con sólo un paradero al final del tramo (servicios normales tienen cinco paraderos), que descienden el valor del paso medio a 96,95 s/km. Este valor es muy similar al del corredor de una pista, lo que parece razonable pues los buses expreso pueden usar siempre la segunda pista solo bus.

En el caso del tráfico mixto, el tiempo de cruce disminuye a valores entre 119,34 y 124,5 s/km. En promedio son los que más segundos por kilómetro decrecen, puesto que los períodos donde aparecen estas variables van de la mano con que hayan flujos de autos bajos. Dado que la interacción es muy alta, se espera que el tiempo de cruce cambie más que en los

otros tipos de prioridad. Sin embargo, el valor final se encuentra por sobre el valor de una pista sólo bus, lo que parece razonable.

Demora en paraderos

Como se explicó en el capítulo anterior, hay una relación entre el tiempo de crucero de los buses y el tiempo que toma un bus por el hecho de detenerse en paraderos. En particular, a mayor velocidad es más el tiempo que se pierde debido al tiempo empleado en frenar y volver a tomar la velocidad de desplazamiento. Se espera entonces que el tiempo perdido por detención tenga una relación inversa con el tiempo de crucero base, cosa que se cumple. Además, este tiempo perdido es consistente, en este sentido, con el estimado en Gibson et al. (2015) pues para un corredor de 2 pistas se obtuvo un valor claramente mayor al de corredor de una pista aquí (16,4 s vs 15,2 s) y para tráfico mixto, un valor muy parecido al de aquí (12,9 s vs 12,7 s). Las diferencias guardan relación con aquellas de los tiempos de crucero subyacentes.

Más en detalle, este tiempo perdido incluye la pérdida por aceleración y frenado y un tiempo muerto en la detención, usado principalmente para la apertura y cierre de puertas. Este último es independiente del tipo de vía por lo que se puede asumir constante y se toma un valor de 5 [s], basado en Gibson et al. (2015). Esto se traduce en la relación armónica descrita en la ecuación 4.3.

$$TDP_p = \frac{1000}{taf_p * tc_p} + tp \quad (5.1)$$

Donde:

TDP_p : Tiempo medio por detención en paradero con prioridad p [s/det].

taf_p : Tasa de aceleración/frenado, oscila entre 0,95 y 1,1 m/s.

tc_p : tiempo de crucero para prioridad p. [s/km].

tp : Tiempo de apertura/cierre puertas (igual a 5 [s/det]).

A través de dicha relación se puede verificar si los coeficientes por detenciones para cada prioridad obtenidos a partir del modelo están en un rango físicamente correcto o están desviados de los valores teóricos que se deberían aceptar para estas variables. Como se supone un valor para tp , se puede calcular el valor de taf_p para cada tipo de prioridad. Este valor se espera que se encuentre entre 0,95 y 1,1 m/s². En la Tabla 5.4 se presentan los valores calculados de t_{af} , en donde todos los casos cumplen con la condición.

Otra variable relevante a observar es el tiempo de servicio que, por construcción, es el mismo para todos los tramos ya que no hay variación en las condiciones físicas de transferencia de pasajeros. El parámetro base estimado es de 1,447 s/pax, comparable con lo visto en y Gibson et al. (2015) (1,386 s/pax), considerando que la tasa de evasión es similar en las fechas donde se generaron los datos para cada uno de estos estudios. Cabe señalar que solo se puede comparar el parámetro base pues en el caso de Santa Rosa no había paraderos con demandas de transferencia superiores a 20 pax/bus-km.

Tabla 5.4: Valores detenciones de buses

Prioridad	Tiempo detención	Tiempo de cruce	taf
	s/det	s/km	m/s ²
Tráfico mixto	12,7	137,77	0,96
Pistas sólo bus	13,6	112,80	1,03
Corredor 1 pista	15,2	96,36	1,02

El coeficiente extra resultó ser de $-0,91$ s/pax, lo que implica que el aporte marginal por pasajero sobre el límite de demanda es de $0,537$ s/pax. Esta reducción hace sentido pues donde la demanda es muy alta, hay zona paga en algún caso, el proceso de transferencia se acelera por la presión de los pasajeros y/o la tasa de evasión probablemente se reduce.

Demora en Intersecciones

Esta componente comprende demora excedente y uniforme. El análisis de los parámetros estimados se hace separadamente para cada clase de demora ya que la lógica que les subyace es diferente.

En cuanto a demora excedente (*DE*), no la hay -como era de esperar- en ningún tramo de los corredores estudiados. Para el caso de las pistas sólo bus la situación es distinta, no habiendo para Carmen pero sí apareciendo en algunos períodos para ciertos tramos de Macul-Los Leones y Avenida Matta. Donde existe, se obtienen valores de magnitud importante, que van de 18 s/km hasta 123 s/km en el caso más crítico. Bajo tráfico mixto, no se registra en el tramo de Macul pero sí en varios períodos en el tramo de Matta, donde su valor se mueve entre 45 s/km y 210 s/km. Esta jerarquía de rangos de valores hace sentido. La magnitud de la DE es significativa: donde existe, representa más del 40% del tiempo de cruce base en el 45% de los casos en pistas sólo bus y en el 85% en tráfico mixto. Y hay casos en que su valor llega a ser mayor que dicho tiempo.

La especificación de la demora excedente surge de la definición de umbrales, cuya consistencia es interesante analizar. El valor final de los umbrales se obtiene restando el coeficiente de demora excedente obtenido en el modelo complementado del paso medio del período correspondiente. La Tabla 5.5 muestra esos valores para cada tramo-período con demora excedente.

Una primera verificación es que en cada tramo no haya períodos en que el paso medio supera el umbral pero no tiene asociada una variable de demora excedente. Esto se cumple bien, solo hay escasas situaciones en que hay un valor superior por un margen tan bajo que la variable respectiva resulta no significativa. Otra verificación de consistencia interna es que cuando hay demora excedente en períodos consecutivos en un mismo tramo, los umbrales correspondientes sean estables. Se puede observar en la Tabla 5.5 que así sucede, con una excepción: el período 8.00 a 8.30 en el tramo 9 de Matta. Este es un tramo de tráfico mixto y se trata de la media hora de mayor congestión en la mañana. Esto puede explicarse porque aquí se da un flujo de autos marcadamente más intenso lo que implica que habrá un grado de saturación similar al de períodos adyacentes aún para condiciones más favorables de demora

en paraderos para los buses.

Tabla 5.5: Variables mudas de demora excedente por tramo-período

Variable	Tiempo promedio s/km	Coefficiente s/km	Tiempo s/DE s/km
Macul - Demora excedente Tramo 3 [7:30 - 8:00]	303,2	86,4	216,8
Macul - Demora excedente Tramo 3 [8:00 - 8:30]	242,5	27,4	215,1
Macul - Demora excedente Tramo 5 [7:30 - 8:00]	321,3	62,7	258,6
Macul - Demora excedente Tramo 5 [8:00 - 8:30]	292,0	30,0	262,1
Macul - Demora excedente Tramo 7 [7:30 - 8:00]	362,0	123,3	238,7
Macul - Demora excedente Tramo 7 [8:00 - 9:00]	312,0	74,9	237,1
Matta - Demora excedente Tramo 8 [18:00 - 18:30]	272,3	17,9	254,4
Matta - Demora excedente Tramo 8 [18:30 - 19:00]	300,7	42,7	258,0
Matta - Demora excedente Tramo 8 [19:00 -19:30]	280,2	23,4	256,8
Matta - Demora excedente Tramo 9 [7:30 - 8:00]	266,2	52,5	213,7
Matta - Demora excedente Tramo 9 [8:00 - 8:30]	403,2	210,1	193,1
Matta - Demora excedente Tramo 9 [8:30 - 9:00]	262,6	44,6	218,0
Matta - Demora excedente Tramo 9 [17:00 - 18:00]	278,7	55,2	223,5
Matta - Demora excedente Tramo 9 [18:00 - 18:30]	333,2	128,7	204,5
Matta - Demora excedente Tramo 9 [18:30 - 19:00]	415,0	204,1	210,9
Matta - Demora excedente Tramo 9 [19:00 - 19:30]	395,9	179,1	216,8

Otro aspecto de interés en materia de consistencia es la relación de los umbrales según tipo de prioridad. En tráfico mixto, el umbral es en promedio de 215 s/km, mientras en pistas sólo bus fluctúa en torno a 250 s/km salvo en el tramo 3 de Macul en que es también de 215 s/km. Este último caso se explica porque en ese período hay una fuerte invasión de autos en la pista solo bus para realizar virajes, lo que hace que opere como si fuera un tramo de tráfico mixto. Se observa una diferencia importante en los umbrales pero debe tenerse presente que la demanda de transferencia de pasajeros es bastante mayor en los tramos con pista solo bus. Si se descuenta de cada umbral la respectiva demora media en paraderos estimada, considerando solo los buses de servicios normales, resultan valores de 190 s/km y de 188 s/km para tráfico mixto. Es decir, hay una notable concordancia. Esta comprobación se refuerza si se extiende la comparación del umbral descontado a los valores obtenidos en el modelo de Santa Rosa Gibson et al. (2015) en tramos de tráfico mixto, los que se mueven entre 188 y 200 s/km.

La demora uniforme (DU), a diferencia de la excedente, se presenta en toda intersección y en todos los períodos. Como el método que se empleó para modelarla es original y genera una gran cantidad de variables, es importante examinar con detenimiento los resultados obtenidos. Cabe recordar que se considera una demora uniforme base por tramo, o grupo de ellos, y tres clases de variables extra para ciertos tramo-períodos en que sean aplicables, que son aditivas a la base respectiva. Hay 14 variables de demora uniforme base para los 21 tramos modelados. Sus coeficientes varían entre 2,46 y 12,55 s/int. Es un rango amplio, que refleja principalmente la variedad de condiciones promedio entre tramos en materia de programación de los semáforos y de capacidad de los buses de beneficiarse de la coordinación existente. Hay 6 variables de demora uniforme extra asociadas a la aparición de demora excedente. Su duración excede entre media hora y una hora y media la del período con demora excedente respectivo, lo que parece razonable. Los coeficientes estimados varían entre 2,28 y 10,70 s/int, un rango similar al de la demora base, lo que concuerda bien con la teoría. Se aprecia además

que hay una relación inversa de su magnitud con respecto a la de la demora uniforme base correspondiente, lo que es de toda lógica.

Hay otras 6 variables de demora uniforme extra asociadas a los servicios expresos que se aplican a tramo-períodos específicos salvo en el tramo 3 de Grecia, en el que no hay ningún paradero para estos servicios, donde se aplica a la demora base. Estas variables aparecen en el corredor y en el tramo con dos pistas sólo bus. Es interesante este efecto, ya que es en estos tipos de vía que hay facilidades claras para que los buses puedan adelantar en paraderos a otros buses. Sus coeficientes, que deben ser negativos, van de -8,28 hasta -0,93 s/int.

Por último, hay 27 variables de demora uniforme extra asociadas a condiciones favorables o desfavorables, principalmente de la programación de los semáforos, en tramo-períodos determinados. La mayoría (quince) está vinculada a tramos de corredor, lo que es razonable ya que al no haber interacción con otros vehículos hay mayor sensibilidad a las características de cada programa. Predomina una duración de 2 a 3 horas pero llegan a tener casi 8 horas, según el período de aplicación de los diversos planes. Los coeficientes estimados, que pueden tener cualquier signo, van de 2,32 a 12,73 s/int para las que agregan demora uniforme y de -3,80 a -2,35 s/int, las que reducen la demora base. Nuevamente, el rango es similar al de la demora base. Esto hace visible que la programación específica de los semáforos tiene un efecto muy importante y, por otra parte, que seguramente se está reflejando fuertemente en esta componente el efecto negativo que tienen las detenciones en paraderos sobre el aprovechamiento de la coordinación. La frecuencia de estas detenciones cambia entre períodos de manera no homogénea entre tramos, lo que contribuye a la amplitud del rango observado.

Se aprecia entonces que las cuatro componentes definidas para modelar la demora uniforme juegan un papel relevante y que, en este contexto, la demora uniforme base no representa un valor promedio en torno al cual hay variaciones sino uno más cercano a su límite inferior, salvo para los servicios expreso.

Para hacerse una idea del resultado de conjunto, se hizo una comparación de los valores de la demora uniforme total por tramo-período para los servicios normales aquí estimados con los obtenidos en el estudio de Santa Rosa (Gibson et al., 2015), donde se hizo una modelación explícita de las demoras uniformes. El rango de sus valores es entre 2,5 y 22,7 s/int. en este estudio y entre 2,0 y 26,3 s/int en Santa Rosa. Por otra parte, se comparó también para condiciones de tráfico mixto (en Santa Rosa no había pistas sólo bus), la demora uniforme media en períodos sin y con demora excedente. Los valores respectivos son, aquí, 6,5 y 11,9 s/int y en Santa Rosa, 7,8 y 13,9 s/int. Se aprecia una remarcable coincidencia en estos rangos pese al diferente método de modelación.

En suma, se encuentra que existe una alta consistencia, tanto interna como con un estudio análogo y con referencias físicas del proceso de circulación, en los valores estimados para los parámetros del modelo. Esto permite considerar que se ha logrado una asignación confiable del paso medio de los buses a cada una de sus componentes, lo que provee bases sólidas a las conclusiones que se puedan extraer de su distribución según tipo de vía o de servicio.

5.2.2. Análisis de componentes

El análisis a continuación se puede ilustrar mediante la distribución de los tiempos estimados entre sus componentes. Se distinguen 5 períodos para separar la punta mañana (7-9), horarios fuera de punta (10 -14, 14 - 17, y 19 -21) y punta tarde (17-19). Se presenta una información por tramo y además se muestran agregados por tipo de infraestructura. Se hace una distinción entre pistas sólo bus según el número total de pistas y el número de pistas exclusivas para buses.

En primer lugar se analiza la distribución entre las 3 componentes del paso medio, en s/km. Los valores promedio para cada tramo se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Distribución del paso medio de viaje por período (s/km)

	Tiempo de Crucero [s/km]					Demora en Intersecciones [s/km]					Demora en Paraderos [s/km]				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Carmen															
1 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	57,9	57,9	57,9	46,4	46,4	19,9	23,3	30,7	30,5	25,9
2 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	34,3	34,3	46,8	34,3	22,3	25,8	28,2	39,4	42,7	42,4
3 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	15,1	15,1	15,1	46	30,2	19,1	23,9	33,6	31,8	31,5
4 - SB	112,9	99,4	105,7	112,9	112,9	19,4	19,4	19,4	41,2	36	2,8	5,3	9,7	6,5	6,8
5 - C1	96,4	96,4	96,4	93,8	93,8	14,3	14,3	14,3	11,7	11,7	17,9	19,9	26,3	33,7	36,4
6 - C1	96,4	96,4	96,4	94,4	95,1	62,8	35	21,5	25,4	24,1	10,5	9,7	16,7	21,9	19,9
7 - C1	90,8	96,4	96,4	96,4	96,4	16,2	21,8	29	21,8	21,8	13,7	16,1	21,3	26,2	27
Macul															
1 - SB	112,9	101,8	112,9	98,4	98,4	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	23,2	19,4	16,7	20,4	21,4
2 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	101,5	32,2	29,1	26	26	26	40,1	30,8	26,1	32,5	32,5
3 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	44,9	18,2	18,2	7,9	7,9	50,2	35,7	29,7	34,1	31,8
5 - SB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	89,4	42,3	42,3	42,3	42,3	65,4	49,8	41,9	41,3	36,4
6 - TM	137,8	137,8	132,1	137,8	137,8	23,7	15,9	15,9	32,7	15,9	49,1	36,7	32,7	40,8	31,4
7 - SB1A	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	121,6	55,9	66,1	66,1	57,5	42,9	37,4	33,9	39,3	31,8
Matta Grecia															
1 - C1	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	33	24,1	31,1	50,5	50,5	45,1	36,1	29,6	28,5	21,9
2 - C1	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	44,4	38,9	38,9	38,9	38,9	56,3	45,1	39,1	40,3	31,8
3 - C1	90,6	96,4	96,4	90,6	90,6	16,7	22,4	22,4	46,9	46,9	8,9	12,8	12,7	7,3	5,7
4 - C1	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	48,9	52,8	52,8	31,2	31,2	43,5	44,8	45,2	51,1	39,1
5 - C1	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	30,9	48,5	48,5	15,6	15,6	28,1	24,6	25,6	24,7	21,2
6 - C1	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	41,4	18,7	18,7	37,3	37,3	17,5	19,1	19,8	20,3	14,4
8 - DSB	104,9	112,9	112,9	104,9	104,9	35,2	47,3	65,2	92,6	57,1	46,4	54,7	53,8	45,5	39,8
9 - TM	137,8	130,3	137,8	137,8	137,8	92,1	23,7	29,2	195,4	92,3	13,3	20,8	20,9	12,3	11,2

Tipo: C1 = corredor 1 pista, SB = 1 pista sólo bus (2 autos), SB1A = 1 pista sólo bus (1 auto), DSB = dos pistas sólo bus, TM = tráfico mixto.

Hay diferencias claras en los distintos períodos del día y entre tramos. Estas diferencias son más notorias en términos de demora en intersecciones y paraderos, aunque también existen en tiempo de crucero para tramos del mismo tipo de prioridad.

Para el caso del corredor, las demoras en intersecciones varían entre 11,7 y 62,8 s/km. Esto refleja una alta variabilidad, en donde se observan demoras en intersecciones claramente más altas en ciertos períodos con respecto a otros . La causa de esto podría ser a una programación desfavorable y en menor medida a un aumento de flujo de buses. En particular, se observa que en el corredor de Carmen se ve una menor demora en intersecciones, lo que es esperable al tener menor flujo de buses. La demora en paraderos también es de considerable variabilidad, teniendo tramos con una alta demora en paraderos y otros con poca. El tiempo de crucero disminuye en ciertos períodos unos pocos segundos por kilómetro (entre - 5,6 a - 1,3 s/km).

Para las pistas sólo bus, las demoras en intersecciones varían altamente desde valores muy bajos (15,1 s/km) y otros con presencia clara de demora excedente (121,6 s/km), la cual existe más allá del tipo de pista sólo bus implementado. Esto refleja que en ninguno de los casos estudiados es posible evitar la demora excedente en pistas sólo bus. La demora en paraderos varía considerablemente entre tramos, habiendo algunos muy poco demandados como, por ejemplo, Carmen Tramo 7 (13,7 s/km) y uno con gran actividad de pasajeros como es el de dos pistas sólo bus (54,7 s/km). El tiempo de crucero es en la mayoría de las observaciones de 112,9 s/km, teniendo en algunas ocasiones disminuciones debido a efectos de servicios expresos o períodos fuera de punta. Interesante recalcar que en el tramo de '1 pista sólo bus - 1 auto' no existe una disminución en tiempo de crucero, probablemente por ser el tramo con mayor invasión de otros vehículos.

El tráfico mixto tiene en demora en intersecciones una variación entre 15,9 y 195,4 s/km, siendo el tipo de prioridad con el valor mínimo más alto y el valor máximo más alto. Esto es esperable y se debe a que en períodos fuera de punta debiese tener mayor demora uniforme y en casos de presencia de demora excedente también va a tener mayor aumento del paso medio. La demora en paraderos varía considerablemente entre períodos y tramos y el tiempo de crucero tiene en sólo un período una disminución, que sólo ocurre en el tramo con 4 pistas por sentido.

La distribución entre las tres componentes del paso medio se puede agregar por tipo de infraestructura, ponderando la información por tramo para un análisis comparativo por diferentes medidas de prioridad. Esto se hace para los servicios normales, puesto que representan la mayoría de los casos y están presentes en los tres ejes estudiados. Los valores se presentan en las Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Distribución del paso medio por tipo para servicios normales

Tipo	Tiempo de crucero [s/km]					Demora en intersecciones [s/km]					Demora en paraderos [s/km]				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Corredor 1 pista	96,1	96,4	96,4	96,4	96,4	40,0	33,1	34,0	36,0	36,0	36,4	29	28,5	32,7	26,4
2 PSB	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	43,2	47,3	65,2	94,3	65,1	63,2	54,7	53,8	61,4	52,4
1 PSB (2 autos)	112,9	110,4	112,6	110,4	108,1	40	25,7	24,9	23,4	22,9	40,2	30,9	28,4	33,2	31,7
1 PSB (1 autos)	112,9	112,9	112,9	112,9	112,9	121,6	55,9	66,1	66,1	57,5	42,9	37,4	33,9	39,3	31,8
Tráfico mixto	137,8	134,6	134,5	137,8	137,8	47,3	19,1	21,5	87,4	51,8	41,3	30,0	27,7	34,2	27,2
Porcentaje [%]															
Corredor 1 pista	55,7	60,8	60,7	58,4	60,7	23,2	20,9	21,4	21,8	22,6	21,1	18,3	18,0	19,8	16,7
2 PSB	51,5	52,5	48,7	42,0	49,0	19,7	22,0	28,1	35,1	28,3	28,8	25,4	23,2	22,9	22,7
1 PSB (2 autos)	58,5	66,1	67,8	66,1	66,5	20,7	15,4	15,0	14,0	14,1	20,8	18,5	17,1	19,9	19,5
1 PSB (1 autos)	40,7	54,8	53,0	51,7	55,8	43,8	27,1	31,1	30,3	28,4	15,5	18,1	15,9	18,0	15,7
Tráfico mixto	60,9	73,2	73,2	53,1	63,6	20,9	10,4	11,7	33,7	23,9	18,2	16,3	15,1	13,2	12,5

La componente del tiempo de crucero es relativamente constante para cada uno de los tipos de prioridad, con las diferencias especificadas en el modelo para cada uno. Esta varía levemente en algunos períodos fuera de punta de '1 pista sólo bus (2 autos)' y tráfico mixto, ya que la disminución en dichos períodos ocurre sólo en algunos tramos y no de manera sistemática en la red evaluada. Esto confirma el asumir como uno el valor medio más típico del tráfico mixto para el caso que se analiza.

Se observa que la demora en intersecciones es mayor en los períodos con demora excedente en tráfico mixto. Sin embargo no es claro que esto se mantenga en los períodos fuera de punta. Se tiene que deber que en los períodos fuera de punta los flujos de vehículos disminuyen

considerablemente y existen ciclos bajos que favorecen la menor demora uniforme. Además, son tramos con número medio de detenciones bajo, lo que incide en un menor valor de demora en intersecciones.

En el caso promedio de demora en intersecciones en el corredor, es posible observar una variabilidad bastante baja y un aporte entorno al 21 % del paso medio en todos los períodos. Esto habla de su regularidad más allá de los períodos y las fluctuaciones de demanda. Algo similar ocurre con la demanda que se encuentra entre 16,7 % y 21,1 % con los valores más altos en las punta mañana y tarde calzando con los aportes más bajos del tiempo de crucero.

Para observar el efecto sobre los servicios expresos, es necesario compararlos con los servicios normales, pero sólo en los tramos y períodos en donde operan juntos. Así se observan bajo las mismas condiciones las ventajas y desventajas de este tipo de servicios.

Tabla 5.8: Distribución del paso medio por tipo para servicios expresos

Tipo	TC [s/km]			DI [s/km]			DP [s/km]		
	7-10	17:30-19	19-21	7-10	17:30-19	19-21	7-10	17:30-19	19-21
Expresos									
Coredor 1 pista	94,6	94,3	94,5	32,4	32,3	30,0	25,3	24,2	20,9
2 PSB	97,0	97,0	97,0	27,4	93,9	49,8	30,0	32,7	27,3
1 PSB	112,9	112,9	112,9	31,4	45,0	35,6	11,2	18,0	19,9
Tráfico mixto	137,8	137,8	137,8	93,0	228,5	94,6	0,0	0,0	0,0
Normal									
Coredor 1 pista	96,2	96,4	96,4	39,1	36,5	36,5	37,0	32,8	25,7
2 PSB	112,9	112,9	112,9	43,3	100,2	61,9	63,5	64,3	51,0
1 PSB	112,9	112,9	112,9	29,8	43,5	32,7	25,5	37,2	33,4
Tráfico mixto	137,8	137,8	137,8	97,4	223,1	86,8	26,5	26,3	22,2

Para analizar de manera más clara la información dispuesta en la Tabla 5.8, es necesario observar la frecuencia de detenciones tanto para servicios expresos como normales, como se muestra en la Tabla 5.9. Es claro notar que la mayor diferencia en tiempo de crucero se da en el tramo de dos pistas sólo bus, que corresponde a donde más diferencia existe en las detenciones.

A diferencia de los servicios normales, los expresos tienen una distribución distinta por tipo de prioridad. Estos sólo operan en períodos punta. Se aprecia que tienen un valor bastante fijo en estos períodos en demora en intersecciones para los corredores, cercano a los 32 s/km. Para el caso de dos pistas sólo bus, es posible notar una demora en intersecciones incluso menor a los del corredor con 27,2 s/km, pero en otros períodos se ve como el alto grado de saturación de las vías genera demoras excedentes que empeoran el paso medio a través de la demora excedente. En definitiva, las pistas sólo bus no distan en términos de demora en intersecciones a los corredores en sus mejores períodos, pero es posible un grave empeoramiento del paso medio debido al grado de segregación que llevan los buses y la permisividad a la invasión a las pistas por otros vehículos. Esto es peor en el tráfico mixto, donde el único tramo donde hay servicios expresos es en períodos con altos niveles de demora excedente y por ende tiene las demoras en intersecciones más altas.

Esto implica que hay una clara eficiencia en servicios expresos tanto para corredores como

Tabla 5.9: Frecuencia de detenciones para servicios expresos

Tipo	Detenciones/bus-km		
	7-10	17:30-19	19-21
Expreso			
Corredor 1 pista	0,8	0,8	0,8
2 PSB	1,1	1,1	1,1
1 PSB	0,6	0,7	0,8
Tráfico mixto	0,0	0,0	0,0
Normal			
Corredor 1 pista	1,5	1,4	1,2
2 PSB	2,9	2,9	2,6
1 PSB	1,4	1,9	1,8
Tráfico mixto	1,4	1,4	1,2

'dos pistas sólo bus', ya que tienen menores tiempos en paraderos y demora en intersecciones para este tipo de prioridad. No son del todo generalizables los resultados para el tráfico mixto. Sin embargo, se logra ver lo perjudicial que es para este tipo de servicios el estar expuestos a efectos de demora excedente, en donde los pasos medios crecen enormemente aunque estén diseñados con menor número de detenciones en paraderos.

Para analizar detalladamente la demora en intersecciones resulta necesario ver la distribución de estas por tramo, tal como se muestra en la Tabla 5.10. Se observa una alta variación en la demora en intersecciones tanto en tramos como períodos. Los rangos van de 2,1 a 21,2 s/int sólo en demora uniforme y de 1,3 a 26,5 s/int para la demora excedente (DE) (tabla 5.10). Esta última se normaliza a [s/int] para comparar más adecuadamente su efecto, teniendo en cuenta que para entenderla junto a la demora uniforme no se debe asumir que se reparte homogéneamente por intersección. Queda en evidencia el efecto que puede llegar a tener la DE , siendo más de la mitad de la demora total en intersecciones para algunas observaciones.

En el tramo 9 de Grecia Matta (*tráfico mixto*) se encuentra la DE más crítica. También la hay en pistas sólo bus de una y dos pistas. Se aprecia que hay tramos que tienen DE nula todo el día siendo pista sólo bus y tráfico mixto. Esto indica que para el estado de la red para el corte temporal analizado, es posible encontrar zonas de los ejes sin este fenómeno. Queda claro que no se tienen grados de saturación elevados en todas partes ni en cada tipo de prioridad. Sin embargo, los tramos que presentan peores demoras excedentes, son el tráfico mixto y '1 pista sólo bus - 1 auto, que resultan ser los tipos de vías con menor prioridad para los buses.

La Tabla 5.11 muestra la distribución de la demora en intersecciones para servicios normales por tipo de prioridad. Se aprecia que '1 pista sólo bus (2 autos)' tiene las demoras medias en intersecciones más bajas. Esto porque tiene tramos con bajas detenciones y, probablemente, bajos flujos vehiculares. Además, los ejes Carmen- Industrias y Macul - Los Leones tienen menos servicios, por lo tanto, menores flujos de buses. Dado que en algunos tramos de pistas sólo bus se observa que hay poca invasión, implicaría que tenga menores demoras uniformes, como los tramos 1 y 3 de Macul y tramo 3 de Carmen.

Tabla 5.10: Distribución de la demora en intersecciones

	DU (s/int)					DE (s/int)					DI (s/int)				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Carmen															
1 - SB	11,8	11,8	11,8	9,5	9,5	0	0	0	0	0	11,8	11,8	11,8	9,5	9,5
2 - SB	11,8	11,8	16,1	11,8	7,7	0	0	0	0	0	11,8	11,8	16,1	11,8	7,7
3 - SB	3,4	3,4	3,4	10,1	6,7	0	0	0	0	0	3,4	3,4	3,4	10,1	6,7
4 - SB	6,5	6,5	6,5	13,6	12	0	0	0	0	0	6,5	6,5	6,5	13,6	12
5 - C1	6,8	6,8	6,8	6	5,8	0	0	0	0	0	6,8	6,8	6,8	6	5,8
6 - C1	15,3	8,5	5,2	7,2	6,1	0	0	0	0	0	15,3	8,5	5,2	7,2	6,1
7 - C1	5,1	6,8	9,1	6,8	6,8	0	0	0	0	0	5,1	6,8	9,1	6,8	6,8
Macul															
1 - SB	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	0	0	0	0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
2 - SB	11,9	10,8	9,6	9,6	9,6	0	0	0	0	0	11,9	10,8	9,6	9,6	9,6
3 - SB	8,2	5,7	5,7	2,5	2,5	5,8	0	0	0	0	14	5,7	5,7	2,5	2,5
5 - SB	16,8	9,6	9,6	9,6	9,6	3,5	0	0	0	0	20,3	9,6	9,6	9,6	9,6
6 - TM	7,7	5,1	5,1	10,5	5,1	0	0	0	0	0	7,7	5,1	5,1	10,5	5,1
7 - SB1A	14,8	10,5	12,5	12,5	10,8	8,2	0	0	0	0	22,9	10,5	12,5	12,5	10,8
Grecia Matta															
1 - C1	10,6	7,7	9,9	16,1	16,1	0	0	0	0	0	10,6	7,7	9,9	16,1	16,1
2 - C1	12,1	10,6	10,6	10,6	10,6	0	0	0	0	0	12,1	10,6	10,6	10,6	10,6
3 - C1	5,3	6,8	6,8	14,5	14,4	0	0	0	0	0	5,3	6,8	6,8	14,5	14,4
4 - C1	19,7	21,2	21,2	12,5	12,5	0	0	0	0	0	19,7	21,2	21,2	12,5	12,5
5 - C1	11,6	18,2	18,2	5,9	5,9	0	0	0	0	0	11,6	18,2	18,2	5,9	5,9
6 - C1	13	5,9	5,9	11,7	11,7	0	0	0	0	0	13	5,9	5,9	11,7	11,7
8 - DSB	8,1	10,8	14,9	17	11,8	0	0	0	4,3	1,3	8,1	10,8	14,9	21,3	13,1
9 - TM	8,7	5,1	6,3	13,5	9,6	11,2	0	0	26,5	10,3	19,9	5,1	6,3	40	19,9

Tipo: C1 = corredor 1 pista, SB = 1 pista sólo bus (2 autos), SB1A = 1 pista sólo bus (1 auto), DSB = dos pistas sólo bus, TM = tráfico mixto.

El corredor de buses es el tipo de prioridad con menor variabilidad en los distintos períodos, con un valor cercano a los 10,5 s/int. Esto es bastante interesante, ya que indica que las programaciones ayudan para que en todo período los corredores de buses sean confiables en términos de demora en intersecciones. Por otro lado, sus valores no muestran que sean menores a otros tipo de prioridad pese a que se espera que las colas de vehículos formadas en las intersecciones sean más cortas. Esto se debe a que por diseño, los corredores tienen ciclos más altos y eso inevitablemente indica mayor demora uniforme.

Para la demora excedente, se observa que '1 pista sólo bus (2 autos)' tiene valores bajos. Esto debido al mismo motivo visto anteriormente, que pocos tramos tienen presencia de *DE*. Sin embargo, de la Tabla 5.10 se desprende que tanto el tramo 3 y tramo 5 de Macul tienen una *DE* muy elevada que hay que tener en consideración en caso que los flujos cambiasen. Esto muestra que, aunque sea de baja ocurrencia, su existencia tiende a ser grande para ciertos tramos. De hecho, el aporte de la demora excedente casi duplica la demora por intersección en algunos casos. Por lo tanto, las expectativas de demora en intersecciones están muy afectadas por la aparición de grados de saturación muy altos.

El tráfico mixto es el único tipo de vía que presenta demora excedente en la punta mañana y en la punta tarde. Esto refleja que hay cierta tendencia a que ocurra más frecuentemente. Esto coincide con que la demora excedente empiece a aparecer en un umbral más bajo del paso medio con respecto a otros tipos de prioridad.

Resulta interesante contrastar la distribución de la demora en intersecciones con la frecuencia de detenciones presentados en la Tabla 5.12. Esto porque el número de detenciones por kilómetro ayuda a entender el aprovechamiento de las coordinaciones de semáforos. En el caso del corredor coincide que los dos valores más altos en detenciones (7 - 9 y 17 - 19) tengan

Tabla 5.11: Distribución demora en intersecciones para servicios normales

Tipo	DU (s/int)					DE (s/int)					DI (s/int)				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Corredor 1 pista	11,9	10,3	10,5	10,6	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,9	10,3	10,5	10,6	10,4
2 PSB	9,9	10,8	14,9	18,3	13,6	0,0	0,0	0,0	3,3	1,3	9,9	10,8	14,9	21,6	14,9
1 PSB (2 autos)	9,0	7,6	7,8	8,3	7,4	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	7,6	7,8	8,3	7,4
1 PSB (1 autos)	14,8	10,5	12,5	12,5	10,9	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	23,0	10,5	12,5	12,5	10,9
Tráfico mixto	8,2	5,1	5,8	11,8	7,0	5,4	0,0	0,0	9,7	4,4	13,6	5,1	5,8	21,5	11,5

las demoras uniforme más altas, indicando que en el corredor se pierde significativamente el grado de coordinación a mayor número de detenciones.

El efecto del número de detenciones sobre la demora en intersecciones en pistas sólo bus es mixto, existiendo una mayor demora en intersecciones a mayor frecuencia de detenciones en los casos donde hay una pista sólo bus. Esto no es tan claro para el caso de dos pistas sólo bus, aunque este tramo es el con menor variabilidad en términos de frecuencia de detenciones. En cambio para el tráfico mixto parecen ser otros factores los que afectan en que haya mayor demora en intersecciones, ya que para valores similares las demoras por intersecciones son muy diferentes.

Tabla 5.12: Frecuencia de detenciones para servicios normales

Tipo	Detenciones/bus-km				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Corredor 1 pista	1,40	1,24	1,23	1,36	1,17
Dos pistas sólo bus	2,94	2,62	2,62	2,81	2,58
1 Pista sólo bus (2 autos)	2,07	1,72	1,59	1,80	1,74
1 Pista sólo bus (1 auto)	2,11	1,91	1,77	1,88	1,65
Tráfico mixto	2,13	1,70	1,58	1,76	1,54

Para el caso de los expresos, se calculan las medias y se contrastan con los servicios normales que operan en los mismos tramo-período. Los valores se encuentran en la Tabla 5.13. En el caso de la demora uniforme, hay notorias diferencias para el corredor de una pista y para el tramo de 'dos pistas sólo bus'. No así en los otros tipo de prioridad. Esto a pesar que la diferencia en frecuencia de detenciones es considerablemente menor en todos los tipos de prioridad.

Las diferencias en corredores van de 1,3 a 2,5 s/int y en 'Dos pistas sólo bus' van de 1,4 a 3,6 s/int. Esto es un resultado bastante claro de los beneficios en demora por intersecciones de los servicios expresos. Muestran su capacidad para aprovechar mejor la coordinación de semáforos por el hecho de detenerse menos, pero sólo en los casos que las vías les permitan adelantar con facilidad. Esto ocurre en los corredores, puesto que en los paraderos existe una vía de adelantamiento y en las dos pistas sólo bus al tener una segunda pista. Para 1 pista sólo bus y tráfico mixto no se observa este efecto, probablemente a la dificultad de adelantar en vías de tráfico mixto, ya que estos servicios operan en períodos punta.

Se observan diferencias que muestran que la demora uniforme es mayor para servicios expresos que para normales para 1 pista sólo bus y tráfico mixto. Esto se debe a como están calculados estos valores, que corresponde a la media ponderada por los flujos en cada período.

Por lo mismo, tales diferencias son bajas y representan esa diferencia que de todos modos es una buena forma de comparar distintos valores.

La demora excedente se presenta de manera similar tanto para expresos y normales. Esto es bastante ineficiente para el diseño que están hecho los servicios expresos, ya que en algunos casos representan gran parte de la demora en intersecciones, por lo que el impacto total de los ahorros hasta aquí vistos.

Tabla 5.13: Distribución de demora en intersecciones por tipo para servicios expresos

Tipo	DU /s/int)			DE (s/int)			DI (s/int)		
	7-9	17:30-19	19-21	7-9	17:30-19	19-21	7-9	17:30-19	19-21
Expresos									
Corredor 1 pista	10,5	10,4	9,6	0,0	0,0	0,0	10,5	10,4	9,6
2 PSB	6,3	14,7	10,0	0,0	6,8	1,4	6,3	21,5	11,4
1 PSB	8,3	12,0	9,5	0,0	0,0	0,0	8,3	12,0	9,5
Tráfico mixto	8,8	13,5	9,5	11,3	35,8	11,0	20,1	49,3	20,4
Normales									
Corredor 1 pista	13,0	11,7	11,7	0,0	0,0	0,0	13,0	11,7	11,7
2 PSB	9,9	18,3	13,1	0,0	4,6	1,1	9,9	22,9	14,2
1 PSB	8,1	11,8	8,8	0,0	0,0	0,0	8,1	11,8	8,8
Tráfico mixto	8,8	13,5	9,4	12,2	34,7	9,4	21,0	48,2	18,7

El valor más alto de DE de todos estos análisis es el de 48,3 s/int, comparable al obtenido en (Gibson et al., 2015) que es de 51 s/int. La Tabla 5.14 muestra el porcentaje de la demora excedente por sobre la demora total. Esta va del 8,5 al 45 % en el caso de servicios normales. Por lo visto en la Tabla 5.13 esto es mayor para los servicios expresos, lo que tiene sentido ya que estos tienen menores pasos medios. Su valor máximo está asociada a la punta tarde del tramo 9 en Grecia Matta. Se puede ver que tanto el tráfico mixto como 1 pista sólo bus - (1 auto) son nuevamente los casos más críticos. Esto se debe al crecimiento del paso medio, lo que indica un claro aumento de flujo vehicular y de invasión a las pistas.

Tabla 5.14: Porcentaje de demora excedente sobre demora total en intersecciones semaforizadas

Tipo	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Corredor 1 pista	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2 pistas sólo bus	0,0 %	0,0 %	0,0 %	15,1 %	8,5 %
1 Pista sólo bus (2 autos)	11,6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
1 pista sólo bus (1 autos)	35,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Tráfico mixto	39,7 %	0,0 %	0,0 %	45,0 %	38,6 %

La Tabla 5.15 muestra la distribución para la demora en paraderos por tramos en s/km. Al analizar las demoras en paraderos (DP) se observa que hay una gran diferencia entre tramos en valores absolutos. Tal como se vio en el capítulo 3, hay tramos con muy baja demanda y otros con muy alta. Los tramos 2 y 4 de Grecia Matta son los más demandados, debido a que cada uno tiene un paradero de alta actividad. Es interesante ver que en estos, el tiempo perdido por detenciones y transferencia se reparte de manera equitativa. Esto ocurre

para ambos tramos, lo que confirma un posible punto máximo de participación del tiempo de transferencia de pasajeros.

Tabla 5.15: Distribución de la demora media en paraderos por período

	Detenciones (s/km)					Transferencia (s/km)					DP (s/km)				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Carmen															
1	15,9	17,7	23,1	21,9	18,4	5,7	5,7	7,6	9,4	7,3	21,7	23,3	30,7	31,3	25,7
2	19,2	20,9	26,9	26,1	25,3	8,1	7,2	12,6	17,6	17,1	27,3	28,2	39,4	43,7	42,5
3	15,6	18,6	25,0	21,3	21,3	5,3	5,4	8,6	12,0	10,6	20,9	23,9	33,6	33,3	31,9
4	2,9	4,3	7,8	5,9	5,8	0,8	1,0	1,9	1,6	1,4	3,6	5,3	9,7	7,5	7,2
5	14,7	16,2	21,0	28,7	28,3	4,0	3,7	5,4	9,0	8,8	18,7	19,9	26,3	37,7	37,1
6	8,6	7,9	13,0	17,4	15,2	2,5	1,8	3,7	6,0	5,0	11,1	9,7	16,7	23,5	20,2
7	11,6	12,9	15,9	20,7	19,2	3,3	3,2	5,4	7,8	7,9	14,9	16,1	21,3	28,5	27,0
Macul															
1	19,2	16,4	14,1	16,8	17,6	4,0	3,1	2,6	3,6	3,8	23,2	19,4	16,7	20,4	21,4
2	30,7	24,6	21,3	25,5	25,6	9,4	6,3	4,8	7,0	6,9	40,1	30,8	26,1	32,5	32,5
3	34,9	27,5	23,4	26,1	24,7	15,2	8,2	6,3	8,0	7,1	50,2	35,7	29,7	34,1	31,8
5	41,7	34,4	30,0	28,5	26,6	23,7	15,4	11,9	12,9	9,8	65,4	49,8	41,9	41,3	36,4
6	32,4	26,2	23,5	26,0	22,5	16,7	10,5	9,2	14,8	8,8	49,1	36,7	32,7	40,8	31,4
7	29,1	26,2	24,3	25,6	22,4	13,8	11,1	9,6	13,7	9,4	42,9	37,4	33,9	39,3	31,8
Grecia Matta															
1	27,3	27,4	23,3	21,9	17,7	18,0	8,7	6,2	6,7	4,2	45,3	36,1	29,6	28,6	21,9
2	22,1	23,7	21,3	19,9	17,1	34,2	21,4	17,7	20,6	14,7	56,3	45,1	39,1	40,5	31,8
3	7,2	10,3	10,1	6,6	4,9	2,7	2,6	2,6	1,8	1,2	9,9	12,8	12,7	8,4	6,0
4	19,9	24,3	23,8	20,6	18,8	23,6	20,5	21,4	30,6	20,4	43,5	44,8	45,2	51,1	39,1
5	18,6	19,0	19,8	17,7	15,4	9,4	5,6	5,8	7,6	5,9	28,1	24,6	25,6	25,3	21,2
6	13,8	15,8	16,2	15,2	11,4	3,7	3,2	3,6	5,8	3,0	17,5	19,1	19,8	21,0	14,4
8	27,3	35,7	35,7	29,7	25,5	19,1	18,9	18,1	20,7	14,2	46,4	54,7	53,8	50,4	39,8
9	8,9	15,4	15,5	11,5	8,0	4,4	5,3	5,4	5,3	3,2	13,3	20,8	20,9	16,8	11,2

La Tabla 5.16 muestra la distribución para la demora en paraderos en s/km. Las detenciones corresponden entre un 62 y 76 % de la DP para todos los casos. Más allá de las diferencias por tiempo empleado por el hecho de detenerse por tipo de vía, se logra ver una distribución similar del tiempo por esta variable y por la transferencia de pasajeros en términos porcentuales.

Se observa que el tiempo consumido por detenciones en 'Dos pistas sólo bus' es mayor al resto durante el día. Esto se debe a tener una frecuencia de detenciones más alta.

Tabla 5.16: Distribución de la demora en paraderos por período para servicios normales

Tipo	Detenciones (s/km)					Transferencia (s/km)					DP (s/km)				
	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21	7-10	10-14	14-17	17-19	19-21
Corredor 1 pista	19,6	17,5	18,3	22,1	19,9	11,8	7,9	8,0	10,5	7,9	31,4	25,4	26,3	32,6	27,9
2 pistas sólo bus	39,8	35,7	35,7	38,3	35,8	23,4	18,9	18,1	23,1	16,6	63,2	54,7	53,8	61,4	52,4
1 Pista sólo bus (2 autos)	24,4	20,7	21,4	24,7	23,8	9,6	6,6	6,9	9,6	8,2	34,1	27,2	28,3	34,3	32,1
1 pista sólo bus (1 autos)	29,1	26,2	24,3	25,6	22,4	13,8	11,1	9,6	13,7	9,4	42,9	37,4	33,9	39,3	31,8
Tráfico mixto	25,3	20,4	18,9	22,1	19,7	12,8	7,7	7,0	11,7	7,8	38,2	28,2	26,0	33,9	27,6
Tipo	Porcentajes [%]														
Corredor 1 pista	62,5	69,0	69,5	67,9	71,5	37,5	31,0	30,5	32,1	28,5					
2 pistas sólo bus	63,0	65,4	66,3	62,3	68,3	37,0	34,6	33,7	37,7	31,7					
1 Pista sólo bus (2 autos)	71,7	75,9	75,5	72,0	74,3	28,3	24,1	24,5	28,0	25,7					
1 pista sólo bus (1 autos)	67,8	70,2	71,7	65,1	70,5	32,2	29,8	28,3	34,9	29,5					
Tráfico mixto	66,4	72,5	72,9	65,4	71,6	33,6	27,5	27,1	34,6	28,4					

Por último, la Tabla 5.17 muestra la comparación para la demora en paraderos entre servicios expresos y normales en s/km.

Es evidente el menor tiempo empleado en detenciones en cada una de las prioridades para servicios. Sin embargo, esto no se traduce a la demanda donde a veces tiene niveles similares

de tiempo empleado en transferencia de pasajeros. Esto indica que la distribución de la demora en paraderos cambia al 50 % por el hecho de detenerse y 50 % por transferencia de pasajeros, en los corredores. De esto se desprende que la gestión de paraderos es un objetivo importante para este tipo de servicios.

Que exista una reducción en el tiempo de servicio sobre los 20 pax/bus-km es un buen indicio que se está haciendo una correcta gestión en paraderos. En caso contrario o de existir congestión en paraderos, los servicios expresos se verían afectados en su eficiencia operacional.

Tabla 5.17: Distribución de la demora en paraderos por período para servicios expresos

Tipo	Detenciones (s/km)			Transferencia (s/km)			DP (s/km)		
	7-10	17:30-19	19-21	7-10	17:30-19	19-21	7-9	17:30-19	19-21
Expresos									
Corredor 1 pista	12,6	12,9	12,9	12,8	11,3	8,1	25,3	24,2	20,9
1 PSB	7,7	10,0	11,2	3,4	8,0	8,7	11,2	18,0	19,9
2 PSB	14,8	15,0	15,2	15,2	17,7	12,0	30,0	32,7	27,3
Tráfico mixto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Normales									
Corredor 1 pista	22,1	21,1	17,8	14,9	11,7	7,8	37,0	32,8	25,7
1 PSB	18,7	25,4	23,9	6,8	11,9	9,5	25,5	37,2	33,4
2 PSB	40,0	39,3	35,2	23,6	25,0	15,9	63,5	64,3	51,0
Tráfico mixto	17,8	17,8	15,9	8,6	8,5	6,3	26,5	26,3	22,2

5.3. Proceso de estimación para Powell

5.3.1. Generalidades

De igual manera que para el caso de Santiago, se definen variables para las tres componentes básicas del paso medio: tiempo de crucero, demora en intersecciones y demora en paraderos. Se hace un proceso de estimación en detalle con modelos preliminares, detección de incidentes, interpretación de las variables y estadísticos y generación de variables extras donde corresponda. En este caso se procede directamente a hacer un modelo que incluye todos los tramos, puesto que son sólo 8 y del mismo tipo de prioridad.

Se parte definiendo las variables de demora uniforme base por tramo, considerando evitar el problema de colinealidad. Luego se identifican los tramo-períodos en los cuales existe demora excedente y se agregan las variables mudas correspondientes, junto a las de demora uniforme extra por tramo, evitando colinealidad. Para finalizar el proceso de variables de demora en intersecciones, se identifican las de demora uniforme extra en los tramo-períodos donde se observa en modelos preliminares diferencias entre valores observados y estimados. Esto se hace observando períodos consecutivos donde se sobreestima o subestima.

En los casos donde se subestiman los valores se agregan variables de demora uniforme extra que se espera que sus coeficientes sean positivos y en el caso en que se sobreestimen se espera que sean de signo negativo. Al ser estas variables extras a aquellas de demora uniforme

base, se verifica que sus valores agregados tengan sentido. En particular, los coeficientes de signo negativo pueden generar que la demora uniforme sea negativa lo que no es correcto. En caso de no cumplir con esta consistencia, se realizan para estos casos identificación de variables de tiempo de cruceo extra.

La manera iterativa de ir formulando los modelos implica estimar un modelo, chequear el signo, valor y significancia de las variables. Tomar detalles de la coherencia de los valores obtenidos y observar los valores de los pasos medios observados v/s estimados. Para ir determinando el nivel de precisión de estos modelos es muy importante revisar los valores obtenidos para los tiempos de cruceo y compararlos con la evidencia reportada en la literatura. Lo mismo ocurre con los coeficientes por el hecho de detenerse y de servicio por pasajero.

Una vez determinadas todas las variables, se procede a juntar algunas variables como las demoras uniforme base de varios tramos, demoras excedentes y demoras uniforme extras con valores muy similares y que correspondan a un mismo tramo. Se chequea que este proceso no afecte la consistencia encontrada en las otras variables.

Otro detalle que destacó de este proceso de revisión gráfica y numérica de los valores observados y estimados por modelos preliminares fue la detección de incidentes. Estos se comparaban para cada tramo, período y día. De este modo se logró determinar días que mostraban un valor atípico, no detectado por el método usado en las primeras etapas. De todas formas, el número detectado es bastante bajo: un total de 14 observaciones.

Con respecto a la demora en paraderos, se posee información más específica de los paraderos. En particular se hacen pruebas para el atraso de los buses y de otras variables reportadas en la literatura sobre este sistema de buses como si el paradero está aguas arriba o abajo de una intersección semaforizada.

5.3.2. Modelo Powell

Se procede a estimar un modelo con todos los tramos. Dado que todos son de tráfico mixto se utiliza el intercepto como el tiempo de cruceo único para todos los tramos. Una peculiaridad que se observa es que los tramos 9, 11 y 15 muestran velocidades mayores a 25 km/h durante la gran mayoría del día. Por lo tanto, se incluye una variable de tiempo de cruceo extra para estos tramos. Esto porque no es posible atribuir las diferencias de velocidad con los otros tramos sólo a diferencias en demora en intersecciones.

Se definen las variables de demora uniforme base para cada tramo, agrupando estas observando la relación de paso medio y detenciones promedio. Luego se identifican las variables mudas de demora excedente en los tramos y períodos que existía presunción de su existencia. Estas están presentes en la mayoría de los tramos por el tipo de prioridad que existe en el eje. A su vez, se incorporan las variables de demora uniforme extra que acompañan a las demoras excedentes. Teniendo resultados preliminares, se revisa que estas variables sean estadísticamente significativas, del signo y magnitud correctos.

Luego, se identifican las variables de demora uniforme extra a través de la comparación

gráfica de sobreestimación o subestimación del paso medio. Se encuentra en la mayoría de los tramos una clara disminución del paso medio al final de los períodos analizados. Inicialmente se modela como demora uniforme extra, pero se determina que son variables de tiempo de crucero extra, referentes a un período fuera de punta.

Un caso particular resulta el del tramo 15, que tiene velocidades muy altas durante todo el día excepto en la punta mañana. Por lo tanto, está incluido en la variable de tiempo de crucero para todo el día, lo que implica reducir su tiempo de crucero. Sin embargo, esto no debiese ser válido para la punta mañana donde se observa un claro aumento del paso medio con presunta demora excedente. Por lo tanto, se incorpora una variable extra de tiempo de crucero para tales períodos que debe ser de signo positivo. Su magnitud y valor se verifican en el proceso de estimación.

Se agregan variables por demora en paraderos descritas en capítulo de modelación: una por el hecho de detenerse, tiempo de servicio de la demanda total y por el uso medio de la rampa para silla de ruedas. Dado que los buses funcionan con horario en paraderos, se hacen distintas pruebas según lo atrasado o adelantado que van los buses con respecto a su horario de pasada. En particular, se encuentra que existe un aumento del paso medio en caso de que los buses vayan adelantados a su horario. Otras hipótesis de la demora en paraderos fueron chequeadas, sin resultar significativas tales como: ubicación del paradero aguas arriba/abajo de una intersección semaforizada y la existencia de bahía de detención en paraderos.

Posteriormente, se analizan los valores y significancia de los coeficientes y se compara gráficamente los valores estimados v/s observados de los modelos preliminares. De esta forma se identifican grupos de períodos para cada tramo donde se subestiman o sobreestiman los valores, indicando que se debe incluir una variable extra, probablemente inducida por cambios en la demora uniforme en intersecciones debido a cambio de planes y condiciones de circulación. Una vez incluidas estas variables, se comprueban los valores finales de los coeficientes del tiempo de crucero, demora en paraderos y valores de demora uniforme.

Así, el modelo general quedó con un total de 45 variables. De ellas, 8 están relacionadas con el tiempo de crucero, 4 con la demora en paraderos y 33 con la demora en intersecciones. Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 5.18. Todos los coeficientes tienen el signo correcto y son estadísticamente significativos con niveles de confianza 95% o superiores y el valor de R^2 ajustado (0,82) es satisfactorio considerando la necesaria pérdida de varianza explicada que produce la modelación de demora en intersecciones sin datos de programación de los semáforos.

Tabla 5.18: Modelo Powell

Variables	Unidades	Coficiente	Error std.	t	Sig
Tiempo de crucero (intercepto)	s/km	124,3	3,7	33,9	***
Tiempo de crucero extra - Tramos 9, 11 y 15	s/km	-22,1	2,7	-8,2	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 8 [19:20 - 21:00]	s/km	-23,1	4,6	-5,0	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 11 [18:00 - 21:00]	s/km	-11,7	3,4	-3,4	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 12 [19:40 - 21:00]	s/km	-25,9	4,8	-5,4	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 13 [19:00 - 21:00]	s/km	-22,0	4,0	-5,5	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 14 [19:00 - 21:00]	s/km	-27,5	4,0	-6,9	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 15 [7:00 - 9:20]	s/km	20,1	9,0	2,2	*
Demora uniforme base Tramo 8	s/int	14,8	2,7	5,4	***
Demora uniforme base Tramos 9 y 11	s/int	2,5	1,3	2,0	*
Demora uniforme base Tramos 10 , 12 y 13	s/int	11,7	1,6	7,2	***
Demora uniforme base Tramos 14 y 15	s/int	5,9	1,4	4,3	***
Demora uniforme extra - Tramo 8 [12:20 - 17:40]	s/int	7,6	2,5	3,1	**
Demora excedente - Tramo 8 [15:20 - 15:40]	s/km	27,1	9,2	3,0	**
Demora excedente - Tramo 8 [17:00 - 17:20]	s/km	21,7	9,2	2,4	*
Demora uniforme extra - Tramo 9 [9:20 - 11:00]	s/int	9,0	2,5	3,7	***
Demora uniforme extra - Tramo 9 [11:20 - 17:20]	s/int	14,3	1,5	9,3	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 9:00]	s/int	5,1	1,5	3,4	***
Demora excedente - Tramo 10 [07:40 - 8:00]	s/km	32,5	9,9	3,3	**
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 19:40]	s/int	8,1	1,2	6,9	***
Demora excedente - Tramo 10 [11:00 - 13:00]	s/km	18,7	4,4	4,3	***
Demora excedente - Tramo 10 [13:20 - 14:00]	s/km	37,0	6,7	5,5	***
Demora excedente - Tramo 10 [15:20 - 16:00]	s/km	26,1	6,7	3,9	***
Demora excedente - Tramo 10 [16:40 - 17:00]	s/km	30,3	9,2	3,3	***
Demora excedente - Tramo 10 [17:00 - 17:20]	s/km	40,5	9,2	4,4	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [17:20 - 19:40]	s/int	5,2	1,3	4,0	***
Demora uniforme extra - Tramo 12 [7:40 - 9:20]	s/int	10,9	3,1	3,5	***
Demora excedente - Tramo 12 [7:40 - 8:00]	s/int	28,3	10,2	2,8	**
Demora excedente - Tramo 12 [8:00 - 8:20]	s/km	27,4	10,2	2,7	**
Demora uniforme extra - Tramo 13 [15:00 - 17:20]	s/int	9,4	2,3	4,1	***
Demora uniforme extra - Tramo 14 [7:20 - 9:00]	s/int	10,0	2,8	3,5	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:20 - 7:40]	s/km	52,2	11,0	4,8	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:40 - 8:00]	s/km	46,6	11,0	4,2	***
Demora excedente - Tramo 14 [8:20 - 8:40]	s/int	25,6	11,8	2,2	*
Demora uniforme extra - Tramo 15 [7:00 - 9:00]	s/int	17,0	6,6	2,6	**
Demora excedente - Tramo 15 [7:00 - 7:20]	s/km	27,3	12,5	2,2	*
Demora excedente - Tramo 15 [7:20 - 7:40]	s/km	112,5	12,5	9,0	***
Demora excedente - Tramo 15 [7:40 - 8:00]	s/km	207,1	12,5	16,6	***
Demora excedente - Tramo 15 [8:00 - 8:20]	s/km	88,0	12,5	7,1	***
Demora excedente - Tramo 15 [8:20 - 8:40]	s/int	70,0	12,5	5,6	***
Demora uniforme extra - Tramo 15 [16:00 - 18:00]	s/int	9,8	2,1	4,7	***
Adelantado	s/km-sad	0,054	0,0019	2,7	**
Detenciones	s/det	14,3	1,2	11,7	***
Demanda total	s/pax	1,6	0,3	4,7	***
Uso de rampa	s/rampa	37,8	7,1	5,3	***

N° observaciones : 1633 Adj R² = 0,82
Significancia: ***, 0,001 , ** : 0,01, * : 0,05 Error medio = 19,69 s/km

5.4. Análisis de parámetros para Powell

El intercepto tiene un valor de 124,29 s/km - equivalente a 28,96 km/h- y corresponde al tiempo de cruce base en el tráfico mixto. Este valor es menor a lo obtenido en Santiago (137,77 s/km) y levemente menor al obtenido en Santa Rosa (132,64 s/km). Sin embargo, está considerablemente por sobre el valor obtenido para pista sólo bus (112,9 s/km).

Dado las altas velocidades observadas en los tramos 9, 11 y 15, el tiempo de cruce disminuye en -22,15 s/km, tomando un valor de 102,2 s/km, o bien 35,2 km/h. Este valor es extremadamente alto para el tráfico mixto, pero dada las altas velocidades observadas el tiempo de cruce tiene que ser menor. Dado que esto es atípico para tramos de tráfico mixto y puede estar influenciando el resultado general del modelo se hace una prueba de un modelo removiendo estos tres tramos (ver Tabla B.1). El modelo obtenido es incluso más consistente en el valor del intercepto con lo visto en Santiago, obteniendo un valor de 127,08 s/km. Además, es posible notar que la diferencia entre las variables de demora en intersecciones es muy baja (la mayor es de 0,6 s/km) y la consistencia en paraderos también lo es. Esto indica que para el resto de los tramos hay una clara similitud con lo estimado en Santiago, mientras que existe una singularidad que permite que el tiempo de cruce sea menor en estos tres tramos. De todos modos se procede a utilizar el modelo con todos los tramos.

En distintos períodos aparecen variables asociadas a una disminución en el tiempo de cruce para ciertos tramo-períodos. Estas situaciones ocurren por una reducción significativa del flujo de automóviles que interactúan con los buses y/o de la frecuencia de detenciones en paraderos. En particular, suceden posterior a la punta tarde y un denominador común es que tienen una magnitud similar entre ellos (una reducción entre -27,5 y -22,0 s/km). Además, este rango de valores se asemeja al de la variable extra para los tramos 9, 11 y 15. Tal como se espera, no se encuentra una variable adicional para los tramos 9 y 15, pero sí la hay para el tramo 11. Esto tiene que deberse a que en ese tramo en particular hay un ahorro extra, probablemente debido a tecnologías implementadas en semáforos.

La variable de tiempo de cruce extra para el tramo 15 en la punta mañana es de signo positivo y tiene un valor de 20,1 s/km. Esto básicamente anula la disminución de tiempo de cruce percibida por la variable muda para el resto del día en el tramo. Por lo tanto, el tiempo de cruce en dichos períodos es de 122,33 s/km. Esto tiene sentido, puesto que no debiese haber un ahorro en tiempo de cruce si se tienen velocidades tan bajas.

Demora en paraderos

Como se explica en el capítulo anterior, hay una relación entre el tiempo de cruce de los buses y el tiempo que toma un bus por el hecho de detenerse en paraderos. En particular, a mayor velocidad es más el tiempo que se pierde debido al tiempo empleado en frenar y volver a tomar la velocidad de desplazamiento. Se espera entonces que el tiempo perdido por detención tenga una relación inversa con el tiempo de cruce base, que en este caso debiese ser separado para los tramos 9, 11 y 15 con respecto al resto. Esto se intenta y muestra exactamente esta relación (ver Tabla B.2) donde los valores de la tasa de aceleración es 0,946

y 0,948 utilizando los valores entregados por el modelo(13,29 y 15,37 s/det respectivamente). Sin embargo, no resulta ser significativa una de las variables de demora uniforme base, por lo que se decide modelar con una sola variable, que es un valor promedio para todos los tramos. Este valor es de 14,30 s/det.

Otra variable relevante a observar es el tiempo de servicio que, por construcción, es el mismo para todos los tramos ya que no hay variación en las condiciones físicas de transferencia de pasajeros. El parámetro base estimado es de 1,617 s/pax. Es mayor a lo visto en (Gibson et al., 2015) (1,386 s/pax) y en el modelo de Santiago (1,447 s/pax). Sin embargo en Portland existen distintos métodos de pagos de la tarifa, desde la muestra visual de un ticket al conductor como el pago mediante efectivo. Este último toma más tiempo que cualquier otro método. Como no se tiene exactamente la partición del método de pago para el caso estudiado, es razonable que el coeficiente del tiempo de servicio sea mayor en este eje que en el caso de Santiago.

Además, se incluye una variable para justificar el adelantamiento de los buses con respecto a su horario. Para esto se intenta incluir la variable de nivel de adelantamiento descrita en el capítulo de modelación contrastándolo con el adelantamiento promedio medido en segundos adelantados. Se decide dejar esta última, la cual indica que por cada segundo que el bus va adelantando, tiende a ir 0,054 s/km más lento. Es estadísticamente significativo y consistente con lo encontrado por Glick y Figliozzi (2017). Por otra parte, el coeficiente de uso de rampa es de 37,78 s/rampa, lo que afecta significativamente la demora en paraderos en caso que se utilice. Este valor es consistente con lo visto anteriormente (Albright y Figliozzi, 2012).

Demora en Intersecciones

Esta componente comprende demora excedente y uniforme. El análisis de los parámetros estimados se hace separadamente para cada clase de demora ya que la lógica que les subyace es diferente.

La especificación de la demora excedente surge de la definición de umbrales, cuya consistencia es interesante analizar. El valor final de los umbrales se obtiene restando el coeficiente de demora excedente obtenido en el modelo complementado del paso medio del período correspondiente. La Tabla 5.5 muestra esos valores para cada tramo-período con demora excedente.

Una primera verificación es que en cada tramo no haya períodos en que el paso medio supera el umbral pero no tiene asociada una variable de demora excedente. Esto se cumple bien, solo hay escasas situaciones en que hay un valor superior por un margen tan bajo que la variable respectiva resulta no significativa. Otra verificación de consistencia interna es que cuando hay demora excedente en períodos consecutivos en un mismo tramo, los umbrales correspondientes sean estables. Se puede observar en la Tabla 5.19 que así sucede, con una excepción: el período 7.40 a 8.00 en el tramo 14. Se trata del período de mayor congestión en la mañana. Esto puede explicarse porque aquí se da un flujo de autos marcadamente más intenso lo que implica que habrá un grado de saturación similar al de períodos adyacentes aún para condiciones más favorables de demora en paraderos para los buses.

Tabla 5.19: Variables mudas de demora excedente por tramo-período

Variable	Tiempo promedio	Coefficiente	Tiempo s/DE
	s/km	s/km	s/km
Demora excedente - Tramo 8 [15:20 - 15:40]	232,5	27,1	205,4
Demora excedente - Tramo 8 [17:00 - 17:20]	217,6	21,7	195,9
Demora excedente - Tramo 10 [07:40 - 8:00]	267,7	32,5	235,2
Demora excedente - Tramo 10 [11:00 - 13:00]	272,8	18,7	254,1
Demora excedente - Tramo 10 [13:20 - 14:00]	292,9	37,0	255,9
Demora excedente - Tramo 10 [15:20 - 16:00]	277,5	26,1	251,4
Demora excedente - Tramo 10 [16:40 - 17:00]	273,7	30,3	243,4
Demora excedente - Tramo 10 [17:00 - 17:20]	288,6	40,5	248,1
Demora excedente - Tramo 12 [7:40 - 8:00]	235,7	28,3	207,4
Demora excedente - Tramo 12 [8:00 - 8:20]	233,6	27,4	206,2
Demora excedente - Tramo 14 [7:20 - 8:00]	267,6	52,2	215,4
Demora excedente - Tramo 14 [7:40 - 7:40]	252,4	46,6	205,8
Demora excedente - Tramo 14 [8:20 - 8:40]	247,1	25,6	221,5
Demora excedente - Tramo 15 [7:00 - 7:20]	223,3	27,3	196,0
Demora excedente - Tramo 15 [7:20 - 7:40]	306,3	112,5	193,8
Demora excedente - Tramo 15 [7:40 - 8:00]	402,1	207,1	195,0
Demora excedente - Tramo 15 [8:00 - 8:20]	281,6	88,0	193,6
Demora excedente - Tramo 15 [8:20 - 8:40]	270,2	70,0	200,2

Otro aspecto de interés en materia de consistencia es la relación de los umbrales según tipo de prioridad. El umbral es en promedio de 218 s/km, muy similar a los 215 s/km obtenidos para Santiago en tráfico mixto. Si se descuenta de cada umbral la respectiva demora media en paraderos estimada, resulta un valor de 181 s/km, comparado a los 188 s/km obtenidos en tráfico mixto para Santiago. Es decir, hay una notable concordancia en ambas ciudades.

La demora uniforme (DU), a diferencia de la excedente, se presenta en toda intersección y en todos los períodos. Como el método que se emplea para modelarla es original y genera una gran cantidad de variables, es importante examinar con detenimiento los resultados obtenidos. Cabe recordar que se considera una demora uniforme base por tramo, o grupo de ellos, y dos clases de variables extra para ciertos tramo-períodos en que sean aplicables, que son aditivas a la base respectiva. Hay 4 variables de demora uniforme base para los 8 tramos modelados. Sus coeficientes varían entre 2,5 y 14,8 s/int. Es un rango amplio, que refleja principalmente la variedad de condiciones promedio entre tramos en materia de programación de los semáforos y de capacidad de los buses de beneficiarse de la coordinación existente. Hay 5 variables de demora uniforme extra asociadas a la aparición de demora excedente. Su duración excede entre uno a tres períodos (20 a 60 minutos), con respecto del período con demora excedente respectivo, lo que parece razonable. Los coeficientes estimados varían entre 5,06 y 16,97 s/int, un rango similar al de la demora base. Se aprecia además que hay una relación inversa de su magnitud con respecto a la de la demora uniforme base correspondiente, lo que es de toda lógica.

Por último, hay 5 variables de demora uniforme extra asociadas a condiciones desfavorables, principalmente de la programación de los semáforos, en tramo-períodos determinados. Los coeficientes estimados, que son de signo positivo, van de 5,24 a 14,34 s/int. Nuevamente, el rango es similar al de la demora base. Esto vuelve a confirmar que la programación espe-

cífica de los semáforos tiene un efecto muy importante y, por otra parte, que seguramente se está reflejando fuertemente en esta componente el efecto negativo que tienen las detenciones en paraderos sobre el aprovechamiento de la coordinación. La frecuencia de estas detenciones cambia entre períodos de manera no homogénea entre tramos, lo que contribuye a la amplitud del rango observado.

Se aprecia entonces, al igual que para Santiago, que las cuatro componentes definidas para modelar la demora uniforme juegan un papel relevante y que, en este contexto, la demora uniforme base no representa un valor promedio en torno al cual hay variaciones sino uno más cercano a su límite inferior, salvo para los servicios expreso.

Para hacerse una idea del resultado de conjunto, se hizo una comparación de los valores de la demora uniforme total por tramo-período para los servicios normales aquí estimados con los obtenidos en el estudio de Santa Rosa (Gibson et al., 2015), donde se hizo una modelación explícita de las demoras uniformes. El rango de sus valores es entre 2,5 a 22,9 s/int en Powell y de 2,5 y 22,7 s/int para el caso de Santiago.

En suma, se encuentra que existe una alta consistencia empleando la metodología empleada para modelar el sistema de Portland, con consistencias del mismo estándar aplicado para Santiago, en los valores estimados para los coeficientes del modelo. Esto permite considerar que se ha logrado una asignación confiable del paso medio de los buses a cada una de sus componentes. Además, se ha logrado modelar con esta metodología un eje que sólo tiene vías de tráfico mixto en otra ciudad.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

La primera conclusión está relacionada al objetivo de este trabajo y es la factibilidad de estimar un modelo de paso medio de los buses, identificando variables específicas para cada tipo de prioridad analizado. Esta se hizo descomponiendo la variable explicativa en sus tres componentes básicas: tiempo de cruce, demora en paraderos y demora en intersecciones a partir de información de localización automática de vehículos (AVL) y colección automática de tarifa (AFC) para distintos ejes de la ciudad de Santiago. Se evalúan tramos de tráfico mixto, 1 pista sólo bus, dos pistas sólo bus y corredor segregado de 1 pista con pista de adelantamiento en paraderos. No sólo se logra estimar un modelo, sino que este es muy consistente en sus valores, comparando internamente sus resultados y verificando externamente con la evidencia reportada en la literatura.

Se desprende que es muy importante ser capaz de modelar la demora en intersecciones distinguiendo las diferencias entre sus propias componentes. Caracterizar tanto la demora excedente a partir de la identificación del análisis de datos, como la demora uniforme, tal como demostró (Gibson et al., 2015). Este trabajo propone una forma novedosa de modelar este fenómeno basándose en variables mudas separadas en tres tipos: demoras uniformes base, demoras uniformes extras y demoras excedentes. Este enfoque surge de la falta de información específica de semáforos tales como el flujo de vehículos, el diseño de fases y reparto de verdes de las intersecciones semaforizadas. Los resultados muestran, que definir este tipo de variables es posible captar la variabilidad de la demora en intersecciones, tanto uniforme y excedente de manera muy coherente entre los tipos de vía analizados y lo reportado en la literatura. A través de un delicado análisis se logra encontrar un sentido físico a la existencia a las demoras uniformes base que representan un valor medio de la demora uniforme por tramo, separar en tres tipos las demoras uniformes extras (por existencia de demora excedente, por ventaja de servicios expresos y por configuraciones de semáforos favorables) y a la demora excedente, a partir de ciertos umbrales.

La misma metodología fue posible de reproducir para la ciudad de Portland, Oregon en donde se cuenta con información para un sólo servicio y en tramos que poseen sólo un tipo de vía (tráfico mixto). Los resultados obtenidos, muestran que es posible recoger el efecto de variables sobre el paso medio aunque los sistemas funcionen distinto, en su operación y en tipo de infraestructura. Sin embargo, el contar con sólo un servicio y buses de baja frecuencia

trae mayor variabilidad, puesto que hay que utilizar buses de un corte temporal mayor. Esto se evidencia en la variabilidad de las principales variables como el paso medio, flujo de buses, número medio de detenciones y pasajeros por bus.

Dentro de los distintos procesos que implica manejar una gran cantidad de datos, se propone una metodología para identificar buses outliers e incidentes en los ejes. Este método funciona eficientemente al comparar las observaciones de distintos días en un mismo tramo y un mismo período, pudiendo distinguir si existe un día en particular que tiene un comportamiento atípico. Al categorizar las observaciones en grupos de día-tramo-período, la detección pasa a tener más sentido, ya que las velocidades de los buses pueden variar mucho en el transcurso del día como en distintos lugares de un mismo eje. Sin embargo, un mismo tramo-período no debiese cambiar bruscamente entre distintos días de la semana, ya que los niveles de demanda de pasajero y flujos vehiculares (demanda de viajes privados) se encuentran en rangos similares. A través de la comparación de la mediana de cada día-tramo-período y la mediana de todas las observaciones del mismo tramo-período se converge a un criterio para remover observaciones. Se desprende que mientras más días se consideren, mayor es la eficiencia de este algoritmo, puesto que compara la tendencia de más días, siempre y cuando hayan suficientes observaciones por cada día-tramo-período. Esto es válido, siempre y cuando no hayan cambios importantes en las condiciones de operación en esos días.

En términos de resultados, se logra estimar un modelo general a partir de un proceso secuencial que incluyó varias iteraciones de modelos preliminares. Este proceso consiste en definir bien la separación de las tres componentes del paso medio, para así definir variables que tengan sentido con los fenómenos existentes en la operación de los buses. La consistencia entre los valores reportados en la literatura, con los coeficientes obtenidos en los modelos estimados para Santiago es notable tanto para los tiempos de cruce de cada prioridad, como demora en paraderos y existencia de demora excedente. Esto muestra que es posible llegar a valores que se aproximen con alta precisión a la realidad sólo usando el número de intersecciones por kilómetro y conociendo cuando las intersecciones cambian de plan y el valor de sus ciclos.

Este modelo pretende ser general, en el sentido de ser capaz de evaluar casi todos los tipos de prioridad en un solo modelo. También se busca el carácter de predictibilidad de este para evaluar futuros escenarios que consideren cambios en el tipo de prioridad. Esto es posible, en términos de evaluar en distintos rasgos las características de los tipos de vías. Sin embargo, los valores mostrados especialmente para la demora en intersecciones son difíciles de usar en otros ejes, debido a que representan los valores medios específicos de los ejes con los que se está trabajando.

Se extiende un análisis cuantificado para la infraestructura dedicada a buses de Santiago, que no había sido evaluada anteriormente. Ahora existe una razonable categorización de las diferencias en las tres componentes principales de la velocidad (cruce, demora en paraderos e intersecciones semaforizadas) para varias prioridades en Santiago, tal como muestra la Tabla 6.1. Este trabajo es un aporte para tener un diagnóstico más claro de las implicancias que puede llegar a tener la implementación de una u otra prioridad en algún eje de la ciudad.

Los principales resultados muestran que los corredores tienen un tiempo de cruce de 96,3 s/km, 16,5 s/km más eficientes que las pistas solo bus y 41,4 s/km más rápidos que el

Tabla 6.1: Tiempo de cruce para distintas prioridades en Santiago

Tipo de prioridad	Tiempo de cruce
Tráfico mixto	132,64 a 137,77 s/km
Pistas sólo bus	112,80 s/km
Corredor 1 pista c/adelantamiento en paraderos	96,36 s/km
Corredor 2 pistas	79,41 s/km

tráfico mixto mientras los buses están en movimiento. Esta diferencia es muy significativa en términos del paso medio. Interesante es el efecto en períodos fuera de punta, donde flujos menores generan ahorros en el tiempo de cruce tanto en pista sólo bus como tráfico mixto. Esto ocurre en corredores, sólo para servicios expresos, que son capaces de alcanzar una velocidad mayor en zonas con pocas detenciones. Es decir, que el tráfico mixto y pistas sólo bus, pueden reducir su tiempo de cruce si es que los flujos son suficientemente bajos, llevando el problema a la interacción del bus con el resto del tráfico. Esto fue posible de contrastar con los resultados de la ciudad de Portland, donde el tiempo de cruce principal para el tráfico mixto es menor al de Santiago y se observan disminuciones en su valor para ciertos tramos y períodos.

La decisión de modelar los servicios expresos por separado permitió caracterizarlos dentro de las vías prioritarias evaluadas. A través del análisis previo a los modelos fue posible detectar que efectivamente se trasladan más rápido y en ciertos casos hay un ahorro adicional al sólo hecho de detenerse menos. Este ahorro ocurre tanto para corredores y dos pistas sólo bus, pero no en tráfico mixto o 1 pista sólo bus. Por lo tanto, los beneficios esperados de servicios de esta clase estarán relacionados con el tipo de infraestructura dedicada en la cual circulan, específicamente en la directa disponibilidad de una pista de adelantamiento. Existen beneficios tanto en tiempo de cruce como en demora en intersecciones, en particular, demora uniforme.

Mientras tanto la demora en intersecciones varía bastante según las características de cada tramo. Los tramos de pista solo bus y de corredores con velocidades altas, tienen demora en intersecciones bajas. En donde hay presencia de cruce con intersecciones importantes o paraderos de alta actividad, las demoras uniformes pueden elevarse tanto en corredores, pistas solo bus y tráfico mixto. Es decir, las demoras uniformes son un factor difícil de controlar y están relacionadas con el número medio de detenciones en paraderos. Sin embargo, solo corredores y pistas solo bus con velocidades altas son capaces de mantener las demoras uniformes similares durante todo el día. Esto es bastante relevante, puesto que las demoras uniformes altas tienden a ser cuando más personas se están transportando. Una recomendación de esto es detectar los puntos donde va a haber demoras uniformes altas e identificarlos como puntos críticos en los recorridos de los buses, ya que es posible tener demoras uniformes bajas tanto en corredores, pistas solo bus y tráfico mixto.

El rango de las demoras en intersecciones tanto para Santiago como para Portland es muy similar. Esto era una hipótesis a corroborar, la cual afirma que las condiciones de tráfico y la variabilidad que se puede presentar en los tiempos consumidos en demora en intersecciones se rigen por límites físicos de la teoría de tráfico. Además, estos son similares con los presentados

por Gibson et al. (2015), en donde se modela de una manera diferente esta componente.

La demora excedente es de las componentes que más pueden afectar en el paso medio. Es capaz de reducir la eficiencia del tiempo de viaje de los usuarios enormemente y, en ciertos casos, sólo por una intersección mal diseñada. Se comprueba que los corredores no tienen existencia de este fenómeno. Hay tramos de pistas sólo bus que tampoco son afectados por esto y sus velocidades comerciales son comparables a las del corredor, aunque en unos metros más abajo eso cambie. El buen diseño que permita evitar esto en pistas sólo bus, sea con fiscalización u otras medidas puede traer beneficios en los pasos medios en términos de demora en intersecciones.

En las demoras en paraderos se verifica la relación entre tiempo perdido por detenciones y tiempo de cruce. Además, una novedad en Santiago: existe una tasa de servicio menor en zonas donde hay una demanda mayor a 20 pax/bus-km, que se debe al uso más eficiente de puertas y también a la presencia de zonas pagas. Además, se comprueba que los valores del tiempo de servicio son similares entre Santiago y Portland, siendo en este último de mayor valor debido a tener distintos métodos de pago, en especial el pago manual. Esto es interesante, ya que distintos métodos de pago pueden hacer más (in)eficiente el paso medio de buses. En particular, medidas como la implementación de smartcard en Portland o los torniquetes en la puerta de subida en Santiago van a tener un impacto directo en este coeficiente y en el paso medio final.

6.1. Recomendaciones y trabajo a futuro

Para obtener un modelo con mayor capacidad de predictibilidad, es necesario agregar más variables continuas en el análisis. Especialmente, variables explícitas de los semáforos y sus programaciones.

Los resultados obtenidos en pistas sólo bus son bastante claros en términos generales, pero como se desconoce el nivel de invasión de vehículos a la(s) pista(s), es difícil determinar el efecto neto en el paso medio de esto. Una línea interesante sería incorporar la intensidad de los planes de fiscalización en distintas pistas sólo bus y contrastar el impacto que tienen en la velocidad y en sus distintas componentes. En particular, contrastar diferencias en el tiempo de cruce y demora en intersecciones a través de evaluaciones *before/after*.

Los resultados mostrados para demora en paraderos, especialmente con la reducción del tiempo de servicio con más de 20 pax/bus-km, es algo que se puede analizar con más detalle. Especialmente, enfocar el esfuerzo en medir efectos de políticas de zonas pagas y cuantificar en detalle el efecto de estas en los pasos medios totales. También evaluar otro tipo de medidas que tengan que ver con el tiempo de servicio, como los torniquetes nuevos implementados para las subidas en los buses de Santiago.

Un punto relevante a comparar es el tiempo de cruce en los distintos tramos de Portland, en donde opera en tráfico mixto. En particular, se tiene un valor medio de tiempo cruce menor al de tráfico mixto en Santiago. Hay tres tramos que incluso están por debajo de las

pistas sólo bus. Sin embargo, se observa también que las velocidades comerciales promedio de ciertos tramos son tan altas como los tramos más rápidos de corredor. Esto indica que por ciertas características del sistema, los buses van a velocidades inesperadamente altas. Estas causas pueden ser muy bajos flujos vehiculares, coordinación y/o prioridad en semáforos, velocidades máximas alcanzadas por los buses o una combinatoria de estas. Dado que tienen implementado sistemas TSP y SCATS en sus redes de semáforos, es posible que en parte se atribuya a esto.

De los resultados obtenidos, se desprenden las siguientes recomendaciones prácticas:

- Evitar servicios expresos donde la demora excedente alcance valores que representen un alto porcentaje del paso medio.
- Incorporar dos pistas sólo bus en más zonas y que estas incluyan servicios expresos.
- Detectar los puntos en donde los corredores puedan estar sujetos a demoras en intersecciones altas y cuantificar en término de ahorro de tiempo por usuario medidas de gestión de estas.
- Considerar en los beneficios de un corredor, la estabilidad sobre las demoras en intersecciones que estos tienen.

Bibliografía

- Abkowitz, M. D. y I. Engelstein (1983). Factors affecting running time on transit routes. *Transportation Research Part A: General* 17 (2), 107–113.
- Albright, E. y M. Figliozzi (2012). Factors influencing effectiveness of transit signal priority and late-bus recovery at signalized-intersection level. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2311), 186–194.
- Baptista, A. T., E. P. Bouillet y P. Pompey (2012). Towards an uncertainty aware short-term travel time prediction using gps bus data: Case study in dublin. En: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*. IEEE, pp. 1620–1625.
- Chakroborty, P. y S. Kikuchi (2004). Using bus travel time data to estimate travel times on urban corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1870), 18–25.
- Cohen, S. (1984). Indicateurs d'allure et de consommation d'un autobus en exploitation. *Recherche transports* (1), 16–22.
- Cortés, C. E., J. Gibson, A. Gschwender, M. Munizaga y M. Zúñiga (2011). Commercial bus speed diagnosis based on gps-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (4), 695–707.
- Crout, D. (2007). Accuracy and precision of the transit tracker system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1992), 93–100.
- Daganzo, C. (1997). *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Vol. 30. Pergamon Oxford.
- de Transporte y Telecomunicaciones, M. (2012). Informe ejecutivo encuesta origen destino de viajes. SECTRA, Santiago.
- Diab, E. I. y A. M. El-Geneidy (2012). Understanding the impacts of a combination of service improvement strategies on bus running time and passengers' perception. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (3), 614–625.
- Dueker, K. J., T. J. Kimpel, J. G. Strathman y S. Callas (2004). Determinants of bus dwell time. *Journal of Public Transportation* 7 (1), 2.
- El-Geneidy, A. M. y N. Vijayakumar (2011). The effects of articulated buses on dwell and

- running times. *Journal of Public Transportation* 14 (3), 4.
- Fan, W. y Z. Gurmu (2015). Dynamic travel time prediction models for buses using only gps data. *International Journal of Transportation Science and Technology* 4 (4), 353–366.
- Feng, W. (2014). Analyses of bus travel time reliability and transit signal priority at the stop-to-stop segment level. Tesis de Ph.D., Portland State University.
- Feng, W., M. Figliozzi y R. L. Bertini (2015). Quantifying the joint impacts of stop locations, signalized intersections, and traffic conditions on bus travel time. *Public Transport* 7 (3), 391–408.
- Fernandez, R. (1996). Análisis ex post de la operación de la vía exclusiva para buses de av. grecia. Secretaría Ejecutiva.
- Fernandez, R. y E. Valenzuela (2003). A model to predict bus commercial speed. *Traffic engineering & control* 44 (2), 67–71.
- Fernández, R. (1999). Medidas de prioridad al transporte público. En: *Actas del IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Vol. 419. p. 429.
- Gibson, J., I. Baela y L. Willumsen (1989). Bus-stops, congestion and congested bus-stops. *Traffic engineering & control* 30 (6), 291–302.
- Gibson, J., M. Munizaga, C. Schneider y A. Tirachini (2015). Median busways versus mixed-traffic: Estimation of bus travel time under different priority conditions with explicit modelling of delay at traffic signals. En: *94th TRB Annual Meeting*. pp. 11–15.
- Glick, T. B., W. Feng, R. L. Bertini y M. A. Figliozzi (2015). Exploring applications of second-generation archived transit data for estimating performance measures and arterial travel speeds. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2538), 44–53.
- Glick, T. B. y M. A. Figliozzi (2017). Measuring the determinants of bus dwell time: New insights and potential data biases. Tech. rep.
- Kimpel, T., J. Strathman, R. Bertini y S. Callas (2005). Analysis of transit signal priority using archived trimet bus dispatch system data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1925), 156–166.
- Kumar, B. A., S. Mothukuri, L. Vanajakshi y S. C. Subramanian (2015). Analytical approach to identify the optimum inputs for a bus travel time prediction method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2535), 25–34.
- Levinson, H. S. (1983). Analyzing transit travel time performance. No. 915.
- Ma, Z.-L., L. Ferreira, M. Mesbah y A. T. Hojati (2015). Modeling bus travel time reliability with supply and demand data from automatic vehicle location and smart card systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2533),

17–27.

- Munizaga, M. A. y C. Palma (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin–destination matrix from passive smartcard data from santiago, chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24, 9–18.
- Muñoz, J. C. y A. Gschwender (2008). Transantiago: A tale of two cities. *Research in Transportation Economics* 22 (1), 45–53.
- Nikovski, D., N. Nishiuma, Y. Goto y H. Kumazawa (2005). Univariate short-term prediction of road travel times. En: *Intelligent Transportation Systems, 2005. Proceedings. 2005 IEEE*. IEEE, pp. 1074–1079.
- Patnaik, J., S. Chien y A. Bladikas (2004). Estimation of bus arrival times using apc data. *Journal of public transportation* 7 (1), 1.
- Potter, K., H. Hagen, A. Kerren y P. Dannenmann (2006). Methods for presenting statistical information: The box plot. *Visualization of large and unstructured data sets* 4, 97–106.
- RStudio Team (2015). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, Inc., Boston, MA.
URL <http://www.rstudio.com/>
- Schneider, C. (2013). Análisis de la influencia de distintos tipos de prioridad al transporte público y del ancho de vía a través de modelos lineales de tiempo de viaje utilizando datos del sistema de transporte público de santiago.
- Schweiger, C. L. (2003). Real-time bus arrival information systems. No. 48. *Transportation Research Board*.
- Shalaby, A. y A. Farhan (2004). Prediction model of bus arrival and departure times using avl and apc data. *Journal of Public Transportation* 7 (1), 3.
- Slavin, C., W. Feng, M. Figliozzi y P. Koonce (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., K. Dueker, T. J. Kimpel, R. Gerhart, K. Turner, P. Turner, S. Callas y D. Griffin (1999). Service reliability impacts of computer-aided dispatching and automatic vehicle location technology: A tri-met case study.
- Strathman, J. G., T. J. Kimpel, K. J. Dueker, R. L. Gerhart y S. Callas (2002). Evaluation of transit operations: Data applications of tri-met’s automated bus dispatching system. *Transportation* 29 (3), 321–345.
- Surprenant-Legault, J. y A. El-Geneidy (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.

- Tétreault, P. R. y A. M. El-Geneidy (2010). Estimating bus run times for new limited-stop service using archived avl and apc data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44 (6), 390–402.
- Tirachini, A. (2013). Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 30, 239–256.
- TriMet (2017). Trimet at-a-glance brochure. <https://trimet.org/ataglance/index.htm>.
- Zhang, L., J. Weng y Z. Chen (2014). Characteristic analysis of bus travel speed on commuting corridors based on gps data. En: *CICTP 2014: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems*. pp. 1443–1453.

Anexo A

Modelos preliminares Santiago

Tabla A.1: Modelo para corredor de 1 pistas

VARIABLES	UNIDADES	COEFICIENTE	ERROR STD.	t	SIG
Corredor 1 pista (intercepto)	s/km	95,70	4,5	21,4	***
Carmen - Demora uniforme base Tramo 6 [-]	s/int	5,40	1,1	4,8	***
Carmen - Demora uniforme base Tramos 5 y 7 [-]	s/int	7,03	1,5	4,6	***
Carmen - Demora uniforme extra Expreso Tramo 5 [17:30 - 21:00]	s/int	-4,70	1,6	-3,0	**
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00 - 10:00]	s/int	10,06	0,7	13,6	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 6 [10:00 - 13:30 y 17:30 - 20:00]	s/int	3,76	0,7	5,4	***
Carmen - Demora uniforme extra Expreso Tramo 6 [17:30 - 20:00]	s/int	-5,59	1,1	-5,3	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00 - 9:00]	s/int	-5,79	1,0	-5,8	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 7 [15:00 - 17:00]	s/int	3,45	1,1	3,0	**
Grecia - Demora uniforme base Tramo 1 y 2 [-]	s/int	11,17	1,3	8,7	***
Grecia - Demora uniforme base Tramo 3 [-]	s/int	7,03	1,4	5,2	***
Grecia - Demora uniforme base Tramo 3 Expreso [-]	s/int	14,11	2,0	7,0	***
Grecia - Demora uniforme base Tramo 4 [-]	s/int	6,08	1,4	4,2	***
Grecia - Demora uniforme base Tramo 5 y 6 [-]	s/int	-6,95	0,8	-8,8	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 1 [11:00 - 14:30]	s/int	-4,21	0,9	-4,5	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00 - 21:00]	s/int	5,14	0,7	7,0	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00 - 9:00]	s/int	3,21	0,9	3,4	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 3 [17:00 - 21:00]	s/int	9,19	0,7	12,8	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 4 [7:00 - 9:30]	s/int	10,18	1,4	7,1	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 4 Expreso [7:00 - 9:30]	s/int	-6,83	1,7	-3,9	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 4 [9:30 - 17:00]	s/int	8,13	1,0	7,9	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00 - 9:30]	s/int	4,57	0,9	4,8	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 5 [9:30 - 17:00]	s/int	12,41	0,8	15,9	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 6 [7:00 - 9:30]	s/int	12,69	1,1	12,0	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 6 Expreso [7:00 - 9:30]	s/int	-8,25	1,4	-6,0	***
Grecia - Demora uniforme extra Tramo 6 [17:00 - 21:00]	s/int	5,82	0,7	8,4	***
Detenciones corredor 1 pista	s/det	15,59	1,1	13,8	***
Tiempo de servicio base	s/pax	1,33	0,2	6,8	***
Extra tiempo de servicio [>15 pax/bus-km]	s/pax	-0,79	0,3	-3,0	**

N° observaciones : 1724

Significancia: ***: 0,001 , ** : 0,01, * : 0,05

Adj R² = 0,71

Tabla A.2: Modelo para pistas sólo bus

VARIABLES	UNIDADES	COEFICIENTE	ERROR STD.	t	SIG
Tiempo crucero pista sólo bus (intercepto)	s/km	112,80	3,8	29,3	***
Extra solo bus - Macul Tramo 1 [11:00 - 14:00 y 17:00 - 21:00]	s/km	-14,40	2,5	-5,7	***
Extra solo bus - Macul Tramo 2 [19:00 - 21:00]	s/km	-9,90	4,0	-2,5	*
Extra solo bus - Carmen Tramo 2 [19:00 - 21:00]	s/km	-15,32	3,2	-4,8	***
Extra sólo bus - Carmen Tramo 4 [10:30 - 15:30]	s/km	-15,31	2,9	-5,3	***
Macul - Demora uniforme base Tramo 1 y 3 [-]	s/int	2,92	1,1	2,5	*
Macul - Demora uniforme base Tramo 2 y 5 [-]	s/int	9,71	1,0	10,1	***
Macul - Demora uniforme base Tramo 7 [-]	s/int	12,39	0,8	16,2	***
Macul - Demora uniforme extra Tramo 2 [7:00 - 12:00]	s/int	2,84	1,0	2,8	**
Macul - Demora uniforme extra Tramo 3 [7:00 - 8:30]	s/int	10,03	2,4	4,2	***
Macul - Demora excedente Tramo 3 [7:30 - 8:00]	s/km	84,28	10,4	8,1	***
Macul - Demora excedente Tramo 3 [8:00 - 8:30]	s/km	26,38	11,0	2,4	*
Macul - Demora uniforme extra Tramo 3 [9:30 - 12:00 y 12:00 - 17:00]	s/int	3,24	0,8	4,3	***
Macul - Demora uniforme extra Tramo 5 [7:00 - 10:00]	s/int	6,56	0,9	7,0	***
Macul - Demora excedente Tramo 5 [7:30 - 8:00]	s/km	59,82	8,2	7,3	***
Macul - Demora excedente Tramo 5 [8:00 - 8:30]	s/km	25,94	8,3	3,1	**
Macul - Demora uniforme extra Tramo 7 [7:00 - 10:00]	s/int	2,32	0,9	2,6	**
Macul - Demora excedente Tramo 7 [7:30 - 8:00]	s/km	121,48	8,5	14,3	***
Macul - Demora excedente Tramo 7 [8:00 - 9:00]	s/km	73,85	7,2	10,3	***
Macul - Demora uniforme extra Tramo 7 [10:00 - 12:30 y 20:00 - 21:00]	s/int	-2,97	0,6	-4,6	***
Carmen - Demora uniforme base Tramo 1 y 2 [-]	s/int	11,83	0,9	12,9	***
Carmen - Demora uniforme base Tramo 3 [-]	s/int	3,50	0,8	4,1	***
Carmen - Demora uniforme base Tramo 4 [-]	s/int	6,61	1,4	4,9	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 1 [17:00 - 21:00]	s/int	-2,35	0,5	-4,5	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 2 [14:00 - 17:00]	s/int	4,08	1,2	3,3	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 3 [17:30 - 20:00]	s/int	7,36	0,7	11,3	***
Carmen - Demora uniforme extra Tramo 4 [18:00 - 20:00]	s/int	11,72	1,1	11,1	***
Matta - Demora uniforme base Tramo 8 [-]	s/int	7,97	1,0	8,2	***
Matta - Demora uniforme base Tramo 8 Expreso [-]	s/int	-7,43	0,7	-10,0	***
Matta - Demora uniforme extra Tramo 8 [7:30 - 8:30]	s/int	3,67	1,0	3,8	***
Matta - Demora uniforme extra Tramo 8 [12:00 - 17:00]	s/int	6,51	0,7	8,9	***
Matta - Demora uniforme extra Tramo 8 [17:00 - 20:00]	s/int	9,92	0,9	10,6	***
Matta - Demora excedente Tramo 8 [18:00 - 18:30]	s/km	14,79	6,9	2,1	*
Matta - Demora excedente Tramo 8 [18:30 - 19:00]	s/km	38,49	7,0	5,5	***
Matta - Demora excedente Tramo 8 [19:00 - 19:30]	s/km	20,39	6,9	2,9	**
Detenciones	s/det	10,98	1,2	9,2	***
Tiempo de servicio	s/pax	2,14	0,2	10,6	***

Significancia: ***: 0,001 , ** : 0,01, * : 0,05

Nº observaciones : 1580

Adj R² = 0,84

Anexo B

Modelos preliminares Powell

Tabla B.1: Modelo Powell sin tramos 9, 11 y 15

Variables	Unidades	Coficiente	Error std.	t	Sig
Tiempo de crucero (intercepto)	s/km	127,08	4,7	27,0	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 8 [19:20 - 21:00]	s/km	-23,71	4,5	-5,3	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 12 [19:40 - 21:00]	s/km	-26,15	4,7	-5,6	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 13 [19:00 - 21:00]	s/km	-23,05	4,0	-5,8	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 14 [19:00 - 21:00]	s/km	-27,56	3,9	-7,1	***
Demora uniforme base Tramo 8	s/int	14,60	2,9	5,1	***
Demora uniforme base Tramos 10 , 12 y 13	s/int	11,55	1,8	6,6	***
Demora uniforme base Tramos 14 y 15	s/int	5,89	1,5	3,9	***
Demora uniforme extra - Tramo 8 [12:20 - 17:40]	s/int	7,95	2,4	3,3	***
Demora excedente - Tramo 8 [15:20 - 15:40]	s/km	27,69	8,9	3,1	**
Demora excedente - Tramo 8 [17:00 - 17:20]	s/km	21,32	8,9	2,4	*
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 9:00]	s/int	5,10	1,5	3,4	***
Demora excedente - Tramo 10 [07:40 - 8:00]	s/km	32,28	9,5	3,4	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 19:40]	s/int	8,16	1,2	6,9	***
Demora excedente - Tramo 10 [11:00 - 13:00]	s/km	19,03	4,2	4,5	***
Demora excedente - Tramo 10 [13:20 - 14:00]	s/km	37,15	6,5	5,7	***
Demora excedente - Tramo 10 [15:20 - 16:00]	s/km	26,22	6,5	4,0	***
Demora excedente - Tramo 10 [16:40 - 17:00]	s/km	29,98	8,8	3,4	***
Demora excedente - Tramo 10 [17:00 - 17:20]	s/km	40,50	8,8	4,6	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [17:20 - 19:40]	s/int	5,22	1,3	4,0	***
Demora uniforme extra - Tramo 12 [7:40 - 9:20]	s/int	11,17	3,0	3,8	***
Demora excedente - Tramo 12 [7:40 - 8:00]	s/int	28,83	9,9	2,9	**
Demora excedente - Tramo 12 [8:00 - 8:20]	s/km	26,82	9,8	2,7	**
Demora uniforme extra - Tramo 13 [15:00 - 17:20]	s/int	9,15	2,2	4,1	***
Demora uniforme extra - Tramo 14 [7:20 - 9:00]	s/int	10,10	2,7	3,7	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:20 - 8:00]	s/km	52,14	10,6	4,9	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:40 - 8:00]	s/km	46,65	10,7	4,4	***
Demora excedente - Tramo 14 [8:20 - 8:40]	s/int	25,82	11,4	2,3	*
Adelantado	s/km-sad	0,03	0,0	1,6	
Detenciones	s/det	13,17	1,6	8,4	***
Demanda total	s/pax	1,69	0,4	4,4	***
Uso de rampa	s/rampla	37,62	8,2	4,6	***
Significancia: ***: 0,001 , ** : 0,01, *: 0,05		Nº observaciones : 1025	Adj R ² = 0,74		

Tabla B.2: Modelo Powell diferenciando tiempo por detención en paraderos

Variables	Unidades	Coefficiente	Error std.	t	Sig
Tiempo de crucero (intercepto)	s/km	127,5	4,7	26,9	***
Tiempo de crucero extra - Tramos 9, 11 y 15	s/km	-25,8	4,4	-5,8	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 8 [19:20 - 21:00]	s/km	-23,7	4,6	-5,1	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 11 [18:00 - 21:00]	s/km	-10,9	3,5	-3,1	**
Tiempo de crucero extra - Tramo 12 [19:40 - 21:00]	s/km	-26,3	4,8	-5,5	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 13 [19:00 - 21:00]	s/km	-23,2	4,1	-5,6	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 14 [19:00 - 21:00]	s/km	-27,6	4,0	-6,9	***
Tiempo de crucero extra - Tramo 15 [7:00 - 9:20]	s/km	19,3	9,0	2,1	*
Demora uniforme base Tramo 8	s/int	14,0	2,8	4,9	***
Demora uniforme base Tramos 9 y 11	s/int	1,9	1,4	1,3	
Demora uniforme base Tramos 10 , 12 y 13	s/int	11,2	1,7	6,5	***
Demora uniforme base Tramos 14 y 15	s/int	5,6	1,4	3,9	***
Demora uniforme extra - Tramo 8 [12:20 - 17:40]	s/int	7,6	2,5	3,1	**
Demora excedente - Tramo 8 [15:20 - 15:40]	s/km	27,5	9,2	3,0	**
Demora excedente - Tramo 8 [17:00 - 17:20]	s/km	21,8	9,2	2,4	*
Demora uniforme extra - Tramo 9 [9:20 - 11:00]	s/int	9,2	2,5	3,7	***
Demora uniforme extra - Tramo 9 [11:20 - 17:20]	s/int	14,3	1,6	9,2	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 9:00]	s/int	5,3	1,5	3,5	***
Demora excedente - Tramo 10 [07:40 - 8:00]	s/km	32,5	9,9	3,3	**
Demora uniforme extra - Tramo 10 [07:20 - 19:40]	s/int	8,3	1,2	7,0	***
Demora excedente - Tramo 10 [11:00 - 13:00]	s/km	19,0	4,4	4,3	***
Demora excedente - Tramo 10 [13:20 - 14:00]	s/km	37,1	6,7	5,5	***
Demora excedente - Tramo 10 [15:20 - 16:00]	s/km	26,2	6,7	3,9	***
Demora excedente - Tramo 10 [16:40 - 17:00]	s/km	30,1	9,2	3,3	**
Demora excedente - Tramo 10 [17:00 - 17:20]	s/km	40,4	9,2	4,4	***
Demora uniforme extra - Tramo 10 [17:20 - 19:40]	s/int	5,4	1,3	4,1	***
Demora uniforme extra - Tramo 12 [7:40 - 9:20]	s/int	11,1	3,1	3,6	***
Demora excedente - Tramo 12 [7:40 - 8:00]	s/int	27,7	10,3	2,7	**
Demora excedente - Tramo 12 [8:00 - 8:20]	s/km	27,0	10,2	2,7	**
Demora uniforme extra - Tramo 13 [15:00 - 17:20]	s/int	9,2	2,3	4,0	***
Demora uniforme extra - Tramo 14 [7:20 - 9:00]	s/int	10,1	2,8	3,6	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:20 - 8:00]	s/km	52,2	11,0	4,7	***
Demora excedente - Tramo 14 [7:40 - 8:00]	s/km	46,2	11,0	4,2	***
Demora excedente - Tramo 14 [8:20 - 8:40]	s/int	25,9	11,8	2,2	*
Demora uniforme extra - Tramo 15 [7:00 - 9:00]	s/int	16,9	6,6	2,6	**
Demora excedente - Tramo 15 [7:00 - 7:20]	s/km	27,6	12,5	2,2	*
Demora excedente - Tramo 15 [7:20 - 7:40]	s/km	112,8	12,5	9,0	***
Demora excedente - Tramo 15 [7:40 - 8:00]	s/km	207,4	12,5	16,6	***
Demora excedente - Tramo 15 [8:00 - 8:20]	s/km	88,5	12,5	7,1	***
Demora excedente - Tramo 15 [8:20 - 8:40]	s/int	70,1	12,5	5,6	***
Demora uniforme extra - Tramo 15 [16:00 - 18:00]	s/int	9,6	2,1	4,6	***
Adelantado	s/km-sad	0,1	0,0	2,7	**
Detenciones - tramos 8, 10, 12, 13 y 14	s/det	13,3	1,5	8,6	***
Detenciones tramos 9, 11 y 15	s/det	15,4	1,6	9,7	***
Demanda total	s/pax	1,66	0,3	4,8	***
Uso de rampa	s/rampla	37,5	7,2	5,2	***
Significancia: ***: 0,001 , ** : 0,01, *: 0,05		Nº observaciones : 1633		Adj R ² = 0,82	