



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

**ANÁLISIS MICROECONÓMICO DE POLÍTICAS PARA COMBATIR LA  
CONGESTIÓN VIAL**

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

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

**HUGO EMILIO SILVA MONTALVA**

**PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO BASSO SOTZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANTONIO GSCHWENDER KRAUSE  
SERGIO JARA DÍAZ  
LUIS RIZZI CAMPANELLA**

**SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL Y MAGÍSTER CS. ING.  
MENCIÓN TRANSPORTE  
POR: HUGO SILVA M.  
FECHA: 16/04/2010  
PROF. GUÍA: Sr. LEONARDO BASSO S.

## ANÁLISIS MICROECONÓMICO DE POLÍTICAS PARA COMBATIR LA CONGESTIÓN VIAL

El objetivo de la tesis es hacer un análisis microeconómico de políticas de transporte orientadas a combatir la congestión, con el fin de hacer un análisis comparativo de los beneficios e implicancias de cada una de ellas que permita obtener conclusiones y presentar una base para entregar recomendaciones de política. Las políticas en estudio son tarificación vial al transporte privado, subsidio al transporte público y uso de vías exclusivas. Para esto se desarrolla un modelo microeconómico que captura las principales características de un sistema de transporte con congestión cruzada compuesto por dos modos: auto y bus. Luego, se implementa computacionalmente el mismo, de modo de poder analizar el modelo numéricamente.

El modelo consiste en un corredor en el que las personas, y por lo tanto los orígenes y destinos de los viajes, están distribuidas a lo largo de él y pueden circular los dos modos de transporte mencionados. Por la naturaleza del análisis, el modelo adquiere la forma de un problema de optimización en el cual el planificador controla las variables de servicio del sistema de transporte público, la estructura tarifaria de los modos y la disposición de la infraestructura vial. Los principales elementos que se incluyen en el modelo son: demanda de viajes por modo elástica, interacción entre modos de transporte incluyendo congestión en la vialidad y en paraderos, heterogeneidad de la población y costos de los usuarios y los operadores.

Se resuelve el problema de optimización en un software adecuado bajo diferentes escenarios, caracterizados por las políticas de transporte que se implementan. Los parámetros usados se obtienen de estudios oficiales realizados en Santiago. También se realiza una extensión a dos períodos y un análisis de sensibilidad a supuestos y parámetros.

De los resultados se observa que todas las medidas en análisis, en presencia de congestión, generan un beneficio social importante y relativamente similar. Además, ninguna de las políticas resulta ser regresiva, pues las personas de menores ingresos se ven más beneficiadas (o menos perjudicadas) que las de mayor ingreso. La aplicación de vías exclusivas es la medida que mayor beneficio entrega por sí sola y beneficia directamente a la gran mayoría de la población. El subsidio óptimo se basa en tarifas de bus negativas por lo que resulta impracticable; cuando se restringe el subsidio a tarifas no negativas, es decir, un subsidio sólo al costo operacional, resulta óptimo subsidiarlo por completo pero el beneficio se reduce a un 40 % del que se logra con el subsidio óptimo. La tarificación a los automóviles, sin reutilizar los ingresos, perjudica a los usuarios aún cuando disminuye la congestión, pero cuando se aplica en conjunto con subsidio al transporte público se beneficia a la mayoría de las personas y de paso disminuye la cantidad de subsidio comparada con la situación sin tarificación vial. De hecho, las diferentes medidas resultan ser complementarias por lo tanto la política que las integra todas es la que mayor beneficio provoca para la sociedad.

Otros resultados importantes muestran que disminuir el tiempo de subida al bus de los pasajeros -mediante, por ejemplo, pago con tarjeta electrónica- genera un beneficio considerable y similar al de las medidas antes mencionadas, mientras que aumentar la capacidad de los paraderos agregando sitios de detención produce beneficios ampliamente superiores a todas las otras medidas que se estudian en esta tesis. Ambos beneficios, en todo caso, se logran sólo si van de la mano con un rediseño importante del transporte público, por ejemplo, respecto del tamaño de los buses.

El análisis de políticas en un marco de interacción entre transporte público y privado resulta ser diferente en cuanto a resultados, implicancias y conclusiones de políticas que los análisis de mercados aislados. Por esto, el modelo planteado constituye una base sólida para futuros análisis de políticas que sean aún más cercanos a la realidad y que incorporen dimensiones no abordadas hasta ahora.

*A mi abuelo Hugo.*

# Índice General

Índice General	I
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VIII
Lista de definición de símbolos	X
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	4
<b>2. Revisión bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1. Tarificación por congestión . . . . .	5
2.2. Diseño óptimo de servicios de transporte público: modelación . . . . .	10
2.2.1. Valor de los recursos consumidos por usuarios ( $VRC_U$ ) . . . . .	11
2.2.2. Valor de los recursos consumidos por operadores ( $VRC_{OP}$ ) . . . . .	15
2.2.3. Costos por externalidades, dimensión espacial, desbalance de la demanda y demanda elástica . . . . .	17
2.3. Diseño óptimo de servicios de transporte público: resultados . . . . .	20
2.4. Integración entre diseño óptimo de transporte público, tarificación por congestión y algunas medidas de prioridad al transporte público . . . . .	24
2.4.1. Enfoques de modelación . . . . .	24
2.4.2. Demanda . . . . .	27
2.4.3. Costos . . . . .	28
2.4.4. Heterogeneidad . . . . .	29
2.4.5. Congestión . . . . .	29
2.4.6. Resultados . . . . .	31
2.5. Síntesis y comentarios . . . . .	32

<b>3. El modelo</b>	<b>35</b>
3.1. Elementos básicos del modelo . . . . .	36
3.2. Demanda . . . . .	37
3.3. Tiempos de transporte . . . . .	40
3.4. Función de costos . . . . .	45
3.5. Función objetivo . . . . .	45
3.6. Planteamiento y restricciones generales . . . . .	46
3.7. Escenarios . . . . .	50
3.8. Extensión a dos períodos . . . . .	55
3.9. Síntesis y comentarios . . . . .	57
<b>4. Parámetros e implementación computacional del modelo</b>	<b>59</b>
4.1. Parámetros . . . . .	60
4.1.1. Parámetros generales . . . . .	60
4.1.2. Parámetros de demanda . . . . .	62
4.1.3. Parámetros de tiempos de transporte . . . . .	69
4.1.4. Operación en paraderos . . . . .	70
4.1.5. Factor de equivalencia bus-auto . . . . .	72
4.1.6. Capacidad vía . . . . .	73
4.1.7. Costos de operación . . . . .	74
4.1.8. Resumen . . . . .	77
4.2. Implementación del modelo . . . . .	78
4.2.1. Codificación . . . . .	79
4.2.2. Estudio del modelo computacional . . . . .	82
4.3. Síntesis y comentarios . . . . .	90
<b>5. Aplicación central: resultados y análisis</b>	<b>92</b>
5.1. Introducción . . . . .	92
5.2. Variables . . . . .	94
5.2.1. Variables de diseño del transporte público . . . . .	94
5.2.2. Tarifas y subsidios . . . . .	98
5.3. Resultados de niveles de servicio . . . . .	102
5.3.1. Velocidad y tiempo de viaje . . . . .	103
5.3.2. Tiempos de transporte en bus . . . . .	104
5.3.3. Capacidad y grado de saturación paraderos . . . . .	106
5.3.4. Flota . . . . .	107
5.4. Particiones modales . . . . .	108
5.5. Bienestar . . . . .	112
5.6. Síntesis y conclusiones . . . . .	121

<b>6. Análisis de sensibilidad</b>	<b>125</b>
6.1. Introducción . . . . .	125
6.2. Demanda . . . . .	126
6.3. Largo de viaje . . . . .	131
6.4. Tiempo de espera . . . . .	137
6.5. Tiempo por aceleración, frenado y tiempo muerto . . . . .	138
6.6. Tiempos de subida . . . . .	140
6.7. Demoras por cola e internas . . . . .	142
6.8. Número de sitios del paradero . . . . .	144
6.9. Influencia del tiempo de operación en paraderos sobre los automóviles . . . . .	147
6.10. Distribución de la población según ingreso . . . . .	149
6.11. Extensión a dos períodos . . . . .	152
6.11.1. Sin diferenciación intertemporal de tarifas . . . . .	153
6.11.2. Diferenciación intertemporal de tarifas . . . . .	155
6.12. Síntesis y comentarios . . . . .	156
<b>7. Conclusiones y líneas futuras de investigación</b>	<b>160</b>
7.1. Síntesis y conclusiones . . . . .	160
7.2. Líneas futuras de investigación . . . . .	165
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>167</b>
<b>Apéndices</b>	<b>171</b>
<b>A. Caracterización de los estratos</b>	<b>171</b>
<b>B. Comparación de funciones tipo BPR y raíz</b>	<b>173</b>
<b>C. Condiciones de primer orden para las tarifas</b>	<b>175</b>
<b>D. Códigos</b>	<b>179</b>
<b>E. Tabla de resultados aplicación base</b>	<b>200</b>

# Índice de Figuras

2.1. Tarificación por congestión en transporte privado. . . . .	6
2.2. Beneficios y pérdidas de la tarificación por congestión en transporte privado. . . . .	7
2.3. Red modelo Verhoef y Small (2004). . . . .	9
2.4. Ejemplo de demanda uniforme. Fernández et al. (2005). . . . .	18
2.5. Ejemplo de demanda homogénea. Fernández et al. (2005). . . . .	19
2.6. Ejemplo de demanda con rutas alimentadoras. Fernández et al. (2005). . . . .	19
2.7. Tarifa y subsidio óptimo en transporte público. . . . .	22
3.1. Función $\epsilon(f)$ . . . . .	44
4.1. Partición modal agregada observada, adaptada a dos modos. Período punta. . . . .	65
4.2. Partición modal observada adaptada a dos modos desagregada por estrato. Período punta. . . . .	66
4.3. Partición modal agregada observada, adaptada a dos modos. Período fuera de punta. . . . .	66
4.4. Partición modal observada adaptada a dos modos desagregada por estrato. Período fuera de punta. . . . .	67
4.5. Regresión lineal de factores de equivalencia versus capacidad del bus. . . . .	73
4.6. Regresión lineal al parámetro CC de la función de gasto. . . . .	75
4.7. Regresión lineal al parámetro CV de la función de gasto. . . . .	76

4.8. Representación gráfica de la restricción de demanda bajo R1. Flujo Mixto. . . . .	84
4.9. Representación gráfica de la restricción de demanda bajo R1, R2 y R3. Flujo Mixto. . . . .	86
4.10. Representación gráfica de la restricción de demanda bajo V1, V2 y V3. Vías Exclusivas. . . . .	87
4.11. Representación gráfica de la restricción de demanda bajo V1, V4, V5 y V6. Vías Exclusivas. . . . .	88
4.12. Representación gráfica de la restricción de demanda bajo S1, S2 y S3 . . . . .	89
5.1. Frecuencia y tamaño de buses óptimo por escenario. . . . .	95
5.2. Distanciamiento óptimo de paraderos por escenario. . . . .	98
5.3. Velocidades comerciales de cada modo por escenario. . . . .	103
5.4. Demora por paradero según escenario. . . . .	105
5.5. Partición modal por escenario. . . . .	108
5.6. Partición modal por escenario. Estrato bajo (1). . . . .	109
5.7. Partición modal por escenario. Estrato medio-bajo (2). . . . .	110
5.8. Partición modal por escenario. Estrato medio (3). . . . .	110
5.9. Partición modal por escenario. Estrato medio-alto (4). . . . .	111
5.10. Partición modal por escenario. Estrato alto (5). . . . .	111
5.11. Variación del bienestar social con respecto al escenario base. . . . .	112
5.12. Variación del excedente de los consumidores y del resultado financiero del sector público con respecto al escenario base. . . . .	114
5.13. Variación del EC individual por subsidio óptimo. . . . .	116
5.14. Variación del EC individual por tarificación vial. . . . .	117
5.15. Variación del EC individual por tarificación vial y subsidio. . . . .	118
5.16. Variación del EC individual por vías exclusivas. . . . .	119
5.17. Variación del EC individual por subsidio de tarifas no negativas. . . . .	120



5.18. Variación del EC individual por subsidio, tarificación vial y vías exclusivas. . . . .	121
6.1. Beneficio social de políticas para demandas media y baja. . . . .	127
6.2. Frecuencia y tamaño de buses para demanda total alta (1.800 pax/hr-km). . . . .	129
6.3. Comparación de la Partición modal del bus para disminuciones del largo de viaje. . .	132
6.4. Beneficio social de políticas para largo de viaje de 5 km. . . . .	133
6.5. Frecuencia y tamaño de buses para largo de viaje 15 km. . . . .	134
6.6. Partición modal del bus para aumento del largo de viaje. . . . .	135
6.7. Beneficio social de políticas para largo de viaje de 15 km. . . . .	135
6.8. Beneficio social de políticas para diversos valores de $t_p$ . . . . .	139
6.9. Distancia promedio entre paraderos para diferentes valores de $t_p$ . . . . .	140
6.10. Frecuencias óptimas para distintos tiempos marginales de subida. . . . .	141
6.11. Frecuencias óptimas para variaciones del supuesto de demoras en paradero. . . . .	143
6.12. Tamaño de buses óptimos para variaciones del supuesto de demoras en paradero. . .	143
6.13. Comparación de beneficio de políticas según diseño de paraderos. . . . .	144
6.14. Frecuencia y tamaño de buses óptimos según diseño de paradero en escenario de mayor bienestar social. . . . .	145
6.15. Comparación de beneficio de políticas incluyendo aumentar en un sitio los paraderos.	146
6.16. Frecuencia y tamaño de buses óptimos según supuesto sobre $\epsilon$ en escenario de políticas tarifarias. . . . .	148
6.17. Comparación de beneficio de políticas según supuesto sobre $\epsilon$ . . . . .	149
6.18. Distribución de la población según estrato socioeconómico. Aplicación central. . . .	150
6.19. Distribución de la población según estrato socioeconómico. Sensibilidad. . . . .	150
6.20. Beneficio social de políticas para variación en la distribución de la población. . . .	151
6.21. Variación del EC individual con la política de tarificación. Distribución de sensibilidad.	152

6.22. Frecuencias y tamaño de buses para modelo de dos períodos. . . . .	154
6.23. Beneficio social de políticas para modelo de dos períodos. . . . .	155
B.1. Comparación de velocidades para funciones tipo BRP y raíz. . . . .	173

# Índice de Tablas

4.1. Distribución de los hogares según estrato . . . . .	61
4.2. Parámetros modelo de partición modal . . . . .	63
4.3. Parámetros modelo de partición modal con unidades compatibles . . . . .	64
4.4. Partición modal observada desagregada por período y estrato . . . . .	64
4.5. Partición modal observada desagregada por período y estrato . . . . .	65
4.6. Valores de los atributos observados para la calibración de las constantes modales . . . . .	67
4.7. Constantes modales del automóvil por período y estrato . . . . .	69
4.8. Parámetros función de capacidad de paraderos . . . . .	70
4.9. Parámetros función de demora interna en paraderos . . . . .	70
4.10. Parámetros función de demora interna en cola en paraderos . . . . .	71
4.11. Factores de equivalencia bus-auto según tipo de bus . . . . .	72
4.12. Parámetros de la función de gasto según capacidad del bus . . . . .	74
4.13. Parámetros agrupados de la función de gasto según capacidad del bus . . . . .	75
4.14. Resumen de los parámetros adoptados para la aplicación central. . . . .	77
5.1. Tarifas por escenario . . . . .	99
5.2. Subsidios por escenario . . . . .	101
5.3. Tiempos de espera y acceso en cada escenario. . . . .	105

5.4. Tiempos de espera y acceso en cada escenario. . . . .	106
5.5. Capacidad y grado de saturación paraderos. . . . .	106
5.6. Tamaño de flota por escenario. . . . .	107
6.1. Comparación de frecuencias óptimas para distintos valores de $\theta$ . . . . .	138
6.2. Comparación de tamaños de bus óptimos para distintos valores de $\theta$ . . . . .	138
A.1. Rango de ingreso e ingreso medio de cada estrato . . . . .	171
A.2. Valores del tiempo por estrato y modo. Período punta. . . . .	171
A.3. Valores del tiempo por estrato y modo. Período fuera de punta. . . . .	172

# Lista de definición de símbolos

## 1. Variables

$f$	Frecuencia.	[buses/hr]
$f_t$	Frecuencia del período $t$ .	[buses/hr]
$k$	Capacidad buses.	[pax]
$n$	Fracción de la capacidad dedicada a los buses.	[ ]
$p$	Número de paraderos equiespaciados por km.	[ ]
$P_a$	Cobro por congestión al automóvil.	[\$/km]
$P_a^t$	Cobro por congestión al automóvil en el período $t$ .	[\$/km]
$P_b$	Tarifa bus.	[\$/viaje]
$P_b^t$	Tarifa bus en el período $t$ .	[\$/viaje]
$Y_a$	Demanda modo auto.	[pax/hr-km]
$Y_a^t$	Demanda modo auto en el período $t$ .	[pax/hr-km]
$Y_b$	Demanda modo bus.	[pax/hr-km]
$Y_b^t$	Demanda modo bus en el período $t$ .	[pax/hr-km]

## 2. Funciones

$b$	Factor de equivalencia bus-auto.
$cost_{auto}$	Costo de un viaje en auto.
$cost_{bus}$	Costo de un viaje en bus.
$cost_m$	Costo de un viaje en modo $m$ .
$d_i$	Demora interna en paraderos.
$d_q$	Demora por cola en paraderos.
$t_{acc}$	Tiempo de acceso modo bus.
$t_e$	Tiempo de espera modo bus.
$t_{mov}$	Tiempo de viaje en movimiento.
$tg_m$	Tiempo generalizado de viaje en modo $m$ .
$B$	Tamaño de flota.
$B_t$	Número de buses que opera en el período $t$ .
$BS$	Bienestar social.
$C_p$	Capacidad de un paradero.
$EC$	Excedente de los consumidores.
$G$	Gasto de operación del sistema de buses.
$U_m^i$	Utilidad modo $m$ estrato $i$ .
$\epsilon$	Fracción del tiempo de operación en paraderos que perciben los automóviles.
$\pi$	Resultado financiero que resulta de la operación de buses y la recaudación de tarifas y cobros.

### 3. Parámetros

$a$	Tasa de ocupación vehículo particular.	[pax/veh]
$a_{i1}$	Parámetro de la función demora interna en paraderos.	[]
$a_{i2}$	Parámetro de la función demora interna en paraderos.	[]
$a_p$	Parámetro de la función capacidad de un paradero.	[]
$a_{q1}$	Parámetro de la función demora por cola en paraderos.	[]
$a_{q2}$	Parámetro de la función demora por cola en paraderos.	[]
$a_{q3}$	Parámetro de la función demora por cola en paraderos.	[]
$a^t$	Tasa de ocupación vehículo particular en el período $t$ .	[pax/veh]
$b_{i1}$	Parámetro de la función demora interna en paraderos.	[]
$b_{i2}$	Parámetro de la función demora interna en paraderos.	[]
$b_p$	Parámetro de la función capacidad de un paradero.	[]
$b_{q1}$	Parámetro de la función demora por cola en paraderos.	[]
$b_{q2}$	Parámetro de la función demora por cola en paraderos.	[]
$c_i$	Parámetro de la función demora interna en paraderos.	[]
$c_p$	Parámetro de la función capacidad de un paradero.	[]
$c_{0a}$	Costo de operación de un automóvil.	[US\$/km]
$d_p$	Parámetro de la función capacidad de un paradero.	[buses/hora]
$l$	Largo de viaje, un período.	[km]
$l^P$	Largo de viaje, período punta.	[km]
$l^{FP}$	Largo de viaje, período fuera de punta.	[km]
$m$	Pendiente de la función $b(k)$ .	[auto/bus-pax]
$n$	Coefficiente de posición de la función $b(k)$ .	[auto/bus]
$p_b$	Amortización de un bus.	[\$/veh-día]
$p_h$	Salario de un conductor de bus.	[\$/conductor-día]
$p_m$	Precio generalizado por metro cuadrado de terminal.	[\$/ $m^2$ -día]
$t_p$	Tiempo de despeje más tiempo muerto en paraderos.	[sg]
$t_{sb}$	Tiempo marginal de subida al bus.	[sg/pax]
$A_v$	Parámetro de la función de tiempo en movimiento.	[(km/hr) <sup>2</sup> ]
$Ad$	Gastos fijos por administración en función G.	[\$/día]
$B_v$	Parámetro de la función de tiempo en movimiento.	[(km/hr) <sup>2</sup> ]
$C$	Capacidad de la vía.	[veq/hora]
$C_b^{kt}$	Costo operacional de un bus de capacidad $k$ en el período $t$ .	[\$/vehkm.]
$CC_0$	Parámetro de la función de gasto.	[US\$/día-bus]
$CC_1$	Parámetro de la función de gasto.	[US\$/día-bus-pax]
$CV_0$	Parámetro de la función de gasto.	[US\$/veh-km]
$CV_1$	Parámetro de la función de gasto.	[US\$/veh-km-pax]

$H_t$	Duración del período $t$ .	[horas]
$H^P$	Duración de período punta.	[horas]
$H^{FP}$	Duración de período fuera de punta.	[horas]
$L_t$	Largo del recorrido del servicio de buses en el período $t$ .	[km]
$M$	Metros cuadrados de terminal.	[ $m^2$ ]
$N_t$	Número de ciclos recorridos durante el período $t$ .	[]
$V_{cam}$	Velocidad de caminata.	[km/hr]
$Y$	Demanda total de viajes. Modelo de un período.	[pax/hr-km]
$Y^i$	Pasajeros que pertenecen al estrato $i$ .	[pax/hr-km]
$Y^P$	Demanda total de viajes en período punta.	[pax/hr-km]
$Y^{FP}$	Demanda total de viajes en período fuera de punta.	[pax/hr-km]
$\lambda_i$	Utilidad marginal del ingreso de los individuos del estrato $i$ .	[utiles/\$]
$\theta$	Fracción asociada al tiempo de espera.	[ ]
$\theta_{cost}^i$	Utilidad marginal del costo de viaje para el modo $m$ , estrato $i$ .	[utiles/\$]
$\theta_m^i$	Constante modal. Modo $m$ , estrato $i$ .	[utiles]
$\theta_{tg,m}$	Utilidad marginal del tiempo generalizado del modo $m$ .	[utiles/min]



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El incremento de la población y el desarrollo socio-económico de las ciudades incide directamente en la forma de vida en cada una de ellas. Con el aumento de estos factores, la demanda por transporte aumenta considerablemente. Dentro de este contexto, emerge la congestión como una de las externalidades más importantes generada por el transporte urbano y el manejo de ella es determinante en la calidad de vida de los habitantes. La pregunta relevante es, entonces, cómo lidiar con la congestión desde el punto de vista del bienestar de la sociedad.

Mirando el problema bajo un criterio de eficiencia en el uso del espacio, tradicionalmente se han dado dos enfoques, no necesariamente sustitutos, para combatir la congestión: uno es hacer menos atractivo el uso del automóvil mediante medidas como tarificación vial, políticas de estacionamientos, prohibición de circular en hora peak y otros; el segundo es darle prioridad a medios de transporte más eficientes en cuanto al uso del espacio, como lo son los sistemas de transporte público (por ejemplo, los buses).

La tarificación por congestión, que sigue el método Pigouviano de cobrar un impuesto para forzar la internalización de la externalidad negativa producida por un agente y así alcanzar el óptimo social, ha sido analizada de diferentes maneras, entre las cuales destacan modelos de congestión, modelos de colas, modelos que consideran equilibrio en la red, y aquellos que consideran todo tipo de configuraciones de segundo mejor, como tarificar sólo algunos arcos o usar un cordón para cobrar la entrada a una determinada área. La literatura de tarificación por congestión es revisada por Small y Verhoef (2007) y Tsekeris y Voβ(2008).

Por otro lado, también existen muchos estudios acerca del diseño óptimo de servicios de trans-

porte público programado (Mohring, 1972; Jansson, 1980 y 1984), que buscan determinar las frecuencias, tamaño de los vehículos y espaciamiento de los paraderos que minimizan el costo total. Además, existen investigaciones de los efectos en el diseño óptimo del transporte público de incorporar el costo de los usuarios en el costo total, o equivalentemente, minimizar costo social en vez de costo operacional. Uno de los principales resultados obtenidos en este ámbito es que cuando se tienen en consideración los costos de los usuarios y el de los operadores, el servicio que minimiza el costo total requiere subsidio. Esto ocurre por la existencia de economías de escala, o el llamado “efecto Mohring” donde al aumentar la demanda, aumenta la frecuencia lo que beneficia a todos los usuarios. Un análisis de tarificación óptima basado en costos sociales decrecientes es hecho por Jara-Díaz (2007). Además una revisión detallada del tema de diseño óptimo de transporte público es realizada por Jara-Díaz y Gschwender (2003a).

Ambos enfoques han sido ampliamente cubiertos en la literatura aunque de manera separada, pero en la realidad de los sistemas de transporte urbano los dos efectos se dan de manera conjunta: transporte público y transporte privado interactúan entre sí de variadas formas. Por ejemplo, en el tránsito se da que los autos congestionan a los buses y viceversa; la operación en paraderos demora no sólo a buses sino que a autos también. Más importante aún, las personas al momento de viajar deben decidir si lo hacen en transporte público, en automóvil o en otro medio tomando en consideración las variables de servicio de cada uno. Por estos motivos resulta fundamental considerar las características de ambos modos conjuntamente y la interacción entre ellos para ser realista y, por ende, obtener conclusiones de políticas que sean útiles y aplicables.

Trabajos que consideren de manera completa, en un modelo conjunto, tarificación vial y optimización de servicios programados de transporte público son escasos. Publicaciones relevantes en este sentido han sido llevadas a cabo por Mohring (1979), Small (1983), Viton (1983) y Huang (2000), sin embargo ninguno de estos trabajos integra todas las variables; algunos no permiten la optimización del transporte público y otros modelan la interacción de ambos modos de manera incompleta. Un aspecto fundamental que no ha sido considerado en todos los trabajos es que la demanda por modo no es una constante sino que responde frente a cambios en las variables de servicio. En un trabajo más reciente, Basso et al. (2010) plantean un modelo que intenta recoger los aspectos fundamentales de estos trabajos anteriores y optimizar todas las variables relevantes, sin embargo, posee bastantes supuestos simplificadorios y funciones poco realistas, tales como homogeneidad en el ingreso, funciones de congestión lineales y un modelo de elección discreta determinístico.

Lo que se pretende realizar en esta tesis es generar un modelo microeconómico que permita concluir con mejores fundamentos acerca de qué políticas son recomendables para combatir la congestión. Para hacer esto se plantea un problema de optimización que recoge de manera más completa que lo existente en la literatura, los aspectos microeconómicos y tecnológicos que están detrás del sistema de transporte urbano; se evalúa cada alternativa de política a través de una resolución numérica del problema de optimización. Las políticas a evaluar son básicamente: tarificación vial,

subsidio al transporte público, uso de vías exclusivas y combinaciones de ellas.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de la tesis es poder concluir acerca de políticas de transporte, especialmente en relación al beneficio que entrega cada una y las consecuencias de implementarlas. Para hacer esto se llevan a cabo dos etapas: (1) desarrollar un modelo microeconómico realista, que permita realizar un análisis de sensibilidad completo y que capture las principales características tecnológicas de sistemas de transporte mixtos e, (2) implementarlo computacionalmente de manera de poder estudiar, evaluar y entender las implicancias de diferentes políticas para combatir la congestión vial. Es de particular interés medir el bienestar social, el excedente de los consumidores y variables que indican el nivel de servicio tales como frecuencia del transporte público, velocidades de operación, capacidad de los buses, tiempos de caminata y rendimiento de los paraderos entre otros.

Otros objetivos más específicos son:

- Modelar la etapa de partición modal de la manera más ajustada a la realidad posible incorporando heterogeneidad (en las preferencias e ingreso) y aleatoriedad en el comportamiento de los usuarios.
- Modelar dos períodos de forma conjunta para poder recoger el hecho de que existen períodos de alta y baja demanda y en ambos se utilizan los mismos buses.
- Modelar correctamente la congestión y la interacción entre buses y autos, incluyendo la operación, congestión y capacidad de los paraderos.
- Modelar adecuadamente los costos tanto de los usuarios como de los operadores de transporte público.
- Evaluar y comparar la mayor cantidad posible de escenarios de políticas de transporte mediante la resolución del problema de optimización asociado a cada uno de ellos.
- Obtener la proporción de capacidad vial óptima a dedicar al transporte público si se sigue una política de vías exclusivas.
- Recomendar acerca de políticas para combatir la congestión.

### 1.3. Estructura de la tesis

La primera parte de esta tesis corresponde a una revisión de la literatura existente que tenga relación directa con los objetivos de ésta. En el capítulo 2 se examinan trabajos que analizan el diseño óptimo del transporte público e investigaciones que traten el tema de la tarificación por congestión, ambas separadamente. Además se revisan los trabajos más importantes, que en modelos mixtos, hagan algún análisis de las políticas en estudio. A partir de los modelos revisados en esta sección, se identifican los elementos que son esenciales de incluir en la modelación y se construye una base para desarrollar el modelo microeconómico que se requiere en esta tesis.

Luego de esta revisión se procede a plantear el modelo completo, detallando cada una de sus componentes, supuestos y enfoques utilizados. En el capítulo 3 se presenta el modelo teórico que se propone para evaluar y estudiar los efectos e implicancias de las políticas de transporte que se desea analizar.

En el capítulo 4, se detallan los parámetros utilizados para el modelo y se explica la implementación computacional de éste, a fin de estudiar, evaluar y entender las implicancias de diferentes políticas para combatir la congestión vial.

El siguiente paso corresponde a usar esta herramienta configurada por el modelo, los parámetros y la codificación, de la cual se pueden obtener los resultados de las aplicaciones y presentarlos de manera clara y precisa. En el capítulo 5 se presentan los resultados de la aplicación central que corresponde a la puesta en práctica del modelo planteado en el capítulo 3 utilizando los parámetros detallados en el capítulo 4. Es denominada central ya que es la aplicación sobre la cual se basa la tesis. En este capítulo se realiza un análisis profundo de dichos resultados.

El resto de las aplicaciones se realizan a modo de análisis de sensibilidad para ver principalmente como cambian los resultados si se modifican algunos parámetros y supuestos. Los resultados principales de este análisis se presentan en el capítulo 6, lo que permite concluir, de manera más robusta, acerca de la bondad que las diferentes políticas alcanzan.

En el capítulo 7, se presentan las conclusiones generales más importantes de la tesis junto con la descripción de las líneas futuras de investigación que se pueden seguir.

## Capítulo 2

# Revisión bibliográfica

En la literatura se puede encontrar cuantiosa información acerca de medidas para hacer menos atractivo el uso del automóvil, entre las cuales destaca la tarificación vial por congestión cuya justificación teórica es fuerte, y muchos trabajos acerca de diseño óptimo de servicios de transporte público. Pero ambos tipos de trabajos se centran principalmente en sistemas en los que opera el modo en estudio sin demasiada consideración por la interacción con otros modos. Existen pocos trabajos que integren de alguna manera políticas de desincentivo al uso del automóvil, optimización de transporte público y medidas de gestión como vías exclusivas; o que consideren de manera completa la interacción que existe entre ambos modos.

En esta revisión bibliográfica se trata la literatura de tarificación por congestión en la primera sección. Posteriormente, se realiza lo mismo con la literatura de diseño óptimo de servicios de transporte público en dos secciones, la primera orientada a la modelación y la segunda a los resultados que se han obtenido con algunos de los modelos revisados. Luego se revisan trabajos que han integrado de alguna manera la interacción entre modos diferentes y que incluyan políticas de gestión para combatir la congestión vial. En cada caso se extraen y se comentan los principales resultados obtenidos y los aspectos más relevantes para el desarrollo de la tesis. Finalmente se realiza una síntesis y comentarios generales respecto de la revisión bibliográfica poniendo especial énfasis en indicar cuáles son las principales carencias de la literatura, identificando así los que serán las contribuciones metodológicas de esta tesis.

### 2.1. Tarificación por congestión

Según la teoría económica, una externalidad está presente cuando el bienestar de un consumidor o las posibilidades de producción de una firma son afectadas por las acciones de otro agente en

la economía. La congestión es una externalidad negativa que existe en el mercado de transporte y corresponde a que un usuario que ingresa a una vía aumenta el tiempo de viaje de todo el resto de los usuarios, pero no percibe estos tiempos adicionales como costo propio.

La presencia de una externalidad negativa genera que el costo percibido por los usuarios sea menor al costo marginal social y es conocido que el máximo bienestar social se alcanza cuando el precio es igual al costo marginal total. Para ilustrar lo que ocurre se hacen las siguientes definiciones:

- $C(V)$  es el costo privado, es decir, el costo que percibe un usuario cuando ingresa a una vía con flujo  $V$ . Es una función convexa.
- $V \cdot C(V)$  corresponde al costo total, también llamado costo social.
- El costo marginal total o costo marginal social,  $CMgS$  es, por definición, la derivada del costo social. De acuerdo a las definiciones, corresponde a  $C(V) + V \cdot \frac{\partial C}{\partial V}$ . Como  $C(V)$  es una función convexa, es directo que el costo marginal social es mayor que el costo privado.
- El costo medio es simplemente la división entre el costo total y la cantidad de usuarios, es decir,  $CMe = \frac{V \cdot C(V)}{V} = C(V)$ . Se puede notar que el costo medio total es, obviamente, igual al costo privado.

Para solucionar el problema, Pigou (1920) propuso un cobro igual a la diferencia entre el costo marginal social y el costo privado (llamada costo marginal externo) que permite alcanzar el óptimo social. Esta idea aplicada al transporte privado es bien tratada por Jara-Díaz (2007) y la representación gráfica que realiza del caso particular de transporte privado se presenta a continuación.

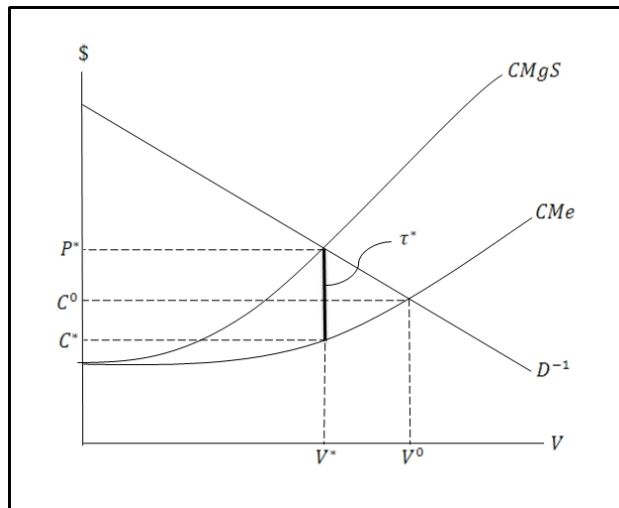


Figura 2.1: Tarificación por congestión en transporte privado.

En la figura 2.1 están representadas las curvas de costo medio, costo marginal social y la función de demanda inversa ( $D^{-1}$ ). En ausencia de tarifa por congestión, se da el equilibrio donde viajan  $V^0$  personas percibiendo un costo medio  $C^0$ . Lo óptimo es que viajen  $V^*$  personas (intersección del costo marginal social y la función de demanda inversa) y para esto debe cobrarse la diferencia entre el costo privado y el social en ese punto, representado en la figura por  $\tau^*$ .

De la figura, al aplicar la tarifa óptima por congestión, se puede deducir lo siguiente:

- Los usuarios que se mantienen viajando ( $V^*$ ) enfrentan un menor grado de congestión ya que el costo privado es menor ( $C^* < C^0$ ), pero tienen un precio generalizado mayor ya que deben pagar la tarifa óptima ( $P^* = C^* + \tau^* > C^0$ ).
- Existen pérdidas asociadas al consumo debido a que hay usuarios que dejan de viajar ( $V^0 - V^*$ ).
- El nivel óptimo de congestión no es igual a cero.

En la siguiente figura se pueden observar gráficamente las ganancias y pérdidas que resultan de la tarificación óptima.

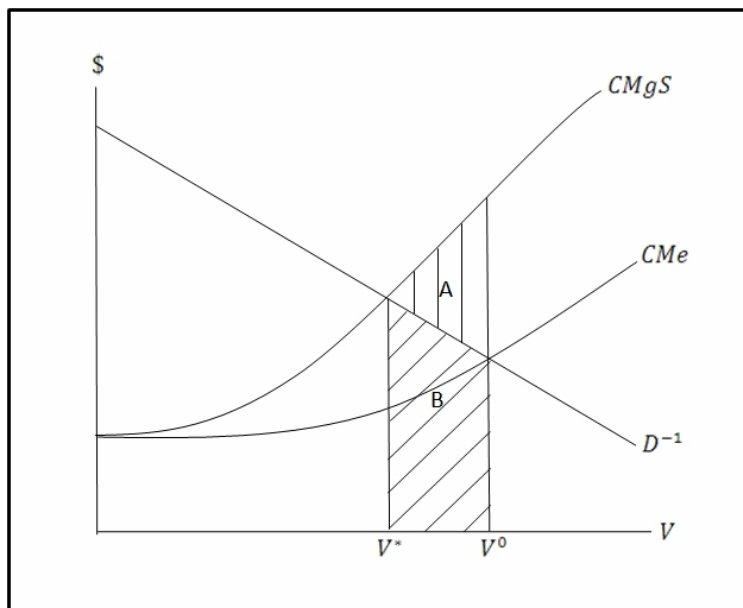


Figura 2.2: Beneficios y pérdidas de la tarificación por congestión en transporte privado.

El ahorro en costos por menor congestión corresponde a la suma de A y B. Las pérdidas por viajes no realizados son el área marcada como B. La diferencia de bienestar social es la resta entre

los ahorros y pérdidas y es igual al área representada por A. Por este motivo hay un aumento de bienestar social, pero la distribución al usar un impuesto de Pigou es tal que el agente que se beneficia es el que recolecta el cobro por congestión. Dado esto, y antes de que se haga algo con los ingresos, el bienestar social va a aumentar pero el excedente de los consumidores va a disminuir, por lo tanto la implementabilidad política de la tarificación óptima por congestión se ve comprometida. Así, es importante destacar que la aceptación que tenga esta medida depende directamente del destino que se tenga para el dinero recolectado, ya que difícilmente los usuarios del sistema de transporte urbano van a apoyar una medida que no los beneficia directamente.

Más allá de los aspectos distributivos, la justificación teórica acerca de por qué la tarificación es necesaria es clara, pero de inmediato nace otra pregunta, ¿es posible llevar a cabo esta tarificación en una vía, en una red, en una ciudad? La respuesta es que, en general, no se puede implementar la tarificación óptima ya que es impracticable cobrar en cada arco de la red la tarifa en cada horario. La implementabilidad práctica de la medida también es un factor determinante.

Por esto es que se han analizado muchos tipos de modelos para tarificación entre los cuales destacan modelos de congestión, modelos de colas y modelos que consideran el equilibrio en una red. Además, se han estudiado muchos sistemas de tarificaciones de segundo mejor que en algunos países se aplican, las que incluyen tarificación de algunos arcos, tarificación de cordones, pistas con tarificación, etc. Complementariamente, ha sido estudiada en cuanto a factibilidad, eficiencia, generación de recaudaciones y aceptabilidad en varias partes del mundo, incluyendo muchas ciudades europeas. Revisiones importantes en el tema de tarificación por congestión son hechas por: Small y Verhoef (2007) que, entre otras cosas, se refieren a la tarificación por congestión de primer mejor, a la tarificación de segundo mejor por aspectos de red, de horario y de heterogeneidad y a la tarificación vial que se ha puesto en práctica en algunas ciudades; y por Tsekeris y Voß (2008) que revisan y describen los avances metodológicos en el diseño y evaluación de esquemas de tarificación vial.

Con respecto a la tarificación que se puede llevar a cabo en la práctica, el efecto de considerar que no toda la red se puede tarificar y que los usuarios son heterogéneos, Verhoef y Small (2004) hacen un trabajo muy sugerente con resultados importantes a tener en consideración. Analizan varios tipos de tarificación (privada y pública, de primer y de segundo mejor) en una red congestionada. El análisis está hecho en términos de beneficios sociales, de beneficios de usuarios y uso de las rutas. La red considerada es la que se muestra en la figura 2.3.



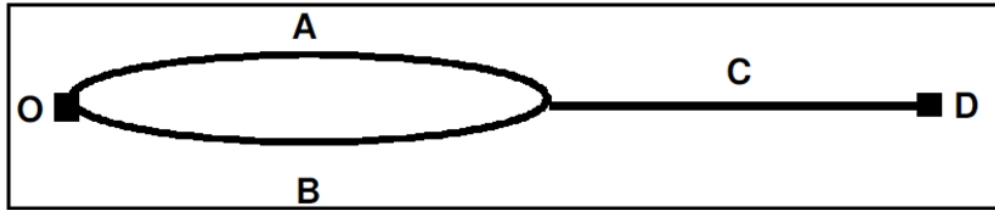


Figura 2.3: Red modelo Verhoef y Small (2004).

Un punto central de este trabajo es que existe heterogeneidad de los usuarios representada de las siguientes maneras: los valores del tiempo ( $\alpha$ ) tienen una distribución en la población y cada usuario con cierto valor del tiempo tiene su función  $D_\alpha$  (decreciente) de demanda inversa. La heterogeneidad de los usuarios complica por el hecho de que, en la práctica, sólo es factible cobrar la misma tarifa a los usuarios a pesar de que tengan distinto valor del tiempo, lo que genera ruido en los beneficios de la medida.

En esta investigación se comparan 7 regímenes de tarificación: sin tarifa (EU, que se refiere a equilibrio de usuario) más la combinación que resulta de tarificar pública o privadamente con la posibilidad de tarificar toda la red, uno de los arcos paralelos y el arco en serie. Tarificación pública se refiere a que maximiza el bienestar social y tarificación privada, que maximiza las ganancias. La notación para las tarificaciones públicas es la siguiente: tarificar toda la red se le denomina FB (ya que es un primer mejor en el sentido que se tarifica toda la red, pero se cobra lo mismo independiente del valor subjetivo del tiempo), tarificación de un arco paralelo está representado por la sigla SBPL y tarificación del arco en serie, por la sigla SBSL.

Los principales resultados de las simulaciones y análisis de sensibilidad hechos en el trabajo son:

- SBPL genera un cuarto del bienestar social que el escenario de FB y las tarifas son menores.
- Bajo FB la pérdida de excedente de los consumidores es menor para la gente de mayor VST.
- Bajo SBPL los únicos usuarios que se benefician directamente de la medida son los de valores del tiempo alto y los que pierden más excedente son los del medio.
- Si se tiene el sistema de una alternativa tarificada y la otra no, entonces es más eficiente un operador público que tarifique la mayoría de la capacidad a que un privado tarifique una parte pequeña de la capacidad.
- Los resultados sugieren que las ganancias o pérdidas relativas de eficiencia (con respecto a FB) de la tarificación de segundo mejor están probablemente sobreestimadas si se ignora la existencia de un arco en serie de flujo mixto.

- Para ver cómo variaban los resultados con respecto al VST se reconstruyó la situación base con una distribución uniforme del valor del tiempo y con un valor único. De esto se obtuvo que la tarificación de un arco paralelo se desempeña considerablemente peor cuando se considera un valor del tiempo único, lo que implica que ignorar la heterogeneidad puede llevar a subestimar la eficiencia de la política.

No se revisa más literatura con relación a tarificación por congestión por que no aporta demasiado al planteamiento teórico del modelo microeconómico que se desea proponer en esta tesis, principalmente porque se analiza un corredor aislado en el cual hay una tarificación de primer mejor en el sentido temporal y espacial.

## 2.2. Diseño óptimo de servicios de transporte público: modelación

En el mercado del transporte los usuarios juegan un rol doble ya que además del evidente rol de consumidores que tienen, proveen su propio tiempo como insumo para el proceso productivo. En el transporte privado el único agente que participa es el usuario que actúa como productor y consumidor, pero en el caso del transporte público se integra un nuevo agente: el operador del sistema de transporte. Por este motivo el papel de productor lo juega tanto el usuario como el agente a cargo de proveer el sistema de transporte público. Los dos tipos de costos (operacional y de tiempo) son incurridos, en este caso, por agentes distintos.

Diseñar de la mejor manera posible el transporte público es fundamental para que éste sea visto como una verdadera alternativa al transporte en vehículos de baja tasa de ocupación, y así poder disminuir la congestión que ocurre en la vialidad. Los distintos modos de modelar y llevar a cabo la optimización se diferencian, principalmente, en dos cosas: las variables que se consideran en la optimización y qué tan bien representados en la modelación están los agentes involucrados (usuarios, operadores, etc).

Dentro de las posibles variables de optimización se puede considerar: frecuencia ( $f$ ), capacidad de los vehículos ( $k$ ), número de paraderos ( $p$ ), tarifas y espaciamiento entre líneas junto con la estructura de rutas (por ejemplo, directas o en corredores) cuando se considera la dimensión espacial.

En cuanto a la modelación de los usuarios y, especialmente cómo son descritos sus costos, se puede ver, entre otros aspectos, variaciones en la forma en que los tiempos (viaje, espera, acceso) están representados en la función de costos o en la valoración de los individuos por los atributos; por ejemplo, se puede considerar valores de los tiempos fijos para todos, o valores de los tiempos como funciones de otras variables relevantes en la optimización.

Otro factor importante en estos modelos es si se considera demanda elástica o demanda paramétrica. Para efectos de esta revisión se examina en detalle los modelos para demanda paramétrica y hacia el final se exponen algunas implicancias de considerar demanda elástica. Cuando la demanda es paramétrica la función objetivo corresponde a minimizar el valor de los recursos consumidos totales que son los percibidos por los operadores, los percibidos por los usuarios y los que incurre la sociedad debido a externalidades. En su forma general (Jara-Díaz y Gschwender, 2003a) se puede representar como:

$$VRC = VRC_{OP} + VRC_U + VRC_X \quad (2.1)$$

Donde  $VRC_{OP}$  representa el valor de los recursos consumidos por los operadores,  $VRC_U$  el de los consumidos por los usuarios y  $VRC_X$  el de los consumidos por la sociedad como externalidades. Estos valores están en unidad monetaria dividido por unidad de tiempo (por ejemplo en \$/hr). A continuación se explica cómo han sido modeladas en la literatura cada una de las componentes principales del proceso de optimización y qué supuestos se han adoptado.

### 2.2.1. Valor de los recursos consumidos por usuarios ( $VRC_U$ )

El valor de los recursos consumidos por los usuarios, si se considera únicamente los tiempos, una demanda paramétrica o inelástica y los valores de los tiempos dados, es de la siguiente forma:

$$VRC_U = P_w t_w Y + P_v t_v Y + P_a t_a Y \quad (2.2)$$

Donde  $t_w$ ,  $t_v$  y  $t_a$  son los tiempos de espera, viaje y acceso respectivamente mientras que  $P_w$ ,  $P_v$ ,  $P_a$  son los valores sociales del tiempo de espera, viaje y acceso.  $Y$  es la demanda, que representa la cantidad de usuarios del sistema en el período de análisis (típicamente en pax/hr). Si los tiempos fuesen constantes, el valor de los recursos consumidos por los usuarios no incidirían en la solución del problema, mientras que si son variables juegan un rol fundamental. A continuación se detalla cómo ha sido tratado cada uno de estos tiempos en la literatura, de las expresiones más simples a las más generales.

#### (a) Tiempo de espera ( $t_w$ ).

Mohring (1972, 1976) supone, en su primer modelo, que el tiempo de espera es igual a la mitad del intervalo en tiempo entre los vehículos, que viene de asumir una llegada uniforme de los pasajeros

a los paraderos y los vehículos operando con frecuencia regular. Como el intervalo corresponde al inverso de la frecuencia, el tiempo de espera queda representado por la siguiente expresión:

$$t_w = \frac{1}{2f} \quad (2.3)$$

Este supuesto es adoptado en la mayoría de los modelos de optimización de transporte público: está presente en los tres modelos hechos por Jansson (1980, 1984), en los trabajos realizados por Kocur y Hendrickson (1982), Chang y Schonfeld (1991) y en el primer modelo planteado por Jara-Díaz y Gschwender (2003a).

Oldfield y Bly (1988) proponen que el tiempo de espera es una fracción  $\epsilon$ , no necesariamente igual a un medio de la frecuencia y que el tiempo de espera depende también de la tasa de ocupación del vehículo ( $\phi$ ). Este último supuesto viene de pensar en la congestión de pasajeros, donde la tasa de ocupación afecta la probabilidad de que un pasajero pueda subir al bus. Si el vehículo va con una tasa de ocupación cercana al 100 %, puede que no sea posible abordarlo y por ende haya que esperar el siguiente, con lo que aumenta el tiempo de espera. Considerando esto se tiene en forma general:

$$t_w = t_w(f, \phi) \quad (2.4)$$

Un nuevo aporte en la modelación es hecho por Jara-Díaz y Gschwender (2003a) quienes extienden lo planteado por Oldfield y Bly (1988), haciendo que el tiempo de espera sea también función de la demora no programada promedio<sup>1</sup>  $d(c_d)$ . La idea tras esto es incluir que cuando los buses circulan con un programa fijo efectivamente se espera un tiempo producto de la demora no programada. Se asume implícitamente que los vehículos circulan de acuerdo a un horario pre-establecido o a intervalos constantes. Así se establece una expresión más general para el tiempo de espera:

$$t_w = t_w(f, \phi, d(c_d)) \quad (2.5)$$

## (b) Tiempo de viaje ( $t_v$ ).

En el primer modelo de Mohring y en el modelo utilizado por Evans y Morrison (1997) el tiempo de viaje es asumido constante por lo que no tiene un papel en la optimización. Sin embargo en el

---

<sup>1</sup>Demora no programada es la demora adicional que es imposible de programar. Generalmente ocurre por efectos de congestión o eventos perjudiciales como, por ejemplo, accidentes. Está fuertemente asociada a la fiabilidad del sistema.

segundo modelo de Mohring, en los tres modelos planteados por Jansson (1980, 1984) y en los dos modelos de Jara-Díaz y Gschwender se modela una ruta circular de largo  $L$  en la cual los pasajeros están distribuidos a lo largo de ella y viajan una distancia  $l$ . Esto implica que el tiempo de viaje no es más que una fracción del tiempo de ciclo:

$$t_v = \frac{l}{L} \cdot t_c \quad (2.6)$$

**(c) Tiempo de ciclo ( $t_c$ ).**

En los tres modelos planteados por Jansson (1980, 1984), en el primer modelo de Jara-Díaz y Gschwender (que es una extensión de Jansson) y en el modelo de Oldfield y Bly se asume que el tiempo de ciclo tiene dos componentes: tiempo en movimiento y tiempo detenido. El tiempo en movimiento es constante ( $T$ ) y el tiempo detenido es igual al tiempo que está detenido el vehículo por la subida y bajada de un pasajero ( $t$ ) multiplicado por el número de pasajeros que aborda y baja de cada bus, que es igual a la fracción  $Y/f$ . Así se tiene que la expresión para el tiempo de ciclo es:

$$t_c = t_c(f) = T + t \cdot \frac{Y}{f} \quad (2.7)$$

En el segundo modelo de Mohring se plantea que el tiempo en movimiento está compuesto por un valor constante de tiempo en movimiento más un tiempo por aceleración y frenado en paraderos. Esta modelación asume que este último es el producto del tiempo de aceleración y frenado en un paradero ( $t_p$ ), el número de paraderos ( $p$ ) y la probabilidad de detenerse<sup>2</sup> ( $P$ ). Entonces, el tiempo de ciclo depende del número de paraderos directamente y también a través de la probabilidad de detenerse en un paradero, quedando,

$$t_c = t_c(f, p) = T + t_p \cdot p \cdot P + t \cdot \frac{Y}{f} \quad (2.8)$$

En el segundo modelo de Jara-Díaz y Gschwender se extiende lo realizado por Mohring (1972, 1976) tomando en consideración, además, la posible congestión entre buses y la congestión entre pasajeros.

La congestión entre buses se refiere a que mientras mayor es la frecuencia más buses hay circulando, lo que provoca que haya más congestión vehicular y los buses se afectan unos a otros en

---

<sup>2</sup>La probabilidad de que un cierto número de personas ( $r$ ) aborden en un paradero está dada por una distribución Poisson de parámetro  $\mu$ , lo que da,  $P(r) = e^{-\mu} \mu^r / r!$ . La probabilidad de que el bus pare ( $P$ ) es 1 menos la probabilidad de que nadie esté en el paradero:  $P = 1 - e^{-\mu}$ .

dos sentidos: en la circulación (visión clásica de congestión) y en la operación de paraderos (pueden estar detenidos dos o más buses simultáneamente y un pasajero tarda más en abordar). Por este motivo el tiempo en movimiento, hasta ahora fijo, pasa a ser función de la frecuencia y el tiempo detenido por la subida y bajada de un pasajero ( $t$ ) también pasa a depender de la frecuencia. Lo que hacen los autores es plantear la dependencia de manera general sin especificar formas funcionales.

La congestión entre pasajeros tiene un efecto similar sobre el tiempo detenido por subida y bajada de un pasajero, mientras más pasajeros haya en el bus, mayor es el tiempo que se ocupa en subir y bajar. La expresión general es de la siguiente forma:

$$t_c = t_c(f, p, \phi) = T(f) + t_p \cdot p \cdot P + t(f, \phi) \cdot \frac{Y}{f} \quad (2.9)$$

**(d) Tiempo de acceso ( $t_a$ ).**

Tanto en los modelos de Jansson, como en el primero de Mohring y en el primero de Jara-Díaz y Gschwender el tiempo de acceso es constante. Como en el segundo modelo de Mohring y en el segundo de Jara-Díaz y Gschwender los paraderos están equiespaciados, el tiempo de acceso es función del número de paraderos y de la velocidad de caminata ( $v_a$ ). Si se asume que los orígenes y destinos de los pasajeros están uniformemente distribuidos en la ruta, en promedio los pasajeros caminan un cuarto de la distancia entre paraderos ( $L/4p$ ) como acceso y la misma distancia como egreso. Con estas consideraciones se llega a la función:

$$t_a = t_a(p) = \frac{L}{2 \cdot p \cdot v_a} \quad (2.10)$$

Este tiempo de acceso corresponde al tiempo de caminar en la ruta para llegar a un paradero. Si se considera un área servida, debe sumarse el tiempo de acceso a la ruta.

**(e) Demora no programada, riesgo y valores de los tiempos.**

Kraus (1991) desarrolla un modelo de tarificación con la frecuencia tratada como un parámetro exógeno, pero en el cual introduce el efecto de hacinamiento dentro del vehículo mediante un valor del tiempo de viaje dependiente de la tasa de ocupación del vehículo. Esto es adoptado en el segundo modelo de Jara-Díaz y Gschwender.

Evans y Morrison (1997) incluyen dos nuevas variables al costo generalizado del viaje en este tipo de análisis: demora no programada ( $d$ ) y riesgo de accidente ( $r$ ). Cada uno de estos términos está acompañado por la respectiva valoración  $P_d$  y  $P_r$ .

Siguiendo este enfoque, en el segundo modelo de Jara-Díaz y Gschwender se incluye en el valor de los recursos consumidos por los usuarios el término  $P_r \cdot r(f, c_r, k, \frac{L}{t_r(f)}, d(c_d))$  donde la función  $r$  representa el riesgo que enfrentan los usuarios y es valorado a un precio  $P_r$ . La función  $r$  es creciente con respecto a  $f$  ya que mientras más buses haya mas riesgo de accidente hay y es decreciente con  $c_r$  debido a que esto es, precisamente, el costo por reducir el riesgo. La dependencia de  $k$  es porque mientras más grande es el vehículo, menos severos son las consecuencias del accidente para los pasajeros. También depende de la velocidad comercial ( $L$  dividido por el tiempo en movimiento) ya que mientras mayor sea la velocidad a la cual ocurre el accidente más severas son las consecuencias, y depende también de la demora no programada porque mientras más exigente sea el horario a cumplir mayor es la probabilidad de que ocurran accidentes.

### 2.2.2. Valor de los recursos consumidos por operadores ( $VRC_{OP}$ )

La forma más simple de considerar el valor de los recursos consumidos por los operadores es la multiplicación del costo de operar un bus por el número de buses ( $B$ ). Si se está modelando un sistema cíclico la flota mínima necesaria puede calcularse como el producto de la frecuencia y el tiempo de ciclo, quedando entonces en función de las variables que se consideren relevantes para el tiempo de ciclo como se describe en el punto anterior.

Mohring en sus modelos y Jansson en sus primeros dos modelos, modelan el costo de los operadores de la manera más simple: considerando el costo de operar un bus constante ( $c$ ) con lo que se obtiene una expresión para el valor de los recursos consumidos por los operadores como se muestra en la ecuación 2.11.

$$VRC_{OP} = B \cdot c \quad (2.11)$$

Jansson en su tercer modelo y Jara-Díaz y Gschwender en su primero consideran el costo de operar un bus como una función (lineal) de la capacidad del bus, utilizando la expresión

$$VRC_{OP} = B \cdot c(k) \quad (2.12)$$

Oldfield y Bly (1988) modelan el valor de los recursos consumidos por los operadores de manera muy similar. La diferencia es que lo consideran proporcional a los vehículos kilómetros en vez de a la flota. Evidentemente la función  $c(k)$  en esta modelación tiene distintos parámetros al tratarse de distintas unidades, pero siempre el valor de los recursos consumidos por los operadores  $VRC_{OP}$  está en unidad monetaria dividido por unidad de tiempo.

Evans y Morrison (1997) extienden el concepto agregando dos nuevos términos, los costos de alcanzar cierto nivel de riesgo ( $c_r$ ) y los de alcanzar cierto nivel de demora no programada ( $c_d$ ).

A la extensión hecha por Evans y Morrison (1997), Jara-Díaz y Gschwender (2003a) agregan el gasto por reducir las externalidades ( $c_x$ ). Para ellos el valor de los recursos consumidos por los operadores queda definido por:

$$VCR_{OP} = f \cdot t_c(f, p, \phi) \cdot c(k) + c_r + c_d + c_x \quad (2.13)$$

En un análisis de los costos de los operadores en un corredor de buses, Fernández et al. (2005) consideran una función de gasto más desagregada en cuanto a variables que se presenta en la siguiente ecuación.

$$G = A + p_m \cdot M + p_b \cdot B + p_h \cdot H + \sum_t C_b^k \cdot B_t \cdot L_t \cdot N_t + \pi \cdot \bar{Y} + C_r \cdot t_d \cdot \bar{Y} \quad (2.14)$$

Donde  $A$  son los gastos fijos por administración, los gastos por terminales son el producto entre la cantidad de metros cuadrados de terminal ( $M$ ) y su precio generalizado ( $p_m$ ) (en \$/m<sup>2</sup>-día), el gasto por adquisición de vehículos es el número de vehículos ( $B$ ) multiplicado por la amortización de un bus ( $p_b$ ) (en \$/veh-día), el gasto por conductores es igual al número de conductores ( $H$ ) por el salario ( $p_h$ ) expresado en \$/conductor-día más la remuneración que obtienen por pasajero transportado ( $\pi$ ) multiplicado por el número de pasajeros que transporta ( $\bar{Y}$ ),  $C_r$  (en \$/veh-hr) es gasto de combustible y mantención por unidad de tiempo detenido en los paraderos,  $t_d \cdot \bar{Y}$  el tiempo total detenido en los paraderos,  $B_t \cdot L_t \cdot N_t$  los vehículos kilómetros de un período  $t$  y  $C_b^k$  el gasto en combustible, lubricantes, neumáticos y costos variables de mantención para un vehículo de capacidad  $k$ .

En síntesis, a pesar de que existen diferentes formas de modelar los costos de los operadores, todos los autores nombrados modelan el valor de los recursos consumidos ( $VCR_{OP}$ ) en las mismas unidades: dinero por unidad de tiempo. La desagregación hecha por Fernández et al. (2005) es bastante razonable ya que efectivamente existen gastos por terminales, por conductores, por adquisición y otros, pero modelar los costos de una manera más simple (ecuación 2.13) no significa que se desprecien estos gastos sino que se incorporan implícitamente.

Es al momento de modelar varios períodos, donde el planteamiento hecho por Fernández et al. (2005) es particularmente adecuado, ya que se hace cargo de manera correcta de los aspectos importantes: existen gastos comunes que no dependen de la cantidad ni duración de los períodos sino que del total de buses que se opera y los costos operacionales varían de acuerdo a los períodos. Jansson (1980, 1984) para extender el modelo a dos períodos hace un análisis de costo incremental



de agregar un bus en período punta y fuera de punta y asume que las frecuencias son las mismas para ambos períodos lo que sólo aplica en casos particulares.

### 2.2.3. Costos por externalidades, dimensión espacial, desbalance de la demanda y demanda elástica

- Costos por externalidades ( $VCR_X$ )

Los costos en los que incurre la sociedad por externalidades del sistema de transporte público son variados. Oldfield y Bly (1988) plantean un modelo que acepta dos tipos de externalidades asociadas a la congestión: mientras más demanda por transporte público haya, suponiendo que disminuye la demanda por auto, menos congestión hay; y mientras más buses haya, la congestión aumenta. Ambas externalidades son modeladas por medio de una función lineal en la demanda y la frecuencia, es decir, se puede expresar como:

$$VCR_X = X_1 \cdot Y - X_2 \cdot f \quad (2.15)$$

Evans y Morrison (1997) incluyen en la modelación una externalidad negativa: los accidentes inducidos por el servicio de buses sobre las personas que son usuarios del bus, como por ejemplo, peatones. Esta externalidad se considera una función  $m$  que depende de la frecuencia de buses y de los gastos del operador por alcanzar cierto nivel de riesgo  $c_r$ . Ésta es valorada a un precio  $P_m$ .

Integrando estos enfoques Jara-Díaz y Gschwender (2003a) modelan las externalidades de la siguiente manera:

$$VCR_X = P_m \cdot m \left( f, c_r, k, \frac{L}{t_r(f)}, d(c_d) \right) + P_x \cdot x \left( f, k, \frac{L}{t_r(f)} \right) \quad (2.16)$$

La función  $m$  es muy similar a la función  $r$  explicada en el punto 2.2.1 (e) pero se refiere al riesgo que enfrentan los usuarios de otros modos. La función  $x$  representa un vector de externalidades de otro tipo como contaminación acústica, emisiones de gas, etc. Sus precios están en el vector  $P_x$ .

- Dimensión espacial

Kocur y Hendrickson (1982) y Chang y Schonfeld (1991) consideran un área servida por líneas de bus paralelas equiespaciadas para luego considerar dentro de las variables de optimización no sólo la frecuencia sino que también el espaciamiento entre líneas.

Mirando el problema desde otro punto de vista, Jara-Díaz y Gschwender (2003b) comparan utilizando el primer modelo de Jansson para una línea aislada, en un contexto de múltiples orígenes y destinos, servicios directos de transporte (sin transbordos) con servicios basados en corredores y alimentadores para distintas estructuras de demanda. La mejor estructura resulta dependiente de diversos factores como la demanda, la razón entre los valores de los tiempos y de algunos parámetros de la red.

- Desbalance de la demanda

Ortega (2008) hace un estudio completo de los efectos de omitir el costo de los usuarios en el diseño óptimo del transporte público. Para esto se basa en un modelo tipo Jansson (1980, 1984) para un período y analiza tres casos: en una línea aislada, en estructuras de rutas en redes simples (basado en el trabajo de Jara-Díaz y Gschwender (2003b)) y finalmente en las estructuras de línea en un eje con demanda desbalanceada. Lo interesante de este último análisis es que se levanta el supuesto de demanda uniformemente distribuida en el corredor y analiza cuál es la estructura de líneas más favorable en un corredor con dos orígenes (en el inicio y en un punto intermedio) y un destino (el final del corredor).

Fernández et al. (2005) estudian la influencia de la estructura de demanda sobre un corredor en la producción de viajes. Ilustran tres casos posibles denominados de demanda uniforme, homogénea y rutas alimentadoras. Demanda uniforme se refiere a una configuración de viajes que produce una carga uniforme de pasajeros sobre la ruta; demanda homogénea supone una distribución homogénea de los viajes entre todos los pares origen-destino y rutas alimentadoras es cuando hay un sólo destino (el final de la ruta). Los tres casos son representados gráficamente en el trabajo y sólo se replican a continuación para dar una mejor idea de lo que representa cada estructura. Cada punto representa un origen y/o destino donde se concentra una cierta cantidad de viajeros.

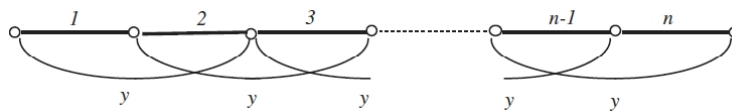


Figura 2.4: Ejemplo de demanda uniforme. Fernández et al. (2005).

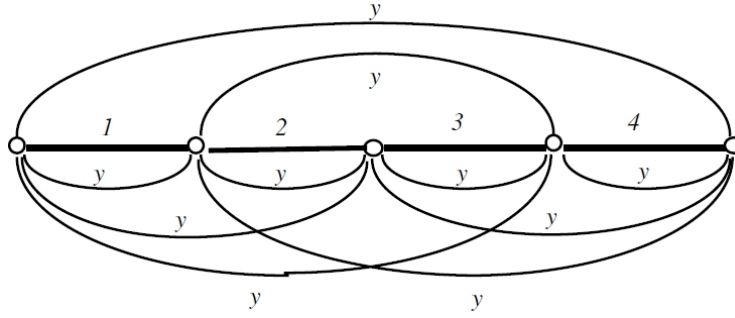


Figura 2.5: Ejemplo de demanda homogénea. Fernández et al. (2005).

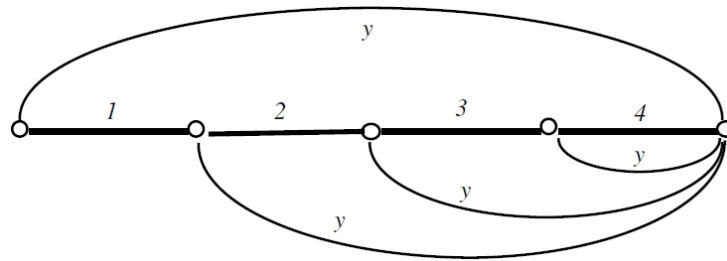


Figura 2.6: Ejemplo de demanda con rutas alimentadoras. Fernández et al. (2005).

- Demanda elástica

Cuando se considera demanda elástica, el problema del planificador ya no corresponde a minimizar los costos, sino que debe ser planteado de otra manera. Una forma posible es maximizando el bienestar social.

Oldfield y Bly (1988) modelan el problema maximizando el beneficio social sujeto a una restricción financiera. Para ellos la demanda depende del costo generalizado de la siguiente manera:

$$Y = Y_0 \cdot \left( \frac{CG}{CG_0} \right)^\mu \quad (2.17)$$

Donde  $Y_0$  y  $CG_0$  son parámetros y  $\mu$  es la elasticidad de la demanda con respecto al costo generalizado ( $CG$ ). Este último es igual a la tarifa ( $P$ ) más los tiempos ponderados por sus valores, costo que se detalla a continuación.

$$CG = P + P_w t_w + P_v t_v + P_a t_a \quad (2.18)$$

Por su parte Evans y Morrison (1997) también hacen una maximización del bienestar social y modelan la demanda dependiendo exponencialmente del costo generalizado. Las expresiones que describen el modelo son:

$$Y = Y_0 \cdot \exp(-CG/\mu) \quad (2.19)$$

$$CG = P + P_w t_w + P_v t_v + P_a t_a \quad (2.20)$$

Donde  $Y_0$  y  $\mu$  son parámetros.

Kocur y Hendrickson (1982) y Chang y Schonfeld (1991) también modelan el problema con demanda elástica, pero considerando que es una función lineal. Los primeros utilizan una demanda lineal en el tiempo de espera, viaje, acceso y de la tarifa, mientras que Chang y Schonfeld la consideran lineal con el costo generalizado descrito en la ecuación 2.18.

### 2.3. Diseño óptimo de servicios de transporte público: resultados

En la sección anterior se hace una revisión de los modelos de diseño óptimo de transporte público, detallando las diferentes formas de modelar cada una de las componentes: el costo de los usuarios, el de los operadores y las externalidades. En estos trabajos hay modelos que se proponen pero no se resuelven que, en general, corresponden a los más completos. Por otro lado hay modelos simples los cuales se pueden resolver analíticamente y otros en los que se debe recurrir a la resolución numérica.

La idea de esta sección es presentar algunos de los resultados relevantes de resolver y analizar varios de los modelos presentados anteriormente. Entre otras cosas, se investiga el comportamiento de los costos totales con la variación de la demanda por transporte público, de manera de poder hacer un análisis asociado a la tarificación óptima del transporte público.

De los modelos de Mohring y Jansson, junto con la mayoría de aquellos que son extensiones de alguno de los dos autores mencionados, por ejemplo, el primer modelo planteado por Jara-Díaz y Gschwender (2003a), se obtiene como resultado del proceso de optimización (minimización de gastos) que los costos medios totales son decrecientes. Este resultado indica que en el transporte público ocurre todo lo contrario a lo que ocurre con el transporte privado, es decir, un usuario más del transporte público genera una externalidad positiva y por ende, a diferencia de un usuario de automóvil, no debe pagar por externalidades impuestas sobre el resto. Esto es, muchas veces, conocido como el “efecto Mohring”.

La intuición detrás de esto se puede obtener de un análisis del planteamiento de los modelos y en este sentido Jara-Díaz (2007) hace una descripción de lo que ocurre cuando aumenta la demanda por transporte público, la que se resume a continuación.

Los costos incurridos por los usuarios tienen tres componentes: costo por tiempo de viaje, costo por tiempo de espera y costo por tiempo de acceso. Para hacer un análisis de lo que ocurre es importante tener en cuenta que la principal respuesta de los operadores a un aumento de la demanda es un aumento de la frecuencia.

- Costo por tiempo de viaje: Si aumenta la demanda el tiempo de viaje aumenta principalmente por dos razones: hay más congestión vehicular debido al aumento de la frecuencia y hay más usuarios subiendo y bajando de los buses por lo tanto aumentaría el tiempo de operación en los paraderos.
- Costo por tiempo de espera: Como al aumentar la demanda aumenta la frecuencia los tiempos de espera claramente disminuyen.
- Costo por tiempo de acceso: Si las rutas pueden estar sometidas a cambios, es posible que con un aumento de la demanda aumente la cobertura y por ende disminuya el tiempo de acceso. Si no se puede modificar la estructura de rutas el tiempo de acceso se mantendría constante. Lo primero es más probable en sistemas del tipo bus y lo segundo en sistemas tipo metro.

En los modelos de transporte público basados en Mohring-Jansson, el único costo que puede aumentar con la demanda es el relacionado al tiempo de viaje (si se incorporan efectos de congestión) y los otros dos deberían disminuir.

En relación a los costos de los operadores, Jara-Díaz afirma que decrecen con la demanda, basándose en estudios empíricos de otros autores y en el hecho de que la infraestructura (terminales, estaciones y otros) no necesariamente tiene que crecer proporcionalmente con la demanda.

Que los costos medios totales sean decrecientes implica que los costos marginales totales son menores a los costos medios o equivalentemente que existen economías de escala. Luego del análisis y lo que se obtiene como resultado de varios de los modelos antes planteados, Jara-Díaz (2007) hace un estudio de la tarificación óptima bajo esta condición de costos medios decrecientes. El gráfico que utiliza se presenta en la siguiente figura y el análisis se entrega a continuación.

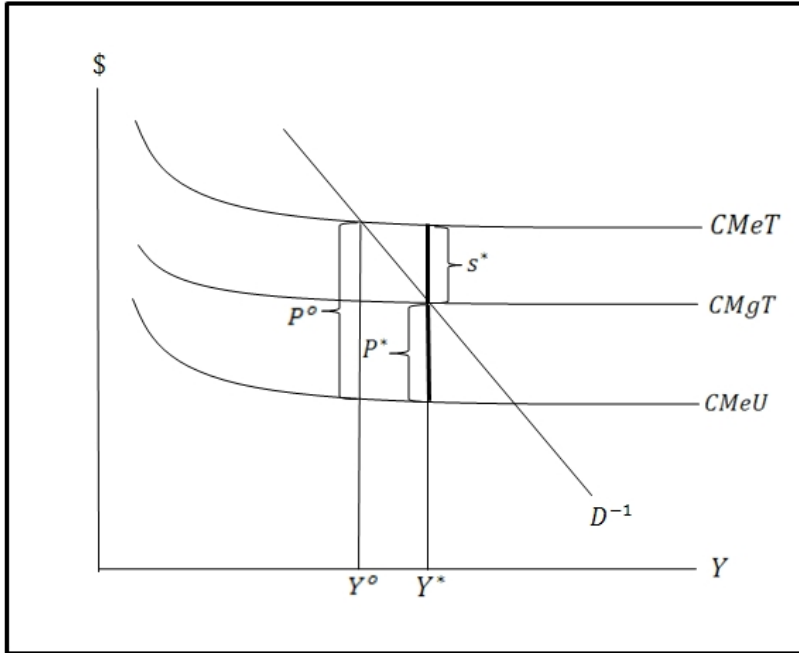


Figura 2.7: Tarifa y subsidio óptimo en transporte público.

Donde  $CMeT$  es el costo medio total (social);  $CMgT$  el costo marginal total;  $CMeU$  el costo medio que perciben los usuarios y  $D^{-1}$  la función de demanda inversa.

Para que los usuarios perciban el costo marginal total se les debe cobrar  $P^*$ . Por construcción, el costo medio de los operadores es la barra en negrita del gráfico ( $CMeT - CMeU$ ) y es fácil notar que la tarifa óptima no cubre los costos operacionales. Para cubrirlos, se debe entregar un subsidio óptimo ( $s^*$ ) igual a la diferencia entre costos medios totales y la tarifa pagada por los usuarios.

La gran implicancia de que los costos medios totales sean decrecientes es que, para alcanzar el máximo bienestar social, es necesario entregar subsidios al sistema de transporte público. A diferencia del caso de transporte privado, un usuario más en el sistema genera disminuciones en el costo para todo el resto, es decir, hay externalidades positivas.

Otro tema significativo es la implementabilidad política de los subsidios al transporte público. La primera barrera a tener en consideración es que los fondos públicos tienen un costo y es posible que este costo deba ser considerado al momento de evaluar políticas que los utilicen. Otro aspecto importante tiene relación con la voluntad de las autoridades: el subsidio óptimo puede alcanzar valores bastante altos<sup>3</sup> por lo que tiene que existir la voluntad política de dedicarle el dinero al transporte público. Probablemente existen países en los cuales las prioridades son otras, como educación o salud y el dinero no alcance para dedicárselo al transporte público.

<sup>3</sup>Parry y Small (2009) observan valores de subsidio entre un 40% y un 80% del costo operacional para el sistema de buses en Washington, Los Angeles y Londres. Además señalan que el subsidio promedio del sistema de buses para las 20 entidades de transporte más grandes de Estados Unidos alcanza el 73% de los costos operacionales.

Por estos motivos es interesante observar qué ocurre cuando no se quiere dar subsidio. En este caso el segundo mejor corresponde a cobrar una tarifa igual al costo medio de los operadores, de modo de producir el autofinanciamiento del sistema. Esta tarifa corresponde a  $P^o$  en la figura 2.7. Con esta tarifa viajan menos usuarios ( $Y^o$ ) lo que impacta en las frecuencias y los tamaños de los buses óptimos.

De esto último surge una gran interrogante: ¿qué es lo que ocurre con el sistema de buses si es que no se cobra el precio óptimo y/o no se entrega el subsidio óptimo? Esto es tratado por Jara-Díaz y Gschwender (2009) donde se analiza en un modelo tipo Jansson (1980, 1984) ¿qué ocurre si se impone una restricción financiera, como por ejemplo que el costo operacional no supere una cierta cantidad de dinero, que puede ser la tarifa cobrada más el subsidio entregado, no necesariamente óptimos?. Por ejemplo, si se considera que la tarifa de autofinanciamiento ( $P^o$ ) es muy alta y se desea cobrar una más baja se debe imponer una restricción al problema de optimización. El principal resultado es que imponer alguna restricción financiera exógena en la operación del sistema de transporte público actúa como si la valoración de los tiempos (de viaje y espera) de los usuarios fuese menor que los verdaderos, y mientras más fuerte sea la restricción, menores son las valoraciones aparentes de los tiempos. Esto implica que el diseño se mueve entre el óptimo social y el que minimiza el costo de los operadores, lo que ha sido mostrado, en estos tipos de modelo, que disminuye las frecuencias y aumenta el tamaño de los buses.

Los costos medios totales decrecientes son un resultado analítico de resolver el problema de optimización en los modelos más simples de Mohring (1972, 1976) y en los modelos tipo Jansson (1980, 1984). En el modelo más completo de Mohring no se pueden obtener expresiones analíticas para las variables óptimas y por lo tanto hace un análisis numérico, del cual resulta que los costos medios son decrecientes en el rango estudiado.

Todos estos modelos tienen en común que no consideran efectos de congestión ya que el tiempo en movimiento es constante y por ende independiente del flujo de buses. Fernández et al. (2005) a través de un modelo microeconómico aplicado a un corredor de buses concluyen que, en presencia de congestión, existen deseconomías de escala en la operación (sin considerar costos de los usuarios) y citan trabajos de otros autores que condicionan la existencia de economías de escala en la operación o que simplemente la refutan. En presencia de congestión también el tiempo de viaje aumentará con la demanda y por lo tanto el costo de los usuarios puede ser creciente.

El fenómeno de la congestión resulta muy relevante al momento de estudiar el problema del transporte público en general, por lo tanto, es importante considerar efectos de congestión al plantear un modelo que tenga como objetivo analizar políticas para combatirla. Además, no se puede dejar de lado el hecho que transporte público y privado interactúan de muchas formas en la realidad por lo que los análisis de mercados aislados son útiles para entregar una intuición de lo que ocurre, pero no son lo más completo que se puede llevar a cabo.

## 2.4. Integración entre diseño óptimo de transporte público, tarificación por congestión y algunas medidas de prioridad al transporte público

En esta sección se revisan varios trabajos que consideran algún tipo de interacción entre transporte público y transporte privado, que combinan optimización de transporte público y tarificación vial y que evalúan distintas políticas y medidas de prioridad para el transporte público.

En un principio se explica en términos generales cómo modelan el problema los autores detallando el enfoque de modelación, para luego puntualizar las diferentes maneras de modelar algunos de los elementos centrales del problema: oferta, demanda, heterogeneidad de los usuarios y congestión. También se resumen los principales resultados que se obtienen de los distintos modelos planteados.

### 2.4.1. Enfoques de modelación

El trabajo realizado por Viton (1983) es una modelación de viajes desde una zona residencial hacia un centro atractor de viajes, conectados por una autopista en la cual comparten la capacidad los modos auto y bus. Los recorridos de transporte público funcionan como alimentadores en la zona residencial donde no presentan congestión y como expresos en la autopista en donde, al haber flujo mixto, las velocidades de cada modo son iguales y dependen del flujo de autos y del flujo de buses. El modelo es un equilibrio entre demanda y un proceso de minimización de costos totales que incluye los costos de los operadores de bus, los costos por tiempos de los usuarios y los costos de inversión. La medida en análisis es tarificación óptima por congestión sin imponer que las tarifas de transporte público cubran los costos, lo que significa que asume que existe la posibilidad de subsidiar. Lo que pretende el autor es ver cómo luce el óptimo en términos de tarifas, particiones modales, resultados financieros y otros, considerando el equilibrio entre oferta y demanda, y la tarificación óptima. Las variables de optimización son la frecuencia, la flota del transporte público y la capacidad de la vía.

Paralelamente, Small (1983) presenta su trabajo con el propósito de evaluar los beneficios de medidas de prioridad a vehículos de alta tasa de ocupación (buses o carpool) y tarificación por congestión. Uno de los objetivos es determinar si las medidas de prioridad son beneficiosas y cuánto en comparación a la clásica tarificación pigouviana. En este trabajo se evalúa la medida de prioridad con capacidad discreta, es decir, asignando un número de pistas, y también con capacidad continua, asignando un porcentaje de dicha capacidad. Se modelan viajes entre un origen y un destino conectados por una autopista en la cual los modos bus y auto pueden o no compartir capacidad. Para esto utiliza un enfoque similar al empleado por Viton (1983) ya que es un equilibrio entre oferta representada por los costos de viajar y de operar buses, y demanda. No existe optimización



del transporte público en este modelo sino que hay una comparación del beneficio social que resulta de aplicar distintas combinaciones de las dos medidas mencionadas, con un sistema de transporte público fijo y conocido.

El estudio efectuado por Huang (2000) se basa en la modelación de un par origen destino conectado por una carretera para automóviles con un cuello de botella en la entrada y una vía completamente segregada para transporte público, que opera de manera expresa. Pretende comparar los costos totales, costos de los usuarios y las particiones modales que resultan de aplicar varios esquemas de tarifas (del transporte público y cobro al auto por congestión) en donde se incluye la combinación óptima, en cuanto a costos, de ellas. El costo total incluye los costos incurridos por los viajeros y por los operadores del sistema de transporte público. Al igual que en el trabajo de Viton (1983) sólo se considera la tarificación como medida posible. En el cálculo de las tarifas se impone la restricción de que la recaudación por tarificación de ambos modos cubra los costos operacionales del transporte público.

Larsen (2009) también modela un corredor por el que circulan dos modos: auto y bus, y todos los individuos inician su viaje en un punto de partida y terminan en un centro atractor de viajes, por lo tanto, la operación de los buses es expresa. Se analizan las políticas de tarificación vial, subsidio al transporte público e implementación de vías exclusivas, mediante un modelo de maximización del bienestar social, compuesto por el excedente de los consumidores más las recaudaciones por tarifas menos el costo de operar el sistema de buses. Se resuelve numéricamente el problema en varios escenarios, lo que permiten sacar conclusiones acerca de las políticas en estudio. Larsen incluye en su modelo el hecho de que los fondos públicos tienen un costo asociado fijando un valor de referencia para el precio sombra de los fondos públicos. Las variables de optimización son el cobro por congestión a los autos, la tarifa, la frecuencia y la capacidad de los buses. Siempre que el escenario incluya la medida de subsidio, se entrega el subsidio óptimo. Finalmente, la evaluación de las vías exclusivas es a través de un aislamiento total de los buses por una vía en donde no hay congestión y la velocidad es siempre la misma.

Las cuatro investigaciones mencionadas centran su estudio en una operación particular de buses que no se asemeja mucho a la operación típica de los sistemas de transporte urbano de Chile: asumen que toda la gente sube en un punto inicial y se transporta sin interrupciones hasta el final. Una parte importante de la operación de los buses, que se ignora en estos trabajos, es que entre el inicio y final de un servicio los orígenes y destinos están distribuidos y por ende la operación en paraderos, producto de la subida y bajada de los pasajeros, es un aspecto relevante. Varios autores, entre ellos Fernández y Planzer (2002), concluyen que los paraderos son el principal cuello de botella de la operación de buses y que el tiempo que se gasta en los paraderos representa una parte importante del tiempo total de viaje. Los trabajos que se discuten a continuación toman en consideración el hecho de que la demanda está distribuida y, de alguna manera, la operación en paraderos.

El enfoque planteado por Mohring (1979) es distinto a los trabajos mencionados anteriormente ya que modela un tramo (una milla representativa) de una vía de un sentido en la cual los orígenes y destinos están distribuidos y no localizados en un punto. En esta vía los automóviles y buses pueden, o no, compartir la capacidad. A través del planteamiento y posterior simulación numérica de cinco modelos se entrega una cuantificación de los beneficios de aplicar por separado y en alguna combinación las siguientes medidas: capacidad exclusiva para buses, subsidios al transporte público y tarificación de costo marginal. A diferencia de lo hecho por Small (1983), la capacidad sólo se asume perfectamente divisible. En todos los modelos existe una optimización en la cual la función objetivo es el costo total considerando el de los operadores y el de los usuarios (monetario y por tiempo). Mohring asume que cualquier partición modal se puede alcanzar combinando las tarifas de cada modo por lo tanto, en algunos casos, minimiza los costos en tiempo de los usuarios más los de los operadores para una partición modal dada; sus variables de optimización de costos son: frecuencia, el porcentaje de usuarios que elige bus (sólo en algunos modelos) y el porcentaje de capacidad dedicada exclusivamente para bus.

Al igual que Mohring (1979), Basso et al. (2010) modelan un tramo (km representativo) de una vía, en este caso de largo infinito (o circular) donde los orígenes y destinos están distribuidos y cada viaje tiene una longitud fija. Lo que se maximiza es el bienestar social, dado por la suma de los excedentes de los consumidores, más el resultado financiero del sistema de buses (ingresos menos costos), más la recaudación por tarificación por congestión. La optimización se hace en distintos escenarios representados por restricciones, que combinan las medidas en estudio: tarificación por congestión, subsidio al transporte público y capacidad exclusiva para buses. Las variables de optimización son más que en los modelos revisados anteriormente ya que incluye frecuencia, número de paraderos por kilómetro equiespaciados, tarifa del transporte público, cobro por congestión, porcentaje de la capacidad dedicado exclusivamente al modo bus y capacidad de los vehículos de transporte público. En la función de bienestar social se incorporan las utilidades de los usuarios, en función del costo generalizado, y los costos de los operadores.

Mogridge (1997) hace un análisis de equilibrios en un sistema con dos modos (transporte privado y público) con la premisa que la curva de costos de transporte privado es creciente con la demanda debido a que un usuario más, congestiona y hace que los tiempos de todos disminuyan. Además considera que hay economías de escala para los costos en transporte público por economías de escala en la operación y porque los usuarios se ven beneficiados básicamente por aumentos de frecuencias. Basado en las hipótesis de Downs (1962) y Thomson (1977) afirma que en el equilibrio los costos generalizados de ambos modos son iguales. Con estos supuestos muestra la paradoja de Downs/Thomson que consiste en que si se aumenta la capacidad de las vías de transporte privado, en condiciones de congestión, los costos de equilibrio aumentarán. Este análisis es atractivo pero no es lo que se quiere realizar en esta tesis principalmente por dos motivos: (1) no hay optimización ni modelamiento detallado de costos, efectos de congestión, heterogeneidad y otros elementos fun-

damentales; (2) el equilibrio no ocurre cuando los costos de ambos modos son iguales sino que los usuarios eligen maximizando su utilidad lo que puede, por ejemplo, representarse mediante modelos de demanda logit.

### 2.4.2. Demanda

Prácticamente todos los estudios revisados en este capítulo coinciden en variar la demanda total de viajes paramétricamente, lo que implica que sus resultados son condicionales en el nivel de demanda que se asuma. En general se hace el análisis para más de un nivel de demanda total, de modo de hacer más robustos los resultados. Larsen es el único que no supone demanda total paramétrica e incluye que las personas eligen en un primer paso el destino del viaje, por lo tanto, pueden decidir realizar el viaje al centro o no. Por este motivo en su trabajo el total de personas que viajan en el corredor en estudio no es fijo y depende de las tarifas, tiempos, etc.

En lo que se diferencian los modelos es en cómo se divide la demanda en los modos. Mohring (1979) y Basso et al. (2010) ocupan un modelo de partición modal determinístico que depende de los costos generalizados incluyendo el cobro por congestión. Huang (2000) también utiliza partición modal determinística pero las utilidades dependen de un costo generalizado, que en el caso del auto está constituido por el cobro por congestión, el costo por espera en el cuello de botella de la autopista y el costo por demora programada, mientras que para el bus depende de la tarifa y del costo por hacinamiento. En los trabajos de Small (1983), Viton (1983) y Larsen (2009) la partición modal es basada en un modelo logit multinomial incluyendo las tarifas, cobros por congestión, los tiempos y otras variables.

Un elemento que diferencia el trabajo de Basso et al. (2010) del resto, es que considera tres modos para viajar: auto, bus y un tercero que representa una opción alternativa. Esta opción alternativa puede ser interpretada como el viajar en un modo alternativo como bicicleta o el hecho de no viajar (por ejemplo trabajar desde el lugar de residencia). El resto de los autores modelan el viaje a través de dos modos posibles: transporte público (bus, tren, etc) y transporte privado (auto).

Larsen (2009) además incluye un caso en el cual se modelan 5 sub-períodos dentro del período punta y la demanda total en el período punta se divide de acuerdo a un modelo de elección discreta del tipo logit, en el cual los usuarios tienen preferencias por los sub-períodos. Esto permite que haya elasticidad intertemporal. En este caso entonces, en el modelo, la demanda total se ve afectada por el destino, luego por el sub-período y en cada uno de ellos por modo.

### 2.4.3. Costos

Los tipos de costos que se pueden observar en los trabajos en revisión son, principalmente, los costos de los operadores y los costos de los usuarios y se asemejan bastante a lo presentado en modelos puros de optimización de transporte público (sección 2.2). En la modelación hecha por Viton (1983) se toma en consideración, además, la componente de largo plazo representada por los costos de inversión, función del número de pistas de la vía.

#### (a) Costos de los operadores

El costo de los operadores es modelado de distinta manera en la literatura, y tiene relación directa con lo detallado en el punto 2.2.2. Huang (2000) lo modela proporcional al número de usuarios de transporte público considerando, también, un costo fijo. Viton (1983) modela el costo de los operadores proporcional a las horas de operación y a la distancia recorrida. De manera similar, Small (1983) lo modela en tres partes: proporcional al número de vehículos-milla; proporcional al número de vehículos-hora en punta; y proporcional al tamaño de flota. Larsen (2009) adopta una función lineal que depende de la flota, el tamaño de los buses, el número de kilómetros y el número de pasajeros. Mohring (1979) sigue el concepto de sus modelos anteriores y modela el costo operacional proporcional al tamaño de flota, que a su vez depende del tiempo de ciclo y de la frecuencia por lo que tiene directa relación con las variables de optimización. Muy parecida es la modelación que hacen Basso et al. (2010) pero con la diferencia que el coeficiente que multiplica al tamaño de flota depende linealmente de la capacidad de los buses (ver ecuación 2.12).

#### (b) Costos de los usuarios

En la minimización de costos, Huang (2000) incluye en los costos de los usuarios la tarifa de transporte público y el cobro por congestión. A estos costos se les añade, en el caso de transporte público, el costo de hacinamiento o incomodidad y en el caso del auto, el costo por espera en el cuello de botella y el costo por demora programada.

La modelación en el trabajo de Viton (1983) incluye también los costos monetarios, y se consideran además el tiempo de viaje, el tiempo de acceso y el tiempo de espera, que son funciones de las variables de optimización, cada uno ponderado por su respectivo valor del tiempo.

Como Small (1983) no minimiza costos sino que compara beneficio social y la demanda se modela a través de un modelo logit, lo relevante en cuanto a costo de usuarios está en la modelación de la función de utilidad indirecta condicional de la elección modal. Se considera en esta función: los tiempos de viaje, acceso, espera, el número de transbordos y el costo monetario dado por un costo

operacional y el cobro por congestión en el caso del automóvil, y la tarifa en el caso del bus. Lo mismo ocurre en el trabajo hecho por Basso et al. (2010) ya que hay una maximización de beneficio social asociado directamente a la función de utilidad modal. Se consideran las mismas variables que en Small (1983) salvo que al costo monetario del automóvil se le agrega un costo fijo por estacionamiento.

Mohring (1979) modela los costos de los usuarios como función de las variables de optimización considerando el tiempo de viaje, el tiempo de acceso, el tiempo de espera, y los costos monetarios de operación. Los tiempos son ponderados por el valor promedio del tiempo. Además se toman en cuenta las tarifas y cobros por congestión.

#### **2.4.4. Heterogeneidad**

En su modelación, Viton (1983) y Larsen (2009) consideran que todos los usuarios tienen los mismos valores del tiempo por lo que son homogéneos para todo efecto. Una forma de considerar heterogeneidad es separar la población en grupos homogéneos entre sí, lo que es llevado a cabo por Huang (2000) tomando en cuenta dos grupos de usuarios que difieren en su valoración por distintos atributos del transporte: hacinamiento, tiempo de viaje y demora programada. Small (1983) modela la heterogeneidad considerando que los usuarios tienen distintos valores del tiempo, proporcionales a su tasa salarial, mientras que Mohring (1979) asume que la distribución de los valores del tiempo es uniforme en la población. En otra manera de modelar la heterogeneidad Basso et al. (2010) asumen que todos los usuarios valoran de la misma manera los tiempos pero existe una distribución uniforme de la valoración por los atributos no capturados en la modelación de la utilidad individual tal como confort o status. Esto se materializa a través de constantes específicas de los modos que adoptan diferentes valores para distintas personas.

#### **2.4.5. Congestión**

La congestión es tratada de diferentes formas en los modelos analizados. Huang (2000) al considerar un modelo de cuello de botella hace irrelevantes los tiempos de viaje por lo que la congestión para el automóvil se da en el cuello de botella y es reflejada por los tiempos de espera. La capacidad de la vía de transporte público es infinita por lo que el único tipo de congestión es el de los pasajeros dentro del vehículo (hacinamiento). Como hay segregación completa entre los modos no existe congestión cruzada entre el transporte público y el transporte privado.

Viton (1983), en cambio, modela la congestión mediante una expresión para la curva velocidad-flujo planteada por Keeler y Small (1977) de la forma

$$S = S_0 + \left( a - b \cdot \frac{V}{C} \right)^d \quad (2.21)$$

En donde  $S$  es la velocidad,  $S_0, a, b$  y  $d$  son parámetros;  $V$  es el flujo en vehículos equivalentes (usando que un bus corresponde a 1,6 vehículos equivalentes) y  $C$  es la capacidad de la vía. El nexo entre las variables de optimización y la velocidad es el flujo total y existe congestión entre los vehículos del mismo tipo y además congestión cruzada.

Small (1983) usa dos formas de representar la congestión, una es la curva flujo-velocidad mencionada anteriormente, utilizada sólo a modo de análisis de sensibilidad, y la otra es un modelo de cola, con un punto de cuello de botella, que asume un flujo a velocidad constante excepto cuando el flujo supera la capacidad donde la velocidad disminuye de acuerdo a la fracción  $V/C$ .

Mohring (1979) utiliza los tiempos de viaje como funciones tipo BPR que son de la forma:

$$t = t_0 + t_1 \cdot \left( \frac{V}{C} \right)^d \quad (2.22)$$

En donde  $t_0, t_1$  y  $d$  son parámetros. Basso et al. (2010) modelan la congestión utilizando una función como la de la expresión anterior pero lineal, es decir, con  $d = 1$ .

En los tres trabajos mencionados al final, se evalúa la medida de prioridad al transporte público por lo que cuando no hay capacidad exclusiva el flujo es en vehículos equivalentes y cuando la hay, se utiliza una función distinta para el tiempo de viaje del auto y para el tiempo de viaje del bus que se diferencian tanto en el flujo como en la capacidad.

Larsen (2009) también modela la congestión como una función creciente con el volumen de tráfico. En flujo mixto ambos modos circulan a la misma velocidad y cuando es segregado, los autos se congestionan entre sí, pero los buses no ya que circulan a una velocidad constante igual a 50 km/hr.

Un elemento innovador en modelar la interacción entre buses y autos es introducido por Basso et al. (2010) que asumen que el tiempo de viaje en auto, cuando comparte capacidad con los buses, tiene dos componentes: el tiempo dado por la ecuación 2.22 y una demora causada por la operación de los buses en los paraderos. Esta demora es modelada como la mitad del tiempo que tarda el bus por operar en el paradero. No es el tiempo completo porque existe la posibilidad de adelantamiento y se elige un medio de forma arbitraria.

## 2.4.6. Resultados

Los principales resultados de los estudios en revisión se enuncian a continuación con referencia a los autores que obtienen cada resultado.

En la operación óptima se tiene un alto porcentaje de uso de transporte público. En el trabajo de Huang (2000) la partición modal del bus es mayor a un 50 %, en el de Viton (1983) es superior al 73 %, en el de Mohring (1979) en horario punta es aproximadamente 75 % y supera el 50 % en todos los escenarios analizados por Basso et al. (2010). Todos estos porcentajes son obtenidos para sólo un nivel de demanda total de viajes.

Mohring (1979), Viton (1983), Huang (2000), Larsen (2009) y Basso et al. (2010) obtienen que el cobro por congestión que genera mayor beneficio social es mayor que el costo operacional del auto. Este cobro de congestión hace que el viaje en auto sea varias veces más caro, en términos monetarios, que el de transporte público.

Viton (1983) y Basso et al. (2010) obtienen que la calidad de servicio de buses mejora cuando se aplican medidas para combatir la congestión o cuando se está en el óptimo.

Según Viton (1983) aplicar las tarifas óptimas de transporte público implica que debe haber un subsidio a la operación ya que las recaudaciones por tarifa no cubren los costos. Mohring (1979) concluye que bajo la minimización de costos totales y tarifas de transporte público igual a costo marginal el servicio de buses requiere subsidio. En la misma línea Basso et al. (2010) concluyen que aplicar subsidios aumenta tanto el beneficio social como el excedente de los consumidores. Larsen (2009) y Basso et al. (2010) obtienen que, en ausencia de tarificación por congestión, el subsidio óptimo puede ser mayor al costo operacional e incluir tarifas negativas para el transporte público.

Small (1983) y Basso et al. (2010) concluyen que las medidas de prioridad benefician directamente a los usuarios mientras que en la tarificación por congestión el beneficio es para el que recauda el dinero. En estos mismos trabajos y en el hecho por Mohring (1979) se concluye que la medida de prioridad asumiendo capacidad perfectamente divisible genera beneficios considerables. Si se considera capacidad discreta (número de pistas), Small (1983) encuentra que el beneficio disminuye bastante y es muy susceptible al nivel de demanda total, mientras que Basso et al. (2010) obtienen una capacidad divisible muy cercana a una pista por lo que los beneficios no debieran disminuir mucho. Larsen (2009) obtiene la conclusión que segregar completamente el flujo de buses sin reducir la capacidad de la vía donde circulan los autos genera un beneficio cercano al 80 % del de tarificar por congestión. Este beneficio disminuye si la medida implica una disminución de la capacidad de la vía de autos.

Cuando hay tarificación óptima (de primer mejor) Small (1983) y Mohring (1979) encuentran

que las medidas de prioridad tienen un efecto en los beneficios casi despreciable mientras que Basso et al. (2010) concluye que esta medida disminuye el cobro óptimo por congestión. Larsen (2009) obtiene que el beneficio de implementar vías exclusivas y tarificación por congestión simultáneamente es bastante menor que la suma de los beneficios de aplicar ambas por separado.

Finalmente en la investigación de Larsen (2009) y en la de Basso et al. (2010) se cumple que siempre la recaudación por tarificación por congestión alcanza a subsidiar el costo por operar de manera óptima el transporte público y que aplicar esta medida disminuye el monto de subsidio óptimo considerablemente.

## 2.5. Síntesis y comentarios

En las primeras secciones se hace una revisión general de la optimización de servicios de transporte público y de tarificación vial. Se detallan algunos trabajos importantes y se identifican otros. Con esto en consideración, se da paso a la revisión de los trabajos que integran ambos enfoques y que analizan la interacción entre transporte público y privado. En cada caso, se resumen las implicancias y resultados más relevantes de estos modelos.

De la revisión se puede destacar que existen muchos elementos interesantes que han sido modelados, pero en una gran parte de los casos en modelos aislados, y que son necesarios de incluir en un modelo con enfoque integrador. Algunos son:

- Se debe modelar los tiempos de transporte de la manera más ajustada a la realidad posible y como funciones de las variables relevantes. Así el tiempo de espera debe depender, al menos, de la frecuencia, el tiempo de acceso del número de paraderos que existan y para el tiempo de viaje considerar efectos de congestión, por ejemplo, con una función de la razón flujo capacidad.
- El tamaño de los vehículos de transporte público es una variable de optimización importante. Los costos de los operadores deben depender, entre otras cosas, de los tamaños de los buses como lo plantea inicialmente Jansson (1980, 1984). Ahora, si se desea modelar más de un período el planteamiento hecho por Fernández et al. (2005) resulta más convincente.
- Se debe tomar en cuenta que los buses congestionan de forma distinta que los autos. Además es necesario incluir efectos de congestión cruzada.
- Es necesario representar de alguna forma la heterogeneidad de los usuarios, considerando que tienen distintas características socioeconómicas y, entre otras cosas, diferente valoración de los tiempos. De este punto se puede desprender un análisis de impactos distribucionales



inspirado en lo realizado por Verhoef y Small (2004) que básicamente consiste en analizar cómo varía el excedente de los consumidores para individuos con diferentes características como, por ejemplo, valor del tiempo.

Resulta evidente que un análisis microeconómico de políticas para combatir la congestión debe modelar la interacción entre transporte público y privado. Resultado de esta revisión bibliográfica, específicamente de la literatura en donde hay interacción entre los modos de transporte, se identifica que hay una ausencia de una modelación que tenga como variables de decisión todas las asociadas al transporte público y que evalúe las distintas políticas existentes para combatir la congestión, que proponga un modelo completo que permita obtener conclusiones acerca de políticas. La importancia de optimizar el servicio de transporte público radica en que, en general, las medidas para combatir la congestión, específicamente la tarificación vial y la prioridad al transporte público, generan un aumento en la partición modal de dicho modo por lo que si no se optimiza, el beneficio de la medida se podría estar subestimando. En este sentido hay dos trabajos que se acercan al modelo que se busca desarrollar en esta tesis: el trabajo de Larsen (2009) y lo realizado por Basso et al. (2010). Estos dos últimos trabajos incorporan la teoría desarrollada por Mohring (1979) que la política de vías exclusivas puede generar beneficios considerables y por lo tanto se debe incluir en el análisis.

Elementos que están ausentes en la modelación de sistemas de transportes mixtos y que son importantes de incorporar son los siguientes:

- Modelar la capacidad de los paraderos: no es cierto que un paradero puede servir cualquier nivel de frecuencia. Además, la operación en los paraderos ha sido simplificada y muchas veces despreciada. Lo que se observa en la realidad de los sistemas de transporte mixtos es que existe una congestión entre buses en los paraderos, formándose colas y bloqueos. Por estos motivos es fundamental representar la operación en los paraderos de la forma más real posible.
- La congestión cruzada entre vehículos de distinto tipo debe ser modelada con todas sus componentes. La misma operación en el paradero afecta negativamente a los vehículos privados dependiendo del nivel de servicio que se encuentre.

Por estos motivos es importante desarrollar un modelo que tome en consideración los distintos aportes que se han entregado, muchas veces separadamente, en la literatura. Así junto con el enfoque integrador que debe tener el modelo a plantear en esta tesis, es necesario que incluya aquellos elementos que hasta ahora no han sido tomados en cuenta.

Para la etapa de análisis de resultados y conclusiones acerca de políticas resulta muy provechoso utilizar la revisión de resultados debido a que pueden hacerse las mismas comparaciones hechas

por los autores, contrastar los resultados con los obtenidos anteriormente y refutar o confirmar las conclusiones elaboradas hasta ahora.

En síntesis, esta revisión constituye una base para recoger enfoques y supuestos de los distintos modelos así como para identificar los elementos que son esenciales, aquellos que no aportan a la modelación y los que no han sido bien modelados hasta ahora en este tipo de análisis. A partir de esto es que se debe desarrollar el modelo microeconómico que se requiere para evaluar y concluir acerca de políticas que se detalla en el siguiente capítulo.

## Capítulo 3

# El modelo

En este capítulo se presenta el modelo teórico que se propone para evaluar y estudiar los efectos e implicancias de las políticas de transporte que se desea analizar: tarificación vial, subsidio al transporte público y vías exclusivas.

Para poder evaluar el beneficio de alguna política se debe comparar la mejor situación en ausencia de la política en cuestión frente a la mejor situación en presencia de dicha política, de modo de no adjudicarle beneficios que no le corresponden ni tampoco subestimarlos. Se usa la palabra escenario para indicar diferentes conjuntos de políticas de transporte en aplicación. La “mejor situación” posible se refiere, entonces, a que las variables que pueden ser modificadas por el planificador central toman valores que maximizan alguna función que resume el bienestar del sistema, para un escenario dado. Como resultados medibles en cada escenario, se podrá analizar el nivel de servicio del transporte público y del transporte privado, el uso que se le da a la infraestructura y la estructura tarifaria.

Por estos motivos, el modelo toma forma de problema de optimización cuya función objetivo es el bienestar social y las variables de optimización son: frecuencia del servicio de transporte público, distanciamiento entre paraderos, tarifa del viaje en bus, cobro por congestión al automóvil, capacidad de los buses y número de pistas dedicadas al modo bus cuando corresponda. Como medida principal de beneficio de las políticas se utiliza la variación de bienestar social.

Lo que se busca es encontrar el óptimo, que es aquel punto en el que se maximiza el bienestar social sujeto a las restricciones dadas por el escenario en estudio, en donde además todos los usuarios escogen el modo de transporte que maximiza su utilidad. Esto quiere decir que cada óptimo incluye un equilibrio modal que puede ser descrito como un equilibrio de Nash, ya que en éste ningún usuario verá aumentada su utilidad si cambia su elección de modo dadas las decisiones de los demás.

Este modelo se puede clasificar como un modelo microeconómico ya que se modela el comportamiento económico de los agentes, pasando por teoría del consumidor, la función de gasto de los operadores y medidas del bienestar social, especialmente, del excedente de los consumidores. Sin embargo, como resultará claro, dentro de este modelo hay muchas componentes y aspectos que se salen del ámbito de la microeconomía y, por ejemplo, son claramente de ingeniería. Se mostrará que esto resulta fundamental.

Basados en la revisión bibliográfica del capítulo 2, algunos elementos esenciales que se quiere recoger son los siguientes: al menos en nuestra realidad directa, la gente no se concentra en un punto y se moviliza hacia otro, sino que hay múltiples orígenes y destinos que están distribuidos en el espacio. Además, se quiere incluir en el modelo que estas personas, además de estar distribuidas, son diferentes, es decir, existe heterogeneidad en la población, lo que se ve reflejado entre otras cosas en su valoración de los tiempos de transporte.

Otro aspecto importante que se desea recoger y que se complementa con la heterogeneidad, es el hecho de que la cantidad de gente que viaja finalmente en un modo de transporte depende de varios factores entre los cuales destacan las tarifas y los tiempos.

Adicionalmente, es clave modelar la congestión ya que es uno de los motivos principales por los cuales se busca implementar políticas de transporte y además se ha mostrado que tiene un efecto importante en el diseño óptimo del transporte público. En este sentido se desea tratar la congestión que se produce en la vía producto de la circulación de autos y buses, junto con incluir la congestión de buses que se produce en un paradero que determina tiempos por transferencia de pasajeros.

Teniendo en consideración el primer objetivo de la tesis que es desarrollar un modelo microeconómico realista que capture las principales características tecnológicas de sistemas de transporte mixtos, que incorpore, entre otras cosas, los elementos que se nombraron anteriormente y que además permita hacer un análisis de políticas de transporte, se utiliza como modelo base el planteado por Basso et al. (2010), pero se hacen extensiones importantes para mejorarlo, las que se detallan a lo largo del presente capítulo.

### **3.1. Elementos básicos del modelo**

En un modelo teórico como el que se plantea en este capítulo es prácticamente imposible representar la realidad completa de una ciudad, principalmente por la dimensión espacial y lo complejo que tendría que ser el modelamiento de la red. Por este motivo tradicionalmente se ha modelado la dimensión espacial del problema de manera simplificada, basándose en una línea aislada o estructuras de redes muy simples.

En esta tesis se modela un corredor de transporte por el que pueden circular dos modos de transporte: automóvil y bus. Para evitar lidiar con las condiciones de borde (inicio y término del corredor), que no contribuyen significativamente, se modela un kilómetro representativo del corredor por lo que no es necesario definir el largo del corredor ni su forma, sería lo mismo si es circular o de largo infinito. Dado esto, cada una de las componentes del modelo debe estar representada por kilómetro.

La demanda total de viajes es inelástica lo que significa que  $Y$  pasajeros por hora por kilómetro desean iniciar un viaje de largo constante e igual a  $l$  kilómetros. Esta demanda total está uniformemente distribuida a lo largo del corredor por lo que cada uno de los paraderos atenderá la misma cantidad de pasajeros por hora.

En el modelo, las variables (de optimización), que controla un planificador central, son las asociadas a la operación de los buses: frecuencia  $f$  [buses/hr], tamaño de los vehículos  $k$  [pax] y número de paraderos equiespaciados por kilómetro  $p$ ; las componentes de la estructura tarifaria: tarifa de un viaje en bus  $P_b$  [\$] y cobro por kilómetro al automóvil  $P_a$  [\$/km]; y la disposición de la infraestructura, representada por el número de pistas dedicadas exclusivamente al transporte público, expresada como fracción,  $n$ . El cobro al automóvil se incluye únicamente en los escenarios en donde esté presente la política de tarificación vial, así como el número de pistas dedicadas únicamente al transporte público es una variable de optimización sólo cuando se esté evaluando vías exclusivas.

## 3.2. Demanda

En esta tesis se recogen dos aspectos importantes acerca de la demanda. Primero, la demanda de cada modo no es fija, sino que las personas responden frente a variaciones de las variables de servicio de cada modo, es decir, tiempos y tarifas, y por lo tanto dependiendo de éstas se determinan los niveles de demanda modal. Segundo, no todas las personas eligen la misma alternativa para un mismo nivel de tarifas y tiempos, debido a que no son las únicas variables que se toman en cuenta al momento de decidir qué modo usar y, principalmente, porque existe heterogeneidad en la población.

La forma de modelar esto es asumiendo una demanda total de viajes inelástica, mientras que el proceso de elección modal se da en el marco de la teoría de utilidad aleatoria basado en datos reales. Dentro del modelo global, esta componente es la única que incorpora efectos estocásticos.

Con la decisión de usar teoría de utilidad aleatoria, se considera que cada individuo toma la decisión de manera racional, con información perfecta y maximizando su utilidad. Esta utilidad no es observable en su totalidad y se asume tiene una componente determinística medible y una componente aleatoria. Del supuesto que la componente aleatoria se distribuye Gumbel se obtiene

que la elección modal está determinada por un modelo logit, en este caso, binomial. Este supuesto es uno de los más comunes en transporte, y en prácticamente todos los proyectos de transporte que se evalúan en Chile (que incorporan variaciones de la partición modal) se aplica el modelo logit.

Luego, es necesario definir las variables que inciden en la componente determinística de la utilidad. Para esto existen dos opciones: plantear una forma funcional para la utilidad y calibrar los parámetros de ella a partir de una muestra representativa, o hacer una transferencia de algún modelo existente. Dado el interés de esta tesis en usar datos representativos, se optó por hacer una transferencia de los modelos oficiales especificados y calibrados por SECTRA (2005). Esta transferencia consiste en replicar la especificación de la utilidad o utilizar alguna especificación con variables que estén incluidas en el modelo original y adoptar directamente los coeficientes que acompañan a cada una de las variables (utilidades marginales). Como la cantidad de modos en Santiago es claramente superior a los existentes en este modelo las constantes modales deben ser recalibradas.

Como se dijo, una de las características que se quiere recoger es la heterogeneidad de los individuos. En el modelo oficial de elección modal de Santiago, la heterogeneidad está representada por la existencia de cinco estratos socioeconómicos en donde los individuos pertenecientes a cada estrato son similares entre sí. La diferencia entre personas de distintos estratos está en las características socioeconómicas (ingreso) y en su valoración de una unidad monetaria, es decir, la utilidad marginal del ingreso. Esto tiene como consecuencia que cada estrato tiene asociado un valor del tiempo diferente que caracteriza a sus integrantes. Sus características principales se encuentran detalladas en el apéndice A. La distribución de la población a lo largo del corredor se asume la misma que la distribución de la población en la ciudad de la cual se tomen los datos.

Ya que en el estudio SECTRA (2005) se modelan 11 modos, 4 propósitos y 2 períodos, para hacer la transferencia se debe elegir un propósito y un período. Los modos son auto y bus y, dado que la base de nuestro modelo representa una situación en donde hay congestión y la demanda es relativamente alta, se adopta el período punta mañana y como propósito aquel que tiene la mayor participación en los modos auto y bus según la última encuesta origen destino de viajes de la ciudad de Santiago (SECTRA, 2003a): el propósito trabajo.

Las variables que se decide transferir son dos: costo monetario del viaje (*cost*), y tiempo generalizado de viaje (*tg*). Este último corresponde a una suma ponderada de los tiempos de viaje, espera y acceso. Las ponderaciones deben ser las del modelo original: 1 para el tiempo de viaje, 1,93 para el tiempo de espera y 3,63 para el tiempo de acceso.

Por su parte, el costo monetario del viaje que enfrenta la persona que lo realiza, es distinto para el modo bus que para el modo auto. Para el modo bus este costo es únicamente la tarifa que se le cobra por viaje  $P_b$ , por lo tanto se tiene que:

$$cost_{bus} = P_b \quad (3.1)$$

En cambio, para el modo automóvil el costo monetario es un costo operacional por kilómetro  $c_{0a}$  que tiene relación con el gasto en combustible, lubricante, neumáticos y otros, más la tarifa por congestión por kilómetro que el planificador central puede cobrar. Así, suponiendo que la tasa de ocupación de un vehículo es  $a$  y que el costo se reparte entre los  $a$  pasajeros, el costo monetario para una persona por un viaje en automóvil es:

$$cost_{auto} = (P_a + c_{0a}) \cdot \frac{l}{a} \quad (3.2)$$

En este modelo, la política de tarificación de estacionamiento es completamente equivalente a la política de tarificación vial, ya que el largo de viaje es constante e igual para todos los individuos. Cobrar un monto  $g$  por estacionamiento es equivalente a cobrar  $g/l$  por kilómetro a través de  $P_a$ .

Entonces, la utilidad del modo  $m$  para el estrato  $i$  queda determinada por la siguiente ecuación:

$$U_m^i = \theta_m^i + \theta_{tg,m} \cdot tg_m + \theta_{cost}^i \cdot cost_m \quad (3.3)$$

La cantidad de personas que elige un cierto modo  $m$ ,  $Y_m$  se calcula de la siguiente manera:

$$Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (3.4)$$

Donde  $Y^i$  corresponde a la demanda en pasajeros por hora por kilómetro que pertenece al estrato socioeconómico  $i$ .

Con esta transferencia del modelo logit oficial de la ciudad de Santiago se recoge de buena manera los dos aspectos que se señalaron como importantes: elasticidad de la demanda modal y heterogeneidad de preferencias en la población.

### 3.3. Tiempos de transporte

El proceso de elección modal depende directamente del tiempo generalizado de viaje, cuyas componentes son el tiempo de viaje, el tiempo de espera y el tiempo de acceso. Estas componentes están relacionadas con las variables de optimización del problema y a continuación se detallan dichas relaciones.

El tiempo de espera  $t_e$  es simplemente una fracción  $\theta$  del intervalo teórico de tiempo entre dos buses cuya frecuencia es  $f$ . Analíticamente,

$$t_e = \theta \cdot \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

La distancia entre dos paraderos corresponde al inverso del número de paraderos equiespaciados por kilómetro  $p$ . Como la gente está uniformemente distribuida en el espacio, en promedio se camina un cuarto de esta distancia para llegar al bus y un cuarto de esta distancia en forma de egreso. Si se asume una velocidad de caminata constante  $V_{cam}$ , el tiempo de acceso  $t_{acc}$  es igual a:

$$t_{acc} = \frac{1}{(2 \cdot p \cdot V_{cam})} \quad (3.6)$$

Dadas las condiciones homogéneas del modelo, el tiempo de viaje es el tiempo que tarda el bus en recorrer un kilómetro multiplicado por el largo del viaje. Por este motivo basta sólo con explicar y detallar el tiempo de viaje por kilómetro. Éste tiene dos componentes principales: el tiempo de circulación propiamente tal y el tiempo por la operación en paraderos.

El tiempo de circulación  $t_{mov}$  se modela a partir de una función cuadrática para la relación flujo velocidad (raíz para la velocidad en función del flujo), utilizada en los trabajos realizados por Keeler y Small (1977) y por Mogridge (1997) entre otros. La forma funcional genérica se presenta en la siguiente ecuación.

$$t_{mov} = \frac{1}{\sqrt{(A_v - B_v \cdot \frac{V}{C})}} \quad (3.7)$$

Donde  $V$  es el flujo [veq/hora],  $C$  la capacidad de la vía [veq/hora],  $A_v$  es el cuadrado de la velocidad a flujo libre y  $B_v$  es un parámetro que tiene relación con cuánto disminuye la velocidad cuando el flujo es igual a la capacidad. La elección de esta función es debido a que, a diferencia de lo que ocurre con las funciones tipo BPR calibradas para la ciudad de Santiago, la velocidad



disminuye en los tramos iniciales de flujo. Más detalle sobre la comparación entre ambos tipos de funciones se encuentra en el apéndice B.

Esta función se aplicará tanto para los escenarios de flujo mixto como para los escenarios en donde hay vías exclusivas. Lo que varía es el flujo y la capacidad en cada uno de los casos. El flujo de buses es simplemente el producto entre la frecuencia  $f$  y un factor de equivalencia  $b$  para transformar los buses a vehículos equivalentes y así compatibilizar unidades con la capacidad. Este factor de equivalencia usualmente se asume como una constante, pero como en este modelo la capacidad de los buses es variable, el factor de equivalencia se modela con una función lineal en la capacidad,  $b(k) = m \cdot k + n$ ; los valores de los parámetros son estimados más adelante en el apartado relacionado con los parámetros del modelo. Por su parte, el flujo de automóviles es simplemente el número de personas que circula en un tramo ( $Y_a \cdot l$ ) dividido por la tasa de ocupación promedio de un vehículo liviano  $a$ .

Por otra parte, el tiempo de operación en paraderos tiene varias componentes que se presentan en la siguiente lista:

- Tiempo de despeje: tiempo por aceleración y frenado en paraderos.
- Tiempo de servicio de pasajeros: este tiempo tiene dos unidades principales las cuales se explican por separado:
  - Tiempo por transferencia de pasajeros: es el tiempo que se ocupa en la subida y bajada de pasajeros.
  - Tiempo muerto: es el tiempo por apertura y cierre de puertas más otras operaciones del bus previas o posteriores a la transferencia de pasajeros distintas del tiempo de despeje, como por ejemplo, el acomodamiento del bus al nivel de la acera.
- Demora interna ( $d_i$ ): demora para salir del paradero una vez que el bus está listo para salir, causada por otros buses en el paradero.
- Demora externa: demora para salir del paradero una vez que el bus está listo para salir, causada por otros vehículos fuera del paradero.
- Demora en cola ( $d_q$ ): tiempo gastado en cola para entrar al paradero.

Se asume que el tiempo de despeje más el tiempo muerto es constante, aproximación que no reviste demasiada pérdida de generalidad (ver Fernández y Tyler, 2005); se denomina  $t_p$  a la suma de estos tiempos.

El tiempo ocupado en transferencia de pasajeros es abordado suponiendo que existe un tiempo de subida por persona fijo que es mayor que el tiempo que tarda una persona en bajar, y por lo tanto

es el que determina el tiempo total de transferencia. Además se supone que existe sólo una puerta que es utilizada para abordar el bus y se usa exclusivamente para esta operación; así el tiempo ocupado en transferencia de pasajeros es simplemente el producto entre el tiempo por pasajero  $t_{sb}$  y la cantidad de personas que aborda el bus. La cantidad de pasajeros que aborda un bus es igual a la cantidad de pasajeros que baja debido al supuesto de regularidad, homogeneidad y largo constante de viaje. En cada kilómetro abordan  $Y_b$  pasajeros por hora y por lo tanto a cada bus acceden  $Y_b/f$  pasajeros en un kilómetro.

Respecto de las demoras en paraderos y la capacidad de éste, en varios trabajos de investigación (Fernández y Planzer, 2002; Fernández y Tyler, 2005) se ha concluido que la mejor manera de analizarlas es mediante microsimulación ya que ésta entrega resultados más cercanos a la realidad que las fórmulas analíticas tradicionales, como la del highway capacity manual (TRB, 1985). Esto, porque las demoras y la capacidad dependen de muchos factores y uno de ellos es el diseño del paradero; otro factor importante, por cierto, es la regularidad o aleatoriedad de las llegadas al paradero.

La capacidad de un paradero puede ser definida como la cantidad de vehículos que pueden operar en él por unidad de tiempo y puede, por lo tanto, definir la cantidad de pasajeros que se puede transportar en el sistema (Fernández y Planzer, 2002).

En esta tesis se considera para el análisis central que el diseño de los paraderos es de alta capacidad y corresponde, tanto en flujo mixto como en vía exclusiva, a un paradero de 3 sitios, sin semáforos cercanos que disminuyan la capacidad, con la demarcación y distancias para un funcionamiento óptimo, ubicado en la pista de circulación para evitar demoras por acceder a la pista luego de estar en el paradero mismo, con una operación formal con andén de pasajeros segregado y la disciplina de entrada y salida del paradero es FIFO (first in, first out).

Así, dado el diseño del paradero, no existe demora externa. Sin embargo, existe demora interna y por cola y su magnitud depende principalmente del flujo de vehículos, del flujo de pasajeros y de la capacidad del paradero. Como está fuera del alcance de esta tesis incorporar un modelo de microsimulación que interactúe con el problema microeconómico de optimización, y asumir demoras internas y por cola constantes es muy poco realista, se adoptan funciones analíticas estimadas a partir de microsimulaciones de paraderos. Si bien existen varios autores que proponen funciones para las demoras, la que mejor se adapta al contexto de modelación es la propuesta por Fernández et al. (2000) ya que modela estas demoras en función del grado de saturación, especificando una forma funcional para la capacidad de un paradero. Este trabajo está basado en resultados de microsimulación con IRENE 4.2 y obtiene que estas funciones dependen de la tasa de subida y bajada de pasajeros en cada paradero los que, producto de los supuestos del modelo, son iguales a la cantidad de gente que aborda un bus por hora por kilómetro dividido por el número de paraderos por kilómetro, es decir,  $Y_b/(f \cdot p)$ .

Las formas funcionales de la capacidad del paradero ( $C_p$ ) y las demoras, expresadas en términos de las variables de optimización, que obtienen Fernández et al. (2000) a partir de distintas observaciones de microsimulación y un análisis estadístico son las siguientes:

$$C_p = \left( a_p \cdot \frac{Y_b}{f \cdot p} + b_p \right) \cdot \ln \left( \frac{Y_b}{f \cdot p} \right) + c_p \cdot \frac{Y_b}{f \cdot p} + d_p \quad (3.8)$$

$$d_i = \left( a_{i1} + a_{i2} \cdot \frac{f}{C_p} \right) \cdot \frac{Y_b}{f \cdot p} + \left( b_{i1} + b_{i2} \cdot \frac{f}{C_p} \right) \cdot \frac{Y_b}{f \cdot p} + c_i \cdot \left( \frac{Y_b}{f \cdot p} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$d_q = \left( a_{q1} + a_{q2} \cdot \frac{Y_b}{f \cdot p} + a_{q3} \cdot \left( \frac{Y_b}{f \cdot p} \right)^2 \right) \cdot \exp \left( \frac{f}{C_p} \left( b_{q1} + b_{q2} \frac{Y_b}{f \cdot p} \right) \right) \quad (3.10)$$

Donde  $a_p$ ,  $b_p$ ,  $c_p$ ,  $d_p$ ,  $a_{jn}$ ,  $b_{jn}$  y  $c_i$  de las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 son parámetros de calibración estimados en el mismo estudio y que dependen del número de sitios del paradero. Por ejemplo  $d_p$  es la capacidad base de un paradero y se reduce su capacidad en función de la tasa de subida y bajada. Para 3 sitios este valor es bastante más alto que para 2 sitios y lo mismo ocurre de compararlos con 1 sitio. Todos estos parámetros cambian de valor cuando se trata de un paradero de 1, 2 ó 3 sitios de detención; lo que se mantiene es la forma funcional.

Con estos elementos a mano, se puede finalmente obtener el tiempo de viaje, por kilómetro, para los modos auto y bus. Cuando circulan separadamente, es decir, los buses usan vías exclusivas, en el caso del auto el tiempo es igual al de circulación y es:

$$t_{viajeauto} = \frac{1}{\sqrt{A_v - B_v \cdot \left( \frac{l \cdot Y_a}{a \cdot C \cdot (1-n)} \right)}} \quad (3.11)$$

En el caso del bus el tiempo de viaje es la suma de todos los tiempos antes mencionados y queda de la forma,

$$t_{viajebus} = \frac{1}{\sqrt{A_v - B_v \cdot \left( \frac{f \cdot b(k)}{n \cdot C} \right)}} + p \cdot \left( \frac{Y_b}{f \cdot p} \cdot t_{sb} + t_p + d_i + d_q \right) \quad (3.12)$$

El caso de flujo mixto es bastante más complejo ya que resulta fundamental incorporar el hecho de que la operación en paraderos afecta el tiempo de viaje de los autos. No existen estudios que de alguna manera reflejen esta influencia de un modo sobre el otro a través de una función de las variables relevantes tales como el distanciamiento de paraderos o el flujo de buses. En vista de esta

ausencia lo que se hace, es sumar al tiempo de circulación de los autos una fracción  $\epsilon$  del tiempo de operación en paraderos. Esta fracción  $\epsilon$  es evidentemente mayor a cero y es inferior a uno ya que se modela más de una pista y por ende, existe la posibilidad de adelantamiento.

Así en condiciones de flujo mixto los tiempos son:

$$t_{viajeauto} = \frac{1}{\sqrt{A_v - B_v \cdot \left(\frac{t \cdot Y_a + f \cdot b(k)}{a \cdot C}\right)}} + \epsilon \cdot p \cdot \left(\frac{Y_b}{f \cdot p} \cdot t_{sb} + t_p + d_i + d_q\right) \quad (3.13)$$

$$t_{viajebus} = \frac{1}{\sqrt{A_v - B_v \cdot \left(\frac{t \cdot Y_a + f \cdot b(k)}{a \cdot C}\right)}} + p \cdot \left(\frac{Y_b}{f \cdot p} \cdot t_{sb} + t_p + d_i + d_q\right) \quad (3.14)$$

En el modelo planteado por Basso et al. (2010) se incorpora este efecto asumiendo un valor constante para  $\epsilon$  igual a  $1/2$ . Pero en el modelo de esta tesis se quiere capturar el hecho de que cuando hay pocos buses esta fracción debiera ser cercana a cero y cuando hay muchos buses, alcanzar valores más altos. Por este motivo  $\epsilon$  se modela como una función de la cantidad de buses que está circulando y a continuación se presenta su forma funcional y un gráfico de la función en el intervalo para la frecuencia  $[0 ; 200]$ . Por ejemplo, para una frecuencia de 60 buses por hora la fracción es 0,45 y para una frecuencia de 30 buses por hora el valor de  $\epsilon$  es 0,26.

$$\epsilon(f) = 1 - \frac{1}{1,01f} \quad (3.15)$$

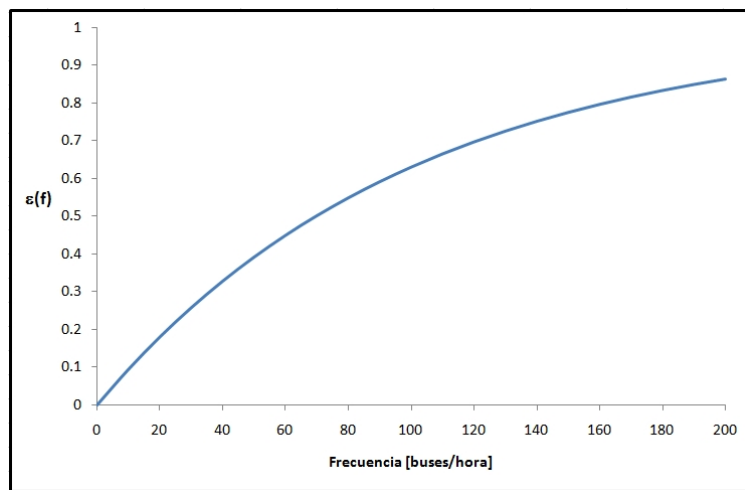


Figura 3.1: Función  $\epsilon(f)$

### 3.4. Función de costos

Para representar los costos operacionales del transporte público se adopta el modelo para múltiples períodos planteado por Fernández et al. (2005). Para efectos de esta tesis se desprecian los gastos de combustible por unidad de tiempo detenido en paraderos siguiendo el ejemplo numérico del trabajo original y considerando que no se tiene estimación para estos gastos. Se considera que a los conductores se les paga un sueldo fijo, independiente de la cantidad de pasajeros transportados. La función de gasto, entonces, es la siguiente:

$$G_{OP} = Ad + p_m \cdot M + p_b \cdot B + p_h \cdot H + \sum_t C_b^{kt} \cdot B_t \cdot L_t \cdot N_t \quad (3.16)$$

El gasto de los operadores (en \$/día) es la suma de los gastos fijos por administración  $Ad$ , los gastos por terminales ( $p_m \cdot M$ ), gastos de adquisición de vehículos ( $p_b \cdot B$ ), gastos operacionales ( $C_b^{kt} \cdot B_t \cdot L_t \cdot N_t$ ) y gastos por conductores ( $p_h \cdot H$ ). El gasto por terminales es simplemente la cantidad de metros cuadrados de terminal ( $M$ ) por su precio generalizado ( $p_m$ ) (en \$/m<sup>2</sup>-día). Lo mismo ocurre para el gasto por adquisición de vehículos, que es el número de vehículos ( $B$ ) multiplicado por la amortización de un bus ( $p_b$ ) (en \$/veh-día). El costo operacional corresponde a los gastos en combustible, lubricantes, neumáticos y costos variables de mantención, que es proporcional a los vehículos-kilómetro en el período correspondiente ( $B_t \cdot L_t \cdot N_t$ ). Finalmente el gasto por conductores es igual al número de conductores ( $H$ ) por el salario ( $p_h$ ) expresado en \$/conductor-día.

Esta forma de la función de gasto permite modelar la cantidad de períodos que se desee de manera directa y rigurosa.

Se plantea, además, que existe una relación proporcional entre el número de buses  $B$  y el número de conductores necesarios ( $H = B \cdot h$ ), el tamaño del terminal requerido ( $M = B \cdot m$ ) y que los costos de administración también son proporcionales al tamaño de flota. Considerando esto y agregando el hecho de que los vehículos-kilómetro asociados a un kilómetro son iguales a la frecuencia multiplicada por la duración del período ( $H_t$ ), la función de gasto total queda:

$$G = (A + p_m \cdot m + p_h \cdot h + p_b) \cdot B + \sum_t C_b^{kt} \cdot f_t \cdot H_t \quad (3.17)$$

### 3.5. Función objetivo

La función objetivo del modelo de optimización es el bienestar social. El bienestar social está definido por la suma de los excedentes de cada agente involucrado (sin hacer ponderaciones

especiales), por lo tanto es el excedente de los consumidores (EC) más el resultado financiero que resulta de la operación y recaudación ( $\pi$ ), es decir,

$$BS = EC + \pi \quad (3.18)$$

Como medida del excedente de los consumidores se utiliza el propuesto por Marshall (1920) llamado excedente marshalliano del consumidor y para modelos logit se ha demostrado que es equivalente a la conocida fórmula logsuma (Small y Rosen, 1981; Jara-Díaz, 2007) que se presenta a continuación.

$$EC = \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \ln[\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)] \right) + E \quad (3.19)$$

El excedente de los consumidores es la suma simple de los excedentes de cada individuo por estrato. Esta suma de los beneficios personales es una forma de agregación dentro de las posibles, ya que existen otras maneras de agregar el bienestar individual para incluirlos en la función de bienestar social, que pueden representar otros puntos de vista. Esta forma particular de agregación hace que el excedente de aquellos pertenecientes a grupos con utilidad marginal del ingreso ( $\lambda$ ) menor pese más en la función objetivo. Una discusión detallada acerca del beneficio social derivado del transporte se puede encontrar en la publicación de Jara-Díaz (2007).

También existe la presencia de una constante ( $E$ ) que es irrelevante para la optimización y la comparación de la variación del bienestar social. Por este motivo el valor absoluto del excedente de los consumidores no es tan significativo como la variación de éste.

El resultado financiero, es simplemente la recaudación por tarifas menos los costos de operación del sistema de buses. Como se explicita anteriormente, el usuario de transporte público paga  $P_b$  mientras que un usuario de automóvil paga  $P_a \cdot \frac{l}{a}$  por viaje, por lo tanto el resultado financiero se puede representar de la siguiente manera:

$$\pi = Y_b \cdot P_b + Y_a \cdot P_a \cdot \frac{l}{a} - G \quad (3.20)$$

### 3.6. Planteamiento y restricciones generales

El modelo está prácticamente definido en su totalidad, salvo por las restricciones y algunas consideraciones importantes. Si se plantea de forma directa el problema de optimización, existe

una complicación, que se describe a continuación, al momento de incorporar el proceso de elección modal.

La cantidad de personas que elige usar el modo  $m$  está dada por la siguiente ecuación (antes mencionada como ecuación 3.4).

$$Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (3.21)$$

De esta definición se ve claramente que  $Y_m$  depende de las utilidades de ambos modos. Estas utilidades, a su vez, dependen tanto de las tarifas como de los tiempos de espera, acceso y viaje de acuerdo a la definición de utilidad del modelo (ecuación 3.3). Sin embargo, los tiempos no son constantes: el tiempo de espera depende de la frecuencia, el tiempo de acceso del distanciamiento entre paraderos y los tiempos de viaje, como se define en la sección de tiempos de transporte, están compuestos por una combinación del tiempo de circulación y del tiempo (o una fracción) de operación en paraderos.

De acuerdo a las definiciones que se han hecho hasta ahora, se tendría lo siguiente.

$$Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} = \dots = Y_m(P_a, P_b, t_{viajeauto}, t_{viajebus}, f, p) \quad (3.22)$$

Lo que representa sólo una notación para indicar que  $Y_m$  es función de las tarifas y de los tiempos de viaje de ambos modos junto con las variables de diseño del transporte público.

El problema radica en que el tiempo de operación en paraderos depende directamente de la cantidad de gente que aborda el bus ( $Y_b$ ) y los tiempos de circulación dependen de la fracción entre el flujo existente en la vía y la capacidad de ella. También ocurre que el flujo existente en la vía depende de las demandas, por ejemplo, el flujo de autos es proporcional a la cantidad de personas que elige viajar en auto ( $Y_a$ ).

Como se puede ver en las ecuaciones 3.11 y 3.12, en presencia de vías exclusivas, los tiempos de viaje en cada modo dependen de la demanda de dicho modo, es decir,

$$t_{viajeauto} = t_{viajeauto}(Y_a) \quad (3.23)$$

$$t_{viajebus} = t_{viajebus}(Y_b, f, p) \quad (3.24)$$

En el caso de flujo mixto se combinan los efectos y, como se explicita en las ecuaciones 3.13 y 3.14, los tiempos son función de las demandas de ambos modos, es decir,

$$t_{viajeauto} = t_{viajeauto}(Y_a, Y_b, f, p) \quad (3.25)$$

$$t_{viajebus} = t_{viajebus}(Y_a, Y_b, f, p) \quad (3.26)$$

Debido a esto, lo que ocurre es que hay un problema de punto fijo que se puede describir de la siguiente manera:

$$Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} = \dots = Y_m(P_a, P_b, Y_a, Y_b, f, p) \quad (3.27)$$

Esta recursividad no permite plantear el modelo de optimización directamente ya que no hay forma de definir explícitamente  $Y_m$ . La solución propuesta a esto es incorporar las demandas por modo como variables de optimización del problema y como se debe cumplir que estas demandas sean producto de un equilibrio modal, se impone éste como una restricción. Así, la primera restricción, común a todos los escenarios que se analizan, es que la cantidad de personas que elige cada modo sea consistente con el equilibrio y además sea una cantidad no negativa y que ambas sumen la demanda total. Estas restricciones se enuncian a continuación.

$$0 \leq Y_a \quad (3.28)$$

$$0 \leq Y_b \quad (3.29)$$

$$Y_a + Y_b = Y \quad (3.30)$$

$$Y_a = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_a^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (3.31)$$

$$Y_b = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_b^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (3.32)$$

El resto de las restricciones generales se muestran y explican en los siguientes párrafos. La frecuencia es una variable no negativa y no debe ser superior a la capacidad que puede entregar el paradero  $Cp$  (ecuación 3.8).

$$0 \leq f \leq Cp \quad (3.33)$$



El número de paraderos equiespaciados por kilómetro es una variable positiva y no puede ser superior a 5. Esto se debe a que se asume que el diseño de los paraderos y la infraestructura vial no permiten distanciamientos inferiores a 200 metros.

$$0 < p \leq 5 \quad (3.34)$$

Cuando se esté evaluando las vías exclusivas, como en las aplicaciones del modelo se considera una vía de 3 pistas, el número de pistas a asignar al transporte público debe ser 1 ó 2, por lo tanto la fracción de capacidad dedicada exclusivamente a los buses debe ser un tercio o dos tercios. No se acepta  $n = 0$  porque representaría una transformación del corredor a uno exclusivo para transporte privado y deja de tener sentido en el modelo. Si se pensara en una vía con distinto número de pistas esta restricción cambia en números, por ejemplo, si sólo hay dos pistas la restricción sería  $n = 1/2$ . Entonces, la restricción particular para este modelo es:

$$n = 1/3 \vee n = 2/3 \quad (3.35)$$

El tamaño de los buses debe ser tal que permita transportar a toda la demanda por bus que resulte del equilibrio. Esta restricción se puede asumir como igualdad ya que en este modelo tener capacidad ociosa sólo aumenta los costos operacionales y no entrega ningún beneficio a los usuarios. Por lo tanto, el tamaño de los buses se expresa en función de las otras variables de optimización y no es necesario incluirla como variable misma. Finalmente se puede obtener como resultado de la maximización y se calcula como:

$$k = \frac{Y_b \cdot l}{f} \quad (3.36)$$

Además el tamaño de los buses debe ser positivo y no puede alcanzar valores poco razonables para el problema ya que se están modelando buses urbanos y la validez de las funciones de  $k$  es limitada. Por estas razones se fija el valor máximo para el tamaño de buses en 300. Así la restricción, utilizando la ecuación 3.36, queda:

$$0 < \frac{Y_b \cdot l}{f} < 300 \quad (3.37)$$

Por un asunto únicamente de notación el conjunto de restricciones generales se nombrará RG.

### 3.7. Escenarios

Para poder analizar las diferentes políticas de transporte es necesario crear la cantidad de escenarios que permitan hacer todas las comparaciones relevantes. Un escenario está descrito por condiciones que se imponen sobre el sistema, las cuales representan la aplicación de diferentes políticas. Estas condiciones pueden estar representadas por el tipo de funciones que se usan -por ejemplo, con vías exclusivas los tiempos de viaje son diferentes que los de flujo mixto-, o pueden estar representadas por restricciones que se imponen: no entregar subsidio equivale a imponer autofinanciamiento. En cada escenario se debe plantear y resolver el problema de optimización del bienestar social con las funciones y restricciones que correspondan. Los escenarios se explican a continuación, identificándolos por su nombre y, entre paréntesis y en mayúscula, un nombre corto que se utilizará como notación de aquí en adelante.

- Escenario base (BASE)

El escenario base, como su nombre lo sugiere, es una situación en donde hay ausencia de las políticas en estudio, es decir, no existen vías exclusivas (se modela en flujo mixto), no hay tarificación vial y no se entregan subsidios a la operación del transporte público. El problema queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b}{\text{máx}} && BS \\ & \text{s.a.} && RG \\ & && P_a = 0 \\ & && P_b \cdot Y_b = G \end{aligned} \tag{3.38}$$

En este escenario se iguala la tarifa del automóvil a cero y se incluye la restricción de autofinanciamiento. El objetivo de este escenario es fijar un punto de referencia para hacer las comparaciones y evaluar los beneficios de las distintas políticas.

- Escenario subsidio (SUB)

Este escenario corresponde a permitir subsidios a la operación del sistema de buses. En el fondo es no imponer la restricción de autofinanciamiento. Es importante notar que el subsidio no es una variable de optimización adicional sino que es un resultado de la optimización de tarifas.

Así, el problema luce de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_a = 0
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Este escenario permite evaluar los beneficios y entender las implicancias de la política de subsidio.

- Escenario tarificación vial (TAR)

El escenario tarificación vial corresponde a aplicar únicamente esta política. Simplemente es el caso base pero sin imponer que la tarifa al automóvil es igual a cero. Como se menciona anteriormente esta tarifa es un cobro por kilómetro recorrido y en este sentido es de primer mejor.

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_b \cdot Y_b = G
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Naturalmente este escenario es útil para analizar qué ocurre cuando se implementa la política de tarificación por congestión. No se incluyen los costos de implementar el sistema de tarificación.

Lo que corresponde hacer ahora es analizar un escenario en que ambas políticas de precio, subsidios al transporte público y tarificación por congestión, sean usadas. Sin embargo, es importante notar en este punto una particularidad del modelo:

Dado que en el modelo planteado existen solamente dos modos, la partición modal se puede escribir como  $Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{1}{(\exp(U_a^i - U_b^i) + 1)}$ , directamente de la ecuación 3.4. Esto implica que la partición modal dependerá explícitamente de la diferencia  $[(P_a + c_{0a}) \cdot \frac{1}{a} - P_b]$ , por lo que no se puede obtener valores separados para  $P_a$  y  $P_b$ . Dicho de otra manera, lo que existe es una diferencia  $[(P_a + c_{0a}) \cdot \frac{1}{a} - P_b]$  óptima, la que determina la partición modal, y los valores individuales para  $P_a$  y  $P_b$  se pueden obtener sólo si alguna restricción adicional lo permite. En el caso de SUB, esta restricción es evidentemente  $P_a = 0$ . En el caso de TAR, la restricción está dada por el autofinanciamiento. Sin embargo, si no se impone  $P_a = 0$  ni autofinanciamiento, el problema no podrá ser solucionado de

manera única. Esto porque si se mueve en una misma cantidad lo que paga un usuario de automóvil y lo que paga uno de bus se producen dos efectos: la partición modal no se modifica y el bienestar social tampoco. Entonces, si existe un conjunto  $\{f^*, p^*, P_a^*, P_b^*, Y_a^*, Y_b^*\}$  que es óptimo, el conjunto  $\{f^*, p^*, P_a^* + \frac{\Delta \cdot a}{l}, P_b^* + \Delta, Y_a^*, Y_b^*\}$  también es óptimo ya que entrega el mismo valor de bienestar social sin dejar de cumplir el equilibrio modal y con las mismas variables de servicio. Esto también se puede entender observando las condiciones de primer orden y viendo que las asociadas a  $P_a$  y  $P_b$  son linealmente dependientes, demostración que se puede consultar en el apéndice C.

De este modo, dos conclusiones resultan evidentes: (1) que los escenarios SUB y TAR necesariamente entregaran el mismo valor de bienestar social (BS), la misma partición modal y por ende los mismos niveles de servicio, ya que ambos llevan a la diferencia óptima  $[(P_a + c_{0a}) \cdot \frac{l}{a} - P_b]^*$ . Lo único que cambia son los valores relativos de las tarifas y, por lo tanto, los excedentes de los consumidores. (2) que si se trata de analizar un escenario con subsidios y tarifas, se debe imponer alguna restricción que permita identificar el problema.

La restricción que se elige para este escenario es que el dinero recaudado por tarifas de los dos modos alcance exactamente para cubrir los costos operacionales del bus. El problema queda entonces:

- Escenario subsidio y tarificación vial (SUB+TAR)

$$\begin{aligned}
 & \underset{f, p, P_a, P_b, Y_a, Y_b}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & P_b \cdot Y_b + Y_a \cdot P_a \cdot \frac{l}{a} &= & G
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

De acuerdo a lo discutido previamente, este escenario lleva al mismo valor de BS que los de subsidio (SUB) y tarificación (TAR) al igual que a las mismas variables de servicio (frecuencia y distanciamiento de paraderos) y por ende a las mismas particiones modales, pero genera diferentes precios relativos y, por ende, distinta repartición de excedentes.

- Escenario subsidio con tarifas no negativas (SUBP)

Este escenario se basa en que el escenario de subsidio (SUB) no impone restricción sobre la tarifa que cobra el bus por lo tanto puede perfectamente llegar a ser negativa (i.e. que se le pague a un usuario por subir al bus). Debido a que esto es difícil de llevar a cabo en la práctica es interesante

estudiar qué ocurre cuando se impone además que las tarifas no puedan ser negativas, es decir, cuánto se pierde en bienestar y qué cambios provoca esta restricción.

Si el escenario de subsidio entrega una tarifa de bus no negativa entonces este escenario sería equivalente, en caso contrario este escenario corresponde a una solución subóptima del escenario SUB. La idea central de este escenario es evaluar qué ocurre cuando se entrega un subsidio inferior al óptimo pero que tiene más posibilidades de ser aplicado en la realidad. Analíticamente,

$$\begin{array}{ll}
 \text{máx} & BS \\
 f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b & \\
 \text{s.a.} & RG \\
 & P_a = 0 \\
 & P_b \geq 0
 \end{array} \tag{3.42}$$

- Escenario vías exclusivas (VE)

El objetivo de este escenario es evaluar la política de vías exclusivas, por lo que es muy similar al escenario BASE: sigue imponiéndose el autofinanciamiento del sistema de buses y no hay tarificación por congestión. La única diferencia está en que hay segregación de flujo, por lo tanto las funciones de tiempo son las especificadas en la sección 3.3 para vías exclusivas. Además se incorpora la variable  $n$  que representa el número de pistas que son dedicadas sólo para los buses. Así este escenario queda de la forma:

$$\begin{array}{ll}
 \text{máx} & BS \\
 f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b,n & \\
 \text{s.a.} & RG \\
 & P_a = 0 \\
 & P_b \cdot Y_b = G
 \end{array} \tag{3.43}$$

Los escenarios restantes son exactamente los mismos que se mencionan en flujo mixto pero con la diferencia que se implementan las vías exclusivas y por ende su usan las funciones de tiempo correspondientes. Los escenarios de subsidio, tarificación y ambos a la vez, en presencia de vías exclusivas, siguen siendo equivalentes entre ellos en términos de bienestar social y variables de servicio.

- Escenario subsidio (SUB+VE)

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b,n}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_a = 0
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

- Escenario tarificación vial (TAR+VE)

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b,n}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_b \cdot Y_b = G
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

- Escenario subsidio y tarificación vial (SUB+TAR+VE)

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b,n}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_b \cdot Y_b + Y_a \cdot P_a \cdot \frac{l}{a} = G
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

- Escenario subsidio con tarifas no negativas (SUBP+VE)

$$\begin{aligned}
 & \underset{f,p,P_a,P_b,Y_a,Y_b,n}{\text{máx}} && BS \\
 & \text{s.a.} && RG \\
 & && P_a = 0 \\
 & && P_b \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Estos últimos escenarios permiten analizar qué es lo que ocurre cuando se aplican políticas económicas y vías exclusivas a la vez.

### 3.8. Extensión a dos períodos

La extensión del modelo a dos períodos que se hace en esta tesis es útil para investigar cómo se comportan las políticas en estudio cuando se levanta el supuesto de existencia de un solo período de características homogéneas. Esta extensión considera dos períodos homogéneos: uno asociado a hora punta y otro a fuera de punta. Para efectos de modelación se debe fijar la duración de cada uno de los períodos:  $H_P$  y  $H_{FP}$ . Además, el largo del viaje en período punta es distinto (y mayor) al del período fuera de punta.

Las variables de optimización son prácticamente las mismas, pero se debe decidir en este caso cuáles son específicas del período y cuáles adoptarán valores comunes a ambos períodos. En muchos casos, como el de las tarifas, la respuesta dependerá de la política que la autoridad tome.

En esta extensión se asume que la demanda total por viajes de cada período es inelástica y no existe respuesta en este sentido de los usuarios frente a diferentes tarifas y tiempos de viajes entre períodos: las demandas no tienen elasticidades intertemporales. En cada período se aplican distintos modelos de partición modal pero con la misma especificación de la función de utilidad. En el período punta se ocupa exactamente el mismo que el utilizado para un período.

Las funciones de tiempo son las mismas y lo que cambia son las variables que se evalúan. El tiempo de espera para el período punta se calcula con la frecuencia del período punta y el tiempo de espera del otro período, con la otra frecuencia. Algo similar ocurre para los tiempos de viaje. Los tiempos de acceso son los mismos para ambos períodos ya que la distancia entre paraderos no puede variar.

La función de costos especificada permite modelar directamente los dos períodos, evaluando con la flota total (que es la máxima entre las flotas necesarias para cubrir cada período) y con los vehículos-kilómetro de cada período.

Para la función objetivo, el bienestar social, se usan las mismas funciones pero se compatibilizan las unidades: el excedente de los consumidores de cada período se pondera por la duración de cada período para obtener el excedente en [\$/día], las recaudaciones deben ser las recaudaciones totales durante los dos períodos y el costo debe ser el costo de operar todas las horas de cada período. El bienestar social resultante se presenta en la siguiente ecuación:

$$BS = \sum_t \left[ H_t \cdot \left( \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \ln[\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)] \right) + \left( Y_b^t \cdot P_b^t + Y_a^t \cdot P_a^t \cdot \frac{l^t}{a^t} \right) \right) \right] - G + \bar{E} \quad (3.48)$$

Donde el índice  $t$  se refiere al período,  $G$  los costos operacionales del sistema de bus y  $\bar{E}$  representa la constante que viene del excedente de los consumidores.

Las restricciones generales son las mismas aplicadas a las variables de cada período. La única que cambia es la asociada al tamaño de los vehículos ya que se utilizan los mismos vehículos en ambos períodos y por lo tanto el tamaño debe ser suficiente para transportar a la demanda de ambos períodos. Las restricciones quedan de la siguiente manera.

$$k \geq \frac{Y_b^t \cdot l^t}{f_t} \quad \forall t \quad (3.49)$$

Por las mismas razones enunciadas en la sección 3.6 para uno de los dos períodos la restricción va a ser una igualdad, ya que no resulta conveniente tener capacidad ociosa en ambos períodos.

En esta extensión se analizan dos situaciones distintas. Una es la más general, descrita anteriormente, y la otra es con una restricción adicional: no hay diferenciación intertemporal de precios, es decir, la tarifa del bus y el cobro al automóvil son independientes del período. Evidentemente esta última situación al incluir una restricción adicional es subóptima con respecto al problema general, pero resulta interesante pues permite analizar lo que ocurre cuando no se diferencian las tarifas o, visto de otra manera, cuánto se gana diferenciando las tarifas por período bajo los distintos escenarios de políticas.

Nótese que en el problema general de dos períodos la condición de equivalencia en bienestar social entre los escenarios de políticas de subsidio y tarificación se mantiene: ocurre exactamente lo mismo que antes ya que al sumarle cierta cantidad a cada tarifa no varía el bienestar social manteniendo el mismo equilibrio. Visto de la otra manera, va a existir un  $[(P_a^t + c_{0a}) \cdot \frac{l^t}{a^t} - P_b^t]$  óptimo para cada par de tarifas y período, lo que implica que va a haber 4 variables que se pueden identificar sólo si se les agrega una restricción adicional.

En el problema sin diferenciación intertemporal de tarifas, en cambio, deja de ocurrir esta equivalencia y por lo tanto se deben replantear los escenarios. Esto ocurre debido a que la cantidad a sumarle a  $P_a$  para que no varíe el equilibrio es distinto para cada período ya que el largo de viaje y la tasa de ocupación difieren: si se le suma  $\Delta$  a la tarifa del bus hay que sumar  $\Delta \cdot \frac{l^t}{a^t}$  a la tarifa del auto del período  $t$  lo que lo hace incompatible con la restricción de que los precios sean los mismos en cada período. En este caso, se agrega un escenario nuevo tanto para flujo mixto como para vías exclusivas y se mantienen los tres escenarios existentes asociados a tarifas: tarificación, subsidio y ambas medidas con la restricción de que se pueda financiar el sistema de buses con las recaudaciones. Este nuevo escenario corresponde al problema de maximización de bienestar sujeto sólo a las restricciones generales RG y se denomina SUB+TAR. El escenario antes llamado de esa forma se denomina SUB+TAR restringido.

Por último, se puede ver fácilmente que en el caso de dos períodos, la política de tarificación de estacionamiento es equivalente a la política de tarificación vial sólo si se permite cobrar tarifas de



estacionamiento diferentes en cada período. Si se impone que la tarifa por estacionamiento, que se paga una vez por viaje, sea la misma en ambos períodos las políticas difieren.

### 3.9. Síntesis y comentarios

En este capítulo, se plantea de manera completa el modelo microeconómico central de esta tesis. Se describe detalladamente los aspectos generales de modelación, la situación en la cual se enmarca este modelo, cómo se trata la demanda por viajes y por modo, los costos y tiempos que enfrentan los usuarios al momento de viajar, la función de gasto de los operadores del sistema de transporte público y otros.

Se trata de un modelo en el que el planificador central decide las reglas del juego pensando en maximizar el bienestar social, es decir, según las políticas de transporte que se adopten fija las tarifas y las variables de diseño del transporte público (frecuencia, tamaño de buses y distanciamiento de paraderos). Con estas variables definidas, los usuarios deciden en qué medio se transportan a sus destinos de acuerdo a sus propias preferencias y siempre pensando en maximizar su utilidad.

El modelo desarrollado en este capítulo, si bien utiliza como base el modelo planteado por Basso et al. (2010) posee bastantes cambios y extensiones en la dirección de acercar el modelo a la realidad y hacerlo más completo. Entre estos cambios destacan: el modelamiento de la demanda por modo a través del logit binomial con varios estratos, lo que permite capturar de buena manera la heterogeneidad de la población; un cambio en la forma de representar los tiempos en movimiento pasando de una función lineal a una función potencial; se incorpora detalladamente el modelamiento de la operación en paraderos; la función de gasto del sistema de transporte público se abarca de manera mucho más completa y detallada; y se plantea la posibilidad de extender el análisis a dos períodos.

A pesar de que el modelo tiene algunas limitaciones, permite concluir, dentro del contexto, acerca de políticas de transporte. El planteamiento de los escenarios permite hacer bastante análisis: de comparar los óptimos y equilibrios resultantes se pueden investigar las implicancias de cada política; de restar los beneficios sociales máximos que se alcanzan en cada escenario se obtiene la variación de bienestar social, que representa el beneficio de una política, por ejemplo, el beneficio social de implementar vías exclusivas es directamente la resta entre los valores de la función objetivo (en el óptimo) de los escenarios VE y BASE. Adicionalmente deja la posibilidad de evaluar las políticas y combinaciones de ellas. También es viable, en términos de beneficios, investigar en qué orden conviene aplicar las políticas según las preferencias y prioridades del planificador; además, y muy importante, permite estudiar los efectos distributivos de cada una de las políticas.

Como se puede ver a lo largo del capítulo, existe una cantidad no despreciable de parámetros,

los que deben ser obtenidos de las mejores fuentes posibles si es que se quiere obtener resultados y conclusiones útiles de esta aplicación. Muchos de estos parámetros van a ser específicos de un lugar geográfico principalmente por el contexto de la ciudad en la cual se estimen y por lo que es recomendable compatibilizarlos. Se presentan, en el siguiente capítulo, los parámetros a utilizar.

Por otro lado, para que el análisis y las conclusiones de políticas sean sólidos, se debe hacer un análisis de sensibilidad importante a los parámetros y a algunos supuestos, lo que se lleva a cabo en el capítulo 6, después del análisis central del capítulo 5.

## Capítulo 4

# Parámetros e implementación computacional del modelo

La idea central de este capítulo es explicar en detalle la preparación de datos y la codificación del problema con sus respectivos escenarios en un software de optimización con el propósito de aplicar el modelo y así cumplir con la segunda parte del objetivo de la tesis: implementar el modelo a fin de estudiar y concluir acerca de políticas para combatir la congestión.

Para cumplir con este objetivo se deben hacer dos tipos de aplicaciones: (i) una aplicación central sobre la cual se hace un análisis completo de resultados y (ii) aplicaciones a modo de análisis de sensibilidad para estudiar en detalle qué ocurre cuando se alteran parámetros y supuestos. Este capítulo se enfoca en explicar los parámetros que se utilizan en la aplicación central de la tesis y, tras esto, en la implementación computacional del modelo. La aplicación central corresponde a implementar el modelo descrito en el capítulo 3 y resolver los 10 escenarios planteados con los parámetros y codificación adecuados.

En la primera sección se presentan los resultados de una búsqueda exhaustiva de los parámetros que mejor se adecuen al contexto de modelación. Evidentemente existen parámetros muy difíciles de obtener con certeza, por lo tanto la opción que se toma en esos casos es suponer un valor razonable basado en los antecedentes con que se dispone y hacer un análisis de sensibilidad con respecto a ese parámetro en particular.

Para la codificación del problema se busca un software de optimización adecuado, que sea capaz de resolverlo en un tiempo sensato. En esta etapa se debe tener en cuenta que el problema no es lineal, posee restricciones de varios tipos y tiene varias variables de optimización (discretas y continuas). Por esto se busca también optimizar el código, de manera de reducir los tiempos de resolución y aumentar la precisión.

## 4.1. Parámetros

El primer paso para declarar los parámetros a utilizar es fijar el contexto de modelación, ya que éstos son muy distintos para una ciudad mediana como Viña del Mar, una grande como Santiago, o más diferentes aún para una ciudad de otro país. En este sentido la aplicación del modelo se centra, a modo de ejemplo, en la ciudad de Santiago y por lo tanto los valores de los parámetros van a estar, en parte, asociados a esta ciudad.

Las principales fuentes de información son estudios encargados por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA) que corresponde al “Programa de Vialidad y Transporte Urbano” del Ministerio de Planificación. Entre estos estudios, los principales son los siguientes:

- Actualización de Encuestas Origen Destino de Viajes, V Etapa, Encuesta Origen-Destino de Viajes 2001 de Santiago. SECTRA (2003a).
- Análisis modernización de Transporte Público, VI Etapa. Estructura de costos Transporte Público. SECTRA (2003b)
- Análisis y actualización del modelo ESTRAUS. SECTRA (2005).

En este capítulo se explicitan adicionalmente los parámetros de la aplicación de dos períodos ya que requiere de información adicional. Los parámetros que cambian para los análisis de sensibilidad se detallan en el capítulo y sección correspondientes a dichos análisis.

### 4.1.1. Parámetros generales

El largo de viaje de cada uno de los individuos,  $l$ , se supone igual a 10 km. Como se menciona en el capítulo anterior, cuando se extiende a dos períodos (punta y fuera de punta) se asume que los largos de los viajes son distintos. Esto implica que para un mismo valor de demanda se van a generar cargas diferentes de pasajeros, ya que la carga en un tramo es el producto de la demanda de pasajeros por hora por kilómetro ( $Y$ ) y el largo de viaje. Así, por ejemplo, si la demanda es de 1.200 pax/hr-km y el largo de viaje es de 10 kilómetros, la carga va a ser de 12.000 pax/hr, pero si el largo de viaje es de 5 km. la carga va a ser de 6.000 pax/hr. En ambos casos la cantidad de personas por hora por kilómetro que accede al sistema de transporte es la misma. Una implicancia de esto es que la cantidad de gente que aborda un bus por hora por kilómetro puede ser la misma, pero la cantidad de personas que debe transportar simultáneamente el sistema de buses es menor. Concretamente, para el período punta ( $P$ ) se adopta el mismo valor que para la aplicación central, es decir,  $l^P = 10$  km. y en el período fuera de punta ( $FP$ ) se utiliza 5 km, o sea,  $l^{FP} = 5$  km.

De acuerdo a las mediciones en terreno reportadas en SECTRA (2003a), la tasa de ocupación de un vehículo particular en un día laboral es de 1,5 pasajeros por vehículo tanto en horario punta mañana, como en punta medio día y en fuera de punta, por lo tanto se aplica esta tasa para todos los períodos: se fija  $a = 1,5$ . Por ejemplo, si 1.500 pasajeros deciden viajar en automóvil habrían circulando 1.000 vehículos con una tasa de ocupación promedio de 1,5.

Para el modelo de un período se considera que éste tiene una duración de 1 hora, ya que todo se analiza en base a la unidad horaria. En cambio, en la extensión a dos períodos, se asumen duraciones diferentes para ambos períodos. Éstas se fijan basadas en un período total de 16 horas que es el promedio de horas de operación de los servicios de bus (SECTRA, 2003b). La duración del período punta  $H^P$  se asume de 4 horas y la del período fuera de punta  $H^{FP}$  de 12 horas.

En el modelo, la distribución de las personas según estrato de ingreso es igual a lo largo del corredor y se supone exactamente la misma que la de Santiago. Los estratos que se definen para los modelos de partición modal son definidos únicamente para la proposición y calibración de estos modelos logit, y por ende no corresponden a ninguna estratificación oficial utilizada en otros estudios o encuestas. Por este motivo resulta imposible obtener el dato de la cantidad de personas por estrato en la ciudad de Santiago. Debido a lo anterior se supone que la cantidad de personas que pertenece a cada estrato sigue la misma distribución que la cantidad de hogares pertenecientes a cada estrato, información que sí se encuentra disponible en SECTRA (2005) y es obtenida a partir de los datos de SECTRA (2003a). Esta distribución se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.1: Distribución de los hogares según estrato

<b>Estrato</b>	<b>Rango de ingreso del hogar(*)</b>	<b>Total de hogares</b>	<b>Porcentaje</b>
Bajo	0 - 148.226	211.320	14 %
Medio - Bajo	148.226 - 296.452	412.910	28 %
Medio	296.452 - 592.904	476.960	32 %
Medio - Alto	592.904 - 1.185.808	250.240	17 %
Alto	1.185.808 ó más	141.870	9 %

Fuente: SECTRA (2005)

(\*) Pesos del año 2001

Como se puede observar el estrato que mayor cantidad de hogares tiene es el estrato medio. Muy de cerca lo sigue el estrato medio-bajo y ambos representan conjuntamente el 60% de los hogares. El estrato que menor representación posee es el estrato alto que alcanza un 9%.

#### 4.1.2. Parámetros de demanda

Para obtener el valor de la demanda total de viajes se toma como referencia un corredor de transporte público importante de la ciudad: Pajaritos. Según MTT (1998) en el sentido más cargado en la hora punta mañana (Poniente-Oriente), el valor de la carga de pasajeros varía entre 6.000 pax/hr y 14.000 pax/hr. Utilizando este intervalo como referencia, se asume una demanda ( $Y$ ) de 1.200 pax/hora-km, que, considerando el largo de viaje de 10 kilómetros, genera una carga constante de 12.000 pasajeros por hora ya que se está en una situación de demanda uniforme (figura 2.4). Este es un valor cercano a la carga máxima del corredor pajaritos y es una carga alta para un corredor de 3 pistas dentro de la ciudad de Santiago. En la extensión a dos períodos se usa como valor de la demanda para el período punta el mismo mencionado anteriormente y para el período fuera de punta un valor de 400 pasajeros por hora por kilómetro que, considerando que el largo de viaje en este período es de 5 kilómetros, produce una carga de 2.000 pasajeros por hora sobre el corredor. Se opta por este valor bajo ya que es la demanda que habrá en todo el período fuera de punta, que corresponde a 12 horas del día. En el capítulo 6 se hace un análisis para otros valores de demanda total de viajes y largo de viaje.

Para el modelo de partición modal, como se explica en la sección 3.2, se opta por hacer una transferencia de los modelos oficiales especificados y calibrados por SECTRA (2005). Esto quiere decir, a grandes rasgos, que se asume que las utilidades marginales de los atributos son las mismas.

Como en SECTRA (2005) modelan 4 propósitos y 11 modos, el primer paso de la transferencia del modelo es definir el propósito del cual se van a importar las utilidades marginales y los modos del modelo original que se van a adoptar como modos auto y bus. Para el modelo de un período y para el período punta se elige el propósito trabajo, mientras que para el fuera de punta se elige el propósito otros. Para el modo auto se decide asociarlo al modo auto-chofer y para el modo bus no hay que hacer supuestos ya que entre los 11 modos del modelo original existe el modo bus. El segundo paso de la transferencia es definir una función de utilidad cuyas variables se encuentren en el modelo original para que sea factible importar los coeficientes que las acompañan. Como se especifica en la sección 3.2, específicamente en la ecuación 3.3, las variables de la función de utilidad son simplemente el costo y el tiempo generalizado. Una vez decididas las variables, se adopta del modelo original los coeficientes que acompañan al costo, que son los opuestos de la utilidad marginal del ingreso, y se adoptan también las utilidades marginales del tiempo generalizado. Finalmente, lo único que falta para completar el modelo de elección modal son las constantes modales de la función de utilidad. Éstas no se pueden importar directamente del modelo original pues fueron calibradas bajo otras circunstancias, por ejemplo, en presencia de otros modos. Por este motivo es necesario recalibrarlas a partir de una partición modal observada para los dos modos en estudio y valores de los atributos (tiempo generalizado y costo) asociados a esa partición modal.

Los parámetros del modelo de partición modal, que se importan directamente del original calibrado en SECTRA (2005), se detallan en la siguiente tabla. Los estratos están numerados del 1 al 5 en orden ascendente de ingreso, es decir, el 1 corresponde al estrato de ingreso bajo y el 5 al estrato de ingreso alto (ver tabla 4.1).

Tabla 4.2: Parámetros modelo de partición modal

Parámetros	Punta	Fuera de Punta	Unidades
$\theta_{tg,auto}$	-0,0108	-0,0140	[utiles/min]
$\theta_{tg,bus}$	-0,0186	-0,0148	[utiles/min]
$\theta_{cost}^1$	-0,0040	-0,0021	[utiles/\$](*)
$\theta_{cost}^2$	-0,0025	-0,0021	[utiles/\$](*)
$\theta_{cost}^3$	-0,0022	-0,0014	[utiles/\$](*)
$\theta_{cost}^4$	-0,0017	-0,0011	[utiles/\$](*)
$\theta_{cost}^5$	-0,0010	-0,0011	[utiles/\$](*)

Fuente: SECTRA (2005)

(\*) Pesos del año 2001

De los valores de la tabla 4.2 se puede observar directamente que el valor del tiempo generalizado en bus es mayor al valor del tiempo generalizado en auto, lo que implica que las personas están dispuestas a pagar más por reducir en un minuto su viaje en bus, que por reducir un minuto de su viaje en auto. El coeficiente del costo es mayor a medida que aumenta el ingreso o, equivalentemente, la utilidad marginal del ingreso es menor a medida que aumenta el ingreso, lo que es consistente con la teoría. En el período fuera de punta no existen diferencias significativas entre los estratos 1 y 2 ni entre los estratos 4 y 5 ya que poseen la misma utilidad marginal del ingreso y por ende los mismos valores del tiempo. En el apéndice A se presentan los valores del tiempo resultantes para cada estrato y período.

Si se desea aplicar el modelo con variables en unidades diferentes, por ejemplo horas y dólares del 2009, es necesario aplicar los factores correspondientes a los parámetros de la tabla anterior. Los parámetros en las unidades compatibles con el resto se muestran en la tabla 4.3.

Estos datos se calculan con una variación de IPC desde el 1 de Agosto del 2001 al 31 de Agosto del 2009 de un 30,4%<sup>4</sup> y un valor del dólar observado al 31 de Agosto del 2009 de 550,54 pesos<sup>5</sup>.

<sup>4</sup>Realizado con la calculadora de variación del IPC del Instituto Nacional de Estadísticas. <http://espino.ine.cl/wr-aplicaciones/calculadoraipc/>

<sup>5</sup>Según informativo diario del Banco Central de Chile. <http://www.bcentral.cl/publicaciones/estadisticas/dinero-banca/pdf/id2009/inf20090831.pdf>

Tabla 4.3: Parámetros modelo de partición modal con unidades compatibles

Parámetros	Punta	Fuera de Punta	Unidades
$\theta_{tg,auto}$	-0,6480	-0,8400	[utiles/hora]
$\theta_{tg,bus}$	-1,1160	-0,8880	[utiles/hora]
$\theta_{cost}^1$	-1,6891	-0,8868	[utiles/US\$](*)
$\theta_{cost}^2$	-1,0557	-0,8868	[utiles/US\$](*)
$\theta_{cost}^3$	-0,9290	-0,5912	[utiles/US\$](*)
$\theta_{cost}^4$	-0,7179	-0,4645	[utiles/US\$](*)
$\theta_{cost}^5$	-0,4223	-0,4645	[utiles/US\$](*)

(\*) Dólares de Agosto del año 2009

Con estos parámetros es posible hacer la recalibración de las constantes modales. Este proceso consiste en encontrar los valores de las constantes que reproducen una partición de mercado observada cuando se evalúan las funciones de utilidad en valores de las variables asociados a dicha partición observada.

De acuerdo a la teoría, no es posible identificar igual número de constantes modales que modos, por lo tanto se puede fijar arbitrariamente las constantes modales del bus en cero y calibrar las del automóvil. Para esto es necesario tener básicamente dos cosas: una partición modal observada y los valores de los atributos asociados a esa partición modal. Ambas corresponden al año 2001 y están reportadas casi en su totalidad en los informes de SECTRA (2003a, 2005).

La partición modal observada de los 11 modos considerados por el modelo original se encuentra a nivel desagregado por período y estrato. Ésta se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.4: Partición modal observada desagregada por período y estrato

MODO	Ingreso 1		Ingreso 2		Ingreso 3		Ingreso 4		Ingreso 5	
	PM	FP	PM	FP	PM	FP	PM	FP	PM	FP
caminata	<b>38 %</b>	43 %	<b>29 %</b>	37 %	<b>16 %</b>	29 %	<b>9 %</b>	21 %	<b>3 %</b>	11 %
auto-chofer	<b>2 %</b>	2 %	<b>7 %</b>	6 %	<b>15 %</b>	13 %	<b>28 %</b>	25 %	<b>43 %</b>	47 %
auto-acompanante	<b>2 %</b>	2 %	<b>5 %</b>	3 %	<b>12 %</b>	8 %	<b>21 %</b>	12 %	<b>38 %</b>	21 %
bus	<b>52 %</b>	42 %	<b>53 %</b>	42 %	<b>47 %</b>	37 %	<b>30 %</b>	29 %	<b>9 %</b>	11 %
metro	<b>1 %</b>	1 %	<b>2 %</b>	2 %	<b>3 %</b>	4 %	<b>4 %</b>	6 %	<b>3 %</b>	5 %
taxi	<b>1 %</b>	2 %	<b>0 %</b>	1 %	<b>1 %</b>	2 %	<b>1 %</b>	3 %	<b>0 %</b>	3 %
taxi colectivo	<b>3 %</b>	8 %	<b>3 %</b>	7 %	<b>2 %</b>	6 %	<b>1 %</b>	3 %	<b>0 %</b>	1 %
auto chofer - metro	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	1 %
acompanante-metro	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	0 %
bus-metro	<b>1 %</b>	1 %	<b>2 %</b>	1 %	<b>3 %</b>	2 %	<b>3 %</b>	1 %	<b>1 %</b>	1 %
taxi colectivo metro	<b>0 %</b>	0 %	<b>0 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	0 %	<b>1 %</b>	0 %
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Fuente: SECTRA (2005)



Para poder calibrar las constantes se tiene que contar con la partición modal adaptada para los dos modos disponibles en el modelo. Para hacer esto se considera como parte del modo auto los modos auto-chofer y auto-acompañante, y para el modo bus únicamente el modo bus. Así se obtiene la siguiente partición modal.

Tabla 4.5: Partición modal observada desagregada por período y estrato

MODO	Ingreso 1		Ingreso 2		Ingreso 3		Ingreso 4		Ingreso 5	
	PM	FP	PM	FP	PM	FP	PM	FP	PM	FP
Auto	7 %	8 %	18 %	18 %	36 %	36 %	62 %	56 %	90 %	86 %
Bus	93 %	92 %	82 %	82 %	64 %	64 %	38 %	44 %	10 %	14 %
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Para caracterizar mejor la partición modal que se usa como referencia, se presenta en las siguientes figuras la elección de modo observada adaptada agregada y desagregada por estrato de cada período.

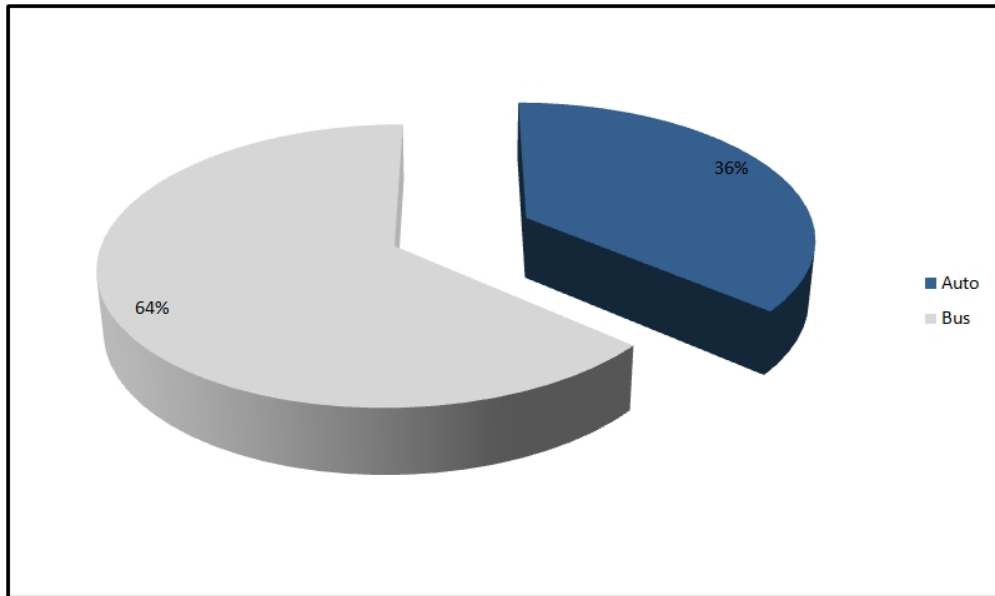


Figura 4.1: Partición modal agregada observada, adaptada a dos modos. Período punta.

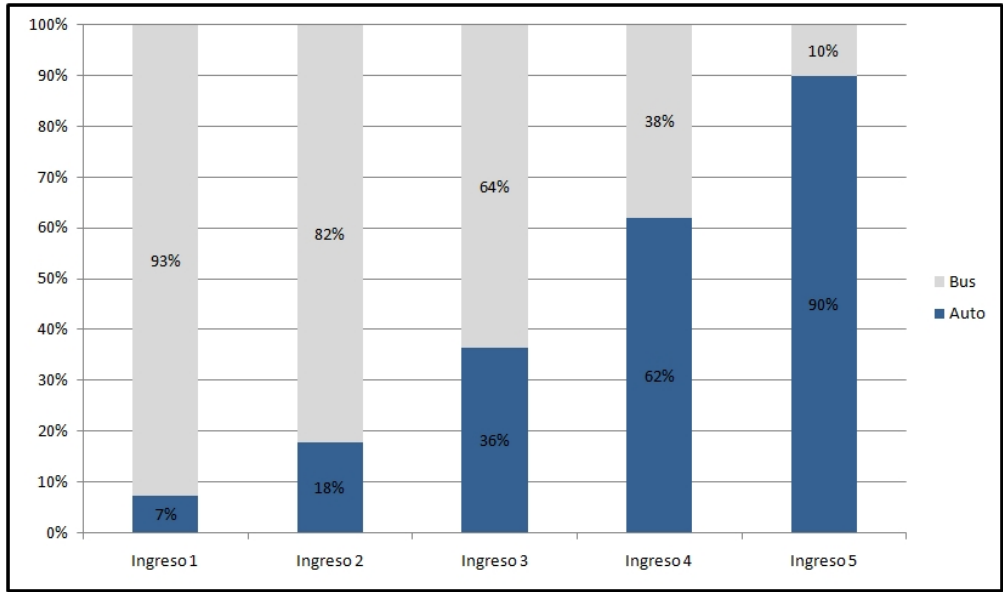


Figura 4.2: Partición modal observada adaptada a dos modos desagregada por estrato. Período punta.

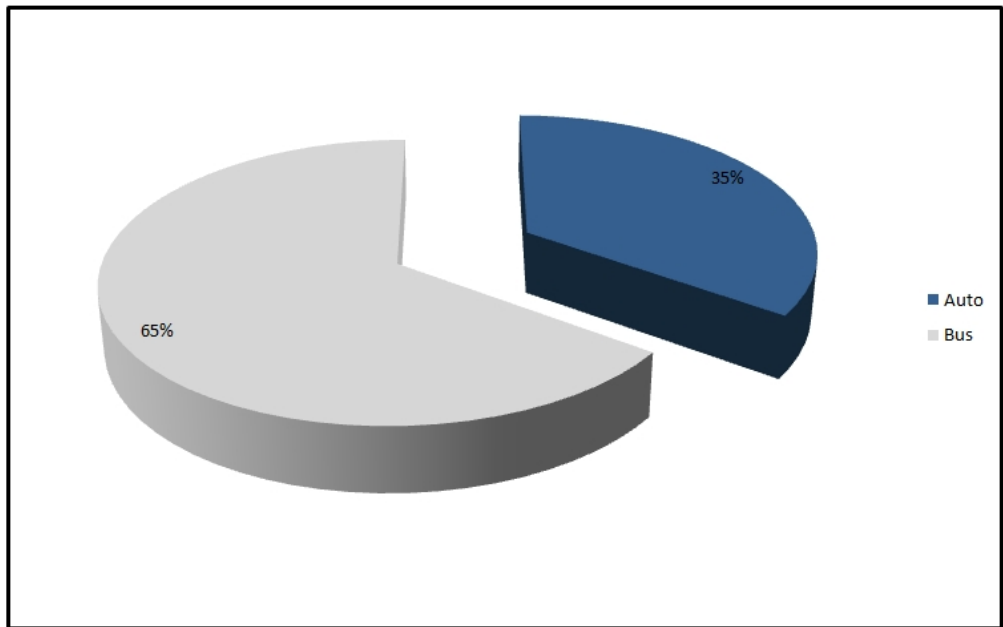


Figura 4.3: Partición modal agregada observada, adaptada a dos modos. Período fuera de punta.

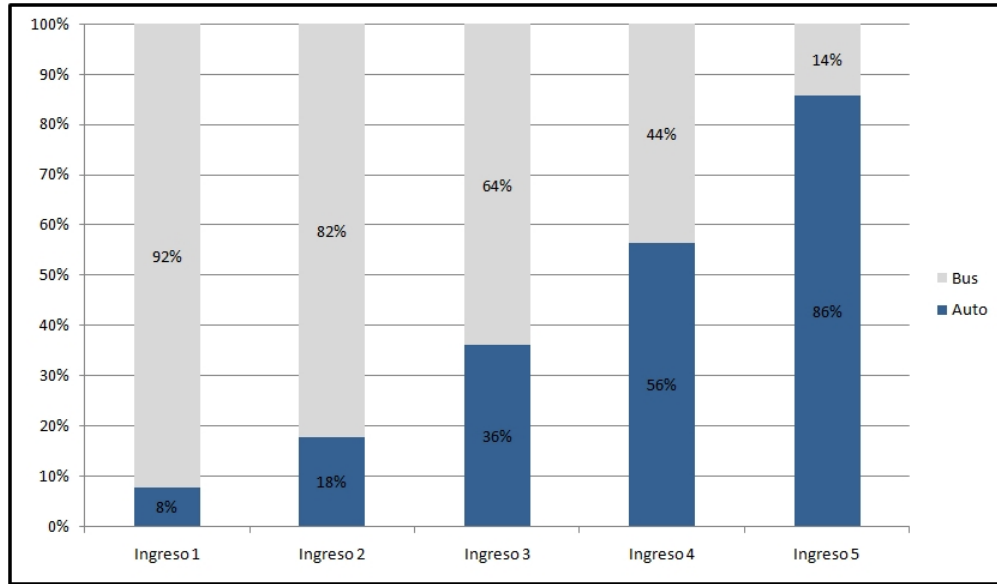


Figura 4.4: Partición modal observada adaptada a dos modos desagregada por estrato. Período fuera de punta.

Los valores de los atributos asociados a esta partición modal observada se presentan en la siguiente tabla. Las fuentes principales de información son los estudios de SECTRA (2003a, 2005).

Tabla 4.6: Valores de los atributos observados para la calibración de las constantes modales

Variable	Modo	Periodo Punta	Periodo Fuera de punta	Unidades
Tarifa	Auto	1505,80	752,90	[\$]
	Bus	290,00	290,00	
Tiempo de Viaje	Auto	25,80	24,00	[min]
	Bus	38,14	25,76	
Tiempo de Espera	Auto	0,00	0,00	[min]
	Bus	4,87	7,00	
Tiempo de Acceso	Auto	0,00	0,00	[min]
	Bus	6,24	6,24	

En esta tesis, para efectos de calibración de las constantes modales, la tarifa de viajar en auto corresponde a la suma del gasto por combustible, lubricantes, neumáticos y otros costos asociados a la operación de un vehículo liviano. Para el transporte público se adopta como supuesto, en este proceso de recalibración, que el tiempo de acceso es el mismo en ambos períodos y que el tiempo de espera es superior en período fuera de punta porque se observan frecuencias menores. Otro aspecto importante para mantener consistencia entre el modelo teórico y los datos a usar tiene que ver con

la definición de capacidad del bus. En el modelo de esta tesis, se considera una cierta capacidad del bus que pueda transportar a toda la gente: en cada bus viajan exactamente  $k$  pasajeros y según los supuestos del modelo esto implica que algunos van sentados y otros de pie. Este valor  $k$  corresponde a la capacidad total del bus incluyendo el número de asientos y la cantidad de gente que puede ir de pie. La pregunta relevante, entonces, es si los valores subjetivos del tiempo del modelo de partición modal capturan este aspecto o no. La respuesta es que sí hay consistencia: el modelo de partición modal está calibrado a partir de datos de la encuesta origen destino del año 2001. De acuerdo a SECTRA (2003b) la mayoría de los buses en operación ese año poseen una capacidad para 80 personas, 45 asientos y 35 personas de pie. Además en el período punta mañana, que es el período donde está calibrado el modelo, la tasa de ocupación de los buses llega en muchos casos a ser superior a 70 pasajeros (SECTRA 2003a) por lo tanto está recogido en el modelo, específicamente en los valores de las utilidades marginales, el hecho de que existe un alto grado de personas de pie en el bus. Por esta misma razón, es decir, que las condiciones en donde se obtienen los parámetros de elección modal incluye una alta proporción de pasajeros de pie, es que existe consistencia entre el supuesto sobre la capacidad ( $k$ ) de la tesis y el modelo utilizado de elección modal.

Con estos datos se realiza la recalibración de constantes modales cuyo resultado se presenta en la tabla 4.7. Esta calibración corresponde a despejar la constante de la ecuación de partición modal, evaluando las variables de la tabla anterior y la partición modal observada. Por ejemplo, para el estrato  $i$ , la demanda por modo se puede deducir de la ecuación 3.4 y corresponde a:

$$Y_m^i = Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (4.1)$$

De la partición modal observada se conoce la demanda por modo  $Y_m^i$ , y se evalúan las funciones de utilidades quedando como única variable la constante modal del modo auto para el estrato en cuestión. Despejando se llega a que:

$$\theta_a^i = \ln \left( \exp(\theta_{tg,b} \cdot tg_b + \theta_{cost}^i \cdot cost_b) \cdot \frac{Y_a^i}{Y_b^i} \right) - \theta_{tg,a} \cdot tg_a - \theta_{cost}^i \cdot cost_a \quad (4.2)$$

Donde los tiempos y costos son los de la tabla 4.6 y los parámetros  $\theta_{tg,m}$  y  $\theta_{cost}^i$ , de la tabla 4.2.

Tabla 4.7: Constantes modales del automóvil por período y estrato

<b>Estrato</b>	<b>Período Punta</b>	<b>Período Fuera de Punta</b>
Bajo	1,287	-2,086
Medio - Bajo	0,482	-1,141
Medio	1,090	-0,507
Medio - Alto	1,531	0,184
Alto	2,365	1,726

### 4.1.3. Parámetros de tiempos de transporte

Dentro de las funciones de tiempo del modelo existen varios parámetros que estimar. Los correspondientes a las funciones de demora en paraderos se explican en la siguiente subsección. La capacidad de una vía también es tratada en un punto aparte.

El tiempo de espera es una fracción  $\theta$  del intervalo teórico de tiempo entre dos buses cuya frecuencia es  $f$  (ecuación 3.5). Para esta aplicación central, el parámetro  $\theta$  se asume igual a 0,5. Esto corresponde exactamente a pensar en el tiempo promedio de espera cuando la llegada de buses es regular, es decir, viajan (y llegan a los paraderos) a intervalos de tiempo constante, y además la llegada de pasajeros al paradero sigue una distribución uniforme.

En relación al tiempo de acceso, el único parámetro asociado es la velocidad de caminata  $V_{cam}$  que se utiliza para convertir la distancia de caminata en tiempo. Esta velocidad es estimada y reportada en SECTRA (2005) y su valor es 3,6 km/hr.

Como se puede notar en la ecuación 3.7, las funciones de tiempo en movimiento tienen dos parámetros:  $A_v$  y  $B_v$ . El primero es el cuadrado de la velocidad a flujo libre y el segundo tiene relación con cuanto disminuye la velocidad cuando el flujo es igual a la capacidad. La velocidad de flujo libre se fija en 60 km/hr. La idea de este valor es representar el hecho de que en un corredor, si es que no hay flujo, probablemente la velocidad sea mayor en algunos tramos pero debido a detenciones, por ejemplo, asociadas a semáforos, la velocidad a flujo libre en todo el corredor es inferior a la máxima que se alcanza en ciertos tramos. Con esto  $A_v$  es igual a  $3600 \text{ (km/hr)}^2$ . Cuando el flujo es igual a la capacidad de la vía, es decir, cuando el grado de saturación es 100 %, se asume que la velocidad disminuye a un tercio por lo tanto el parámetro  $B_v$  debe valer  $3200 \text{ (km/hr)}^2$  de manera que la raíz de la resta de  $A_v$  y  $B_v$  sea igual a 20 km/hr. En el apéndice B se hace una comparación con funciones BPR calibradas para Santiago.

#### 4.1.4. Operación en paraderos

En este modelo, el bus en cada paradero se demora una cantidad variable de segundos en la operación. Este tiempo de operación en paraderos tiene 4 componentes: la demora fija por aceleración, frenado y tiempo muerto, denominada  $t_p$ ; la demora por transferencia de pasajeros que es el producto del tiempo que demora un pasajero en subir al bus  $t_{sb}$  y la cantidad de gente que sube en el paradero; la demora en cola  $d_q$  y la demora interna  $d_i$ . Las cuatro componentes son explicadas en detalle en la sección 3.3 del capítulo anterior, pero es importante recordar que  $t_p$  y  $t_{sb}$  son valores fijos y tanto  $d_q$  como  $d_i$  son funciones.

Las funciones de demora que se utilizan en el modelo son las propuestas por Fernández et al. (2000) y en este capítulo solamente se reportan los parámetros que son calibrados en el mismo trabajo. Así los parámetros de las funciones de capacidad ( $C_p$ ), demora interna ( $d_i$ ) y demora en cola ( $d_q$ ) son los que se explicitan a continuación en las tablas 4.8, 4.9 y 4.10. Las funciones corresponden a las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 respectivamente.

Tabla 4.8: Parámetros función de capacidad de paraderos

Parámetro	Valor
$a_p$	2,6582
$b_p$	-88,8990
$c_p$	-7,6714
$d_p$	317,4300

Fuente: Fernández et al. (2000)

Tabla 4.9: Parámetros función de demora interna en paraderos

Parámetro	Valor
$a_{e1}$	0,060447
$a_{e2}$	1,382400
$b_{e1}$	0,209610
$b_{e2}$	0,382170
$c_e$	-0,013926

Fuente: Fernández et al. (2000)

Tabla 4.10: Parámetros función de demora interna en cola en paraderos

Parámetro	Valor
$a_{q1}$	0,348070
$a_{q2}$	0,000000
$a_{q3}$	0,008199
$b_{q1}$	6,221300
$b_{q2}$	-0,113500

Fuente: Fernández et al. (2000)

El tiempo  $t_p$  es la suma del tiempo de despeje, que es el tiempo que se ocupa en la aceleración y frenado, y el tiempo muerto que corresponde a la apertura y cierre de puertas más otras operaciones del bus previas o posteriores a la transferencia de pasajeros, como por ejemplo, el acomodamiento del bus al nivel de la acera.

En relación al tiempo de despeje, Fernández y Planzer (2002) plantean que se puede obtener de ecuaciones de cinemática dado que está directamente relacionado al tiempo por aceleración y frenado en paraderos. Para una velocidad de circulación entre paraderos de 40 Km/hr, una tasa de aceleración de 0.9 m/sg<sup>2</sup> y una tasa de frenado de 1.2 m/sg<sup>2</sup> se obtiene un tiempo de despeje de 10,8 sg. Los valores de velocidad, tasas de aceleración y frenado vienen de un estudio hecho para Santiago. Fernández y Tyler (2005) no reportan valores empíricos de tiempos de despeje pero utilizan en sus ejemplos un valor de 15 sg. Fernández et al. (2008) reportan que para buses articulados de 18 metros de largo (capacidad 160 pasajeros) el tiempo de despeje es de 20 segundos basados en mediciones de terreno. El rango de valores encontrados en terminales de buses urbanos en EE.UU. y reportados en el Highway Capacity Manual (TRB, 1985) indica que el tiempo de despeje se mueve en el intervalo [7 sg - 15 sg].

Respecto del tiempo muerto, Gibson et al. (1997) estiman una función para el tiempo de servicio por pasajeros en Santiago basados en una operación con un andén formal<sup>6</sup> de la cual se desprende que el tiempo muerto es nulo si no hay congestión de pasajeros en el andén, e igual a 2,34 sg. si hay congestión. York (1993) encuentra para buses en Londres valores de tiempo muerto que oscilan entre los 2,8 sg y los 8,3 sg. dependiendo del tipo de bus. El valor menor corresponde al bus rojo pequeño de Londres, mientras que el mayor, a un bus de dos pisos y dos puertas. Un valor intermedio (3,55 segundos) es encontrado para un bus de piso bajo. Fernández et al. (2008) estima valores altos: 9,32 segundos para un troncal y 8,04 para un alimentador. Este aumento en los tiempos lo explican principalmente por el cambio de tecnología (se abren las puertas cuando se detiene completamente el bus) y a que las mediciones fueron realizadas en Julio del 2007 en donde

---

<sup>6</sup>Andén formal se refiere a una zona claramente definida de la acera donde los pasajeros esperan a los vehículos

la congestión (y caos) era grande debido a la reciente (y mala) implementación del Transantiago. En Estados Unidos se reportan en el HCM (TRB, 1985) tiempos muertos que varían entre los 2 y los 5 segundos.

Recordando que se asume en la tesis un valor constante para el tiempo de despeje y el tiempo muerto, con estos antecedentes, se fija un valor base para la aplicación central para  $t_p$  de 15 segundos. En el capítulo 6 se hace un análisis de sensibilidad a este parámetro.

Las estimaciones para el tiempo marginal de subida  $t_{sb}$  entregan valores bastante similares entre ellas para un misma forma de pago, es decir, este tiempo está más asociado a la operación de pago que a la localidad donde se implementa. En esta tesis se decide el valor de este parámetro pensando en un sistema de pago similar al que actualmente opera en Santiago: con tarjeta. York (1993) encuentra para Londres valores que oscilan entre 2 y 3 segundos. Los parámetros del tiempo de servicio de pasajeros en Estados Unidos (TRB, 1985) sugieren tiempos de subida entre 1,5 y 2,5 segundos por pasajero. La estimación hecha por Fernández et al. (2008) para servicios troncales es de 2,08 segundos para una cantidad baja de pasajeros subiendo al bus y un tiempo máximo de 2,93 segundos cuando suben más de 40 personas al bus. Estas estimaciones sitúan el valor del tiempo marginal de subida  $t_{sb}$  entre 1,5 y 3 segundos. Como parámetro central se adopta un valor de 2,5 segundos/pasajero.

#### 4.1.5. Factor de equivalencia bus-auto

La función propuesta en el modelo para el factor de equivalencia de un bus es de la forma  $b(k) = mk + n$ . Generalmente este factor se asume que varía con la capacidad del bus, por ejemplo, en SECTRA (1988) y MTT (2004) se presentan estudios para diferentes tipos de buses donde se estiman valores del factor de equivalencia. Éstos son los que se utilizan oficialmente en proyectos de SECTRA y Transantiago y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.11: Factores de equivalencia bus-auto según tipo de bus

Descripción Bus	Capacidad Bus [pasajeros]	Factor
Liebre, bus de 8-9 metros de dos puertas	40	1,65
Bus de 12 metros, de piso bajo y tres puertas	80	2
Bus articulado de 18 metros con piso bajo y 4 puertas	160	3

En el modelo de la tesis este factor de equivalencia se refiere exclusivamente al tiempo en movimiento y no debe incorporar el efecto de operación en paraderos ya que éstos son modelados aparte. Los factores de la tabla 4.11 son calculados en descargas de vehículos de colas para una línea



de detención específica, por lo tanto corresponden a la equivalencia netamente en movimiento que es exactamente lo que se busca. Por este motivo una regresión lineal de estos factores es una buena estrategia para la estimación de los parámetros. Los resultados de dicha regresión se muestran en la siguiente figura.

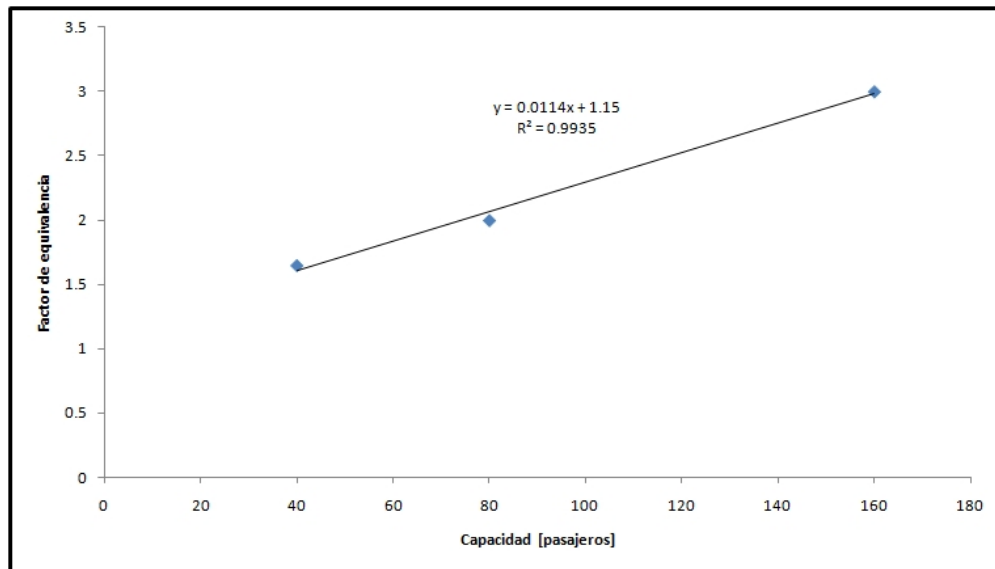


Figura 4.5: Regresión lineal de factores de equivalencia versus capacidad del bus.

Si bien son pocos datos observados, la regresión posee un muy buen ajuste. Debido a esto se utilizan los parámetros obtenidos en ella, es decir,  $m = 0,0114$  y  $n = 1,15$ . Entonces el factor de equivalencia bus-auto queda definido por la siguiente función:

$$b(k) = 0,0114 \cdot k + 1,15 \quad (4.3)$$

#### 4.1.6. Capacidad vía

La capacidad de la vía se estima de manera bastante simple: es el producto entre el flujo de saturación base de una pista, el número de pistas y un factor de reducción. El flujo de saturación base se adopta igual a 2.000 veq/hora-pista. Como se consideran 3 pistas, la capacidad base de la vía, sin reducciones, es 6.000 veq/hora. Pero para representar el hecho de que en un corredor real no se circula sin interrupciones, si no que existen intersecciones semaforizadas o de prioridad, se le aplica un factor de reducción igual a 0,6. Esto es equivalente a pensar en un corredor en el que todas las intersecciones semaforizadas tienen un porcentaje de verde efectivo de 60%. Así la capacidad de la vía queda en un total de 3.600 veq/hora.

#### 4.1.7. Costos de operación

Para el modo automóvil el costo de operación es un valor constante ( $c_{0a}$ ) que se gasta por kilómetro y que tiene relación con el gasto en combustible, lubricante, neumáticos y otros. Estos costos de operación del automóvil son estimados por Fuster (2008) y en esta tesis lo único que se hace es adaptarlo para compatibilizar unidades. Así el valor de  $c_{0a}$  es de 0,3566 dólares del 31 de Agosto del 2009.

Los parámetros de la función de gasto (ecuación 3.17) son estimados en SECTRA (2003b) a partir de la información de varias empresas de buses. Se estiman estos parámetros para los tipos de empresas que operaban en el año del estudio y para 4 tecnologías que en ese entonces serían futuras y que en este momento ya están operando. Interesan los valores de los parámetros para las tecnologías futuras ya que, a diferencia de las que operaban, son para buses de distinto tamaño y están asociadas a una empresa modelo que opera los buses, en contraste con un sistema de microempresarios poco eficiente y en donde los costos dependen de la estructura particular del tipo de empresario. Estos parámetros se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.12: Parámetros de la función de gasto según capacidad del bus

Capacidad [pax]	A [\$ /mes-bus]	$p_m \cdot m$ [\$ /mes-bus]	$p_b$ [\$ /mes-bus]	$p_h \cdot n$ [\$ /mes-bus]	$C_b$ [\$ /veh-km]
40	261.070	93.712	345.591	916.368	112,2
80	261.070	140.576	561.483	916.368	186,6
120	261.070	175.710	701.102	916.368	213,0
160	261.070	210.852	941.667	916.368	296,8

Valores en pesos del año 2001 Fuente: SECTRA (2003b)

Como se puede observar el costo de administración y el costo por conductores por mes-bus es independiente del tamaño del bus, lo que es un supuesto del estudio. El resto de los parámetros depende del tamaño de bus que se opere. En el modelo planteado en esta tesis, la capacidad del bus es una variable que perfectamente puede asumir cualquiera de los valores indicados en la tabla, lo que implica que suponer alguno de estos parámetros o incluso el promedio de ellos sería incorrecto.

Para recoger correctamente el hecho de que los parámetros son distintos para diferentes tamaños de buses, se opta por incluir funciones para los parámetros. En el fondo, se adopta una función lineal en la capacidad del bus para cada parámetro.

Para simplificar la notación y facilitar la presentación de los datos la ecuación 3.17 se redefine de la siguiente manera:

$$G = (CC) \cdot B + \sum_t (CV) \cdot f_t \cdot H_t \quad (4.4)$$

El único cambio es la agrupación de los parámetros asociados a las distintas componentes. Basado en la información presentada en la tabla 4.12 y convirtiendo las unidades de acuerdo a las variaciones del IPC y valor del dólar señalados en la sección 4.1.2, los parámetros son los siguientes.

Tabla 4.13: Parámetros agrupados de la función de gasto según capacidad del bus

Capacidad [pax]	CC [US\$/dia-bus]	CV [US\$/veh-km]
40	133,17	0,26
80	154,82	0,43
120	169,21	0,49
160	191,92	0,68

Valores en dólares del año 2009

Lo que se hará, entonces, es suponer que  $CC$  y  $CV$  son función de la capacidad de los buses  $k$ . Así, los parámetros de las funciones  $CC(k)$  y  $CV(k)$  se obtienen simplemente de hacer una regresión lineal a los datos mostrados en la tabla 4.13. En las figuras 4.6 y 4.7 se puede ver que el comportamiento es bastante lineal por lo que la regresión tiene un muy buen ajuste.

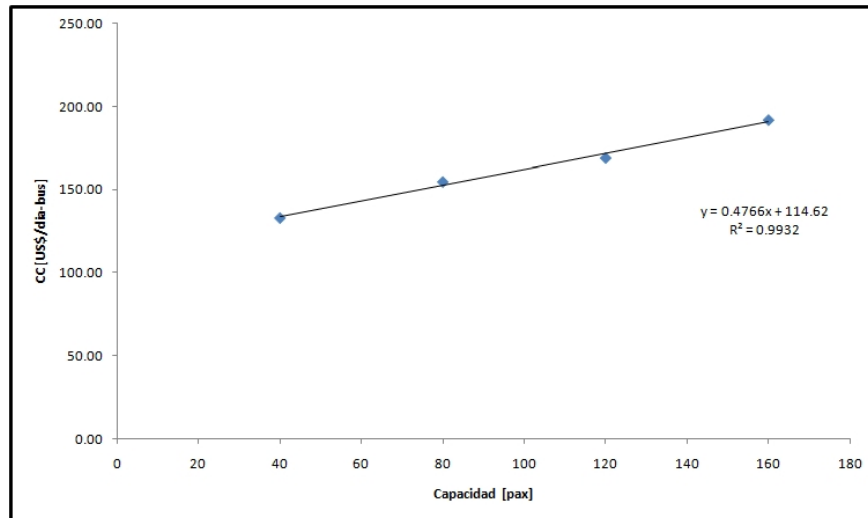


Figura 4.6: Regresión lineal al parámetro CC de la función de gasto.

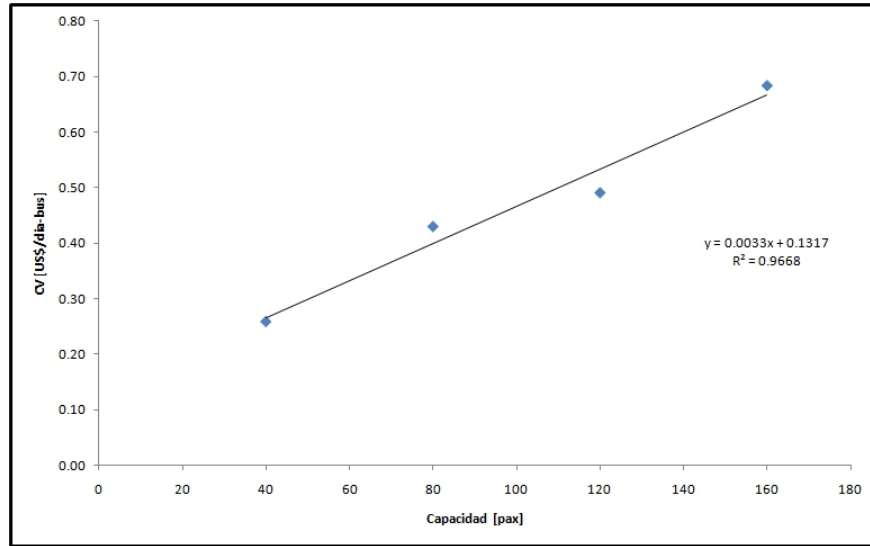


Figura 4.7: Regresión lineal al parámetro CV de la función de gasto.

Así las funciones para  $CC$  y  $CV$  son las siguientes:

$$CC(k) = 114,62 + 0,4766 \cdot k \quad (4.5)$$

$$CV(k) = 0,1317 + 0,0033 \cdot k \quad (4.6)$$

#### 4.1.8. Resumen

Los principales parámetros estimados en esta sección, que son los utilizados en la aplicación central de la tesis, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.14: Resumen de los parámetros adoptados para la aplicación central.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
$a$	Tasa de ocupación vehículo particular	1,5	[pax/veh]
$l$	Largo de viaje, un período	10	[km]
$l^P$	Largo de viaje, período punta	10	[km]
$l^{FP}$	Largo de viaje, período fuera de punta	5	[km]
$H^P$	Duración de período punta	4	[horas]
$H^{FP}$	Duración de período fuera de punta	12	[horas]
$Y$	Demanda de pasajeros. Modelo de un período	1.200	[pax/hr-km]
$Y^P$	Demanda de pasajeros período punta	1.200	[pax/hr-km]
$Y^{FP}$	Demanda de pasajeros período fuera de punta	400	[pax/hr-km]
$\theta$	Fracción asociada al tiempo de espera	0,5	[]
$V_{cam}$	Velocidad de caminata	3,6	[km/hr]
$A_v$	Parámetro de la función de tiempo en movimiento	3.600	[(km/hr) <sup>2</sup> ]
$B_v$	Parámetro de la función de tiempo en movimiento	3.200	[(km/hr) <sup>2</sup> ]
$t_p$	Tiempo de despeje más tiempo muerto en paraderos	15	[sg]
$t_{sb}$	Tiempo marginal de subida al bus	2,5	[sg/pax]
$m$	Pendiente de la función $b(k)$	0,0114	[auto/bus-pax]
$n$	Coefficiente de posición de la función $b(k)$	1,15	[auto/bus]
$C$	Capacidad de la vía	3.600	[veq/hora]
$c_{0a}$	Costo de operación de un automóvil	0,3566	[US\$/km]
$CC_0$	Parámetro de la función de gasto	114,621	[US\$/día-bus]
$CC_1$	Parámetro de la función de gasto	0,4766	[US\$/día-bus-pax]
$CV_0$	Parámetro de la función de gasto	0,1317	[US\$/veh-km]
$CV_1$	Parámetro de la función de gasto	0,0033	[US\$/veh-km-pax]

## 4.2. Implementación del modelo

Esta sección está enfocada a detallar los procesos relacionados con la aplicación misma del modelo, una vez fijados los parámetros. Se habla en términos generales cómo se plantea el modelo en el software de optimización. El programa elegido para resolver el problema de optimización en cada uno de los escenarios es Wolfram Mathematica y la totalidad de los códigos asociados a la aplicación central se encuentran adjuntos en el apéndice D.

No se puede plantear el problema literalmente como se ha descrito hasta ahora por diversos motivos. El primero es que existen funciones que se indeterminan en algunos puntos y el proceso de optimización se vería interrumpido por un error. El segundo motivo tiene relación con el tiempo de resolución: existen formas alternativas de plantear el problema, que demandan menos recursos y tiempo para resolverlo. Las adaptaciones hechas al código relacionadas a estos dos motivos son cubiertos en la sección 4.2.1.

La función de optimización usada para resolver el problema es NMaximize, que es una maximización numérica que siempre intenta encontrar un máximo global sujeto a las restricciones dadas. La función NMaximize requiere una región inicial para las variables para poder funcionar. Por ejemplo si  $x$  es la variable y  $[a; b]$  el intervalo inicial se puede entregar este intervalo de dos maneras: a través de una restricción del estilo  $a < x < b$  o directamente a través de la definición de las variables en la función, agregando en el código lo siguiente  $\{x, a, b\}$ . Si se entregan intervalos diferentes de ambas formas el intervalo en la definición de la variable se usa como inicial y la restricción solamente como una restricción que se debe cumplir. En caso de que no se entregue un intervalo inicial para alguna variable, el programa define por defecto el intervalo  $[-1; 1]$ .

La función NMaximize tiene varios métodos de optimización. Si no se le impone alguno, la función elige cuál método usa basado en el tipo de problema. Si la función objetivo y las restricciones son lineales, escoge programación lineal. Si las variables son enteras elige el método “Differential Evolution”. Para todos los demás casos usa el método “Nelder-Mead” y si éste se desempeña mal, cambia automáticamente a “Differential Evolution”.

Como este método de optimización requiere de intervalos iniciales, en algunos casos conviene entregárselos directamente. Para esto es necesario entender en detalle el problema de optimización y las implicancias que tiene el hecho de que incluye un equilibrio de partición modal. El estudio del problema y los intervalos iniciales se detallan en la sección 4.2.2.

### 4.2.1. Codificación

El primer punto a tocar es el planteamiento alternativo y equivalente del problema para mejorar su desempeño. Lo principal en este proceso es la reducción de variables, es decir, disminuir la cantidad de variables que maneja el programa a la menor posible.

La reducción más importante se hace con la demanda. En vez de considerar  $Y_a$  e  $Y_b$  como variables, se elige  $Y_a$  como la única y se utiliza el hecho de que sólo existen dos modos y por lo tanto la demanda por bus necesariamente es la demanda total menos la demanda por auto, es decir, se evalúa directamente  $Y_b = Y - Y_a$  (de la ecuación 3.6). Así el programa debe buscar el valor para  $Y_a$  y respetar una restricción de demanda (restricción 3.31), en vez de dos variables y dos restricciones.

Algo similar se realiza con la capacidad del bus. Según se planteó en el capítulo 3, se tiene que cumplir la igualdad mostrada en la ecuación 3.36, por lo tanto en vez de incluir  $k$  como variable de optimización propiamente tal, se obtiene a partir de la igualdad. Entonces, queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{(Y - Y_a) \cdot l}{f} \quad (4.7)$$

A diferencia de lo que ocurre con las demandas, este cálculo no es aplicable a dos períodos porque se supone que habrá un solo tamaño de buses y sólo en un período los buses van a operar a capacidad.

Para los escenarios en donde no hay tarificación vial se hace algo parecido: se evalúa directamente en las funciones  $P_a = 0$ , en vez de incluirlo como variable e imponer la restricción. Un ejemplo ilustrativo, que permite entender mejor a que se refiere el concepto de reducción de variables, es la evaluación de la función de bienestar en el escenario base. En el software sin las reducciones aparecería como  $BS[f, p, P_a, P_b, Y_a, Y_b]$ , pero en la práctica se usa  $BS[f, p, 0, P_b, Y_a, Y - Y_a]$ .

El segundo aspecto que es importante de adaptar en la codificación es la indeterminación de funciones. De una revisión de las funciones que componen el modelo (planteadas en el capítulo 3), se deben evitar dos posibles indeterminaciones: (1) que los denominadores de las fracciones deben ser diferentes a cero y (2) se deben respetar los dominios de las otras funciones, por ejemplo el caso de la raíz o del logaritmo.

Antes de revisar caso a caso las potenciales indeterminaciones es importante describir una particularidad del método de evaluación de puntos de la función NMaximize: los puntos que se evalúan no siempre respetan las restricciones. Para esto es útil clasificar las restricciones en dos

tipos: directas e indirectas. Las restricciones directas son aquellas que no involucran funciones y simplemente se restringe la variable con valores, en cambio las restricciones indirectas son aquellas que involucran funciones de las demás variables de optimización. Por ejemplo,  $0 < Y_a < Y$  es una restricción directa para  $Y_a$ , y  $0 < f \leq Cp$  es una restricción indirecta para  $f$  ( $Cp$  está dada por la ecuación 3.8 y es función de  $Y_a$ ,  $f$  y  $p$ ).

En el caso de las restricciones directas, el programa, en el peor de los casos, evalúa puntos situados en el valor límite de la restricción, o sea, siguiendo el ejemplo, podría evaluar  $Y_a = Y$  pero no valores superiores. En el caso de las restricciones indirectas, puede evaluar puntos más allá de los límites, por ejemplo, en la búsqueda del óptimo podría pasar por valores para  $f$  superiores a  $Cp$ . Si bien evalúa puntos que no cumplen las restricciones, la solución del problema siempre las cumple.

Con la comprensión de la forma en que se lleva a cabo el proceso de evaluación de puntos se puede pasar a revisar qué ocurre en cada caso.

En varias ocasiones ocurre que el denominador de cierta fracción es la frecuencia, por ejemplo el tamaño de buses se calcula directamente como se muestra en la ecuación 4.7. La restricción teórica (3.33) indica que la frecuencia debe ser mayor o igual a cero, pero de todas formas se podrían evaluar frecuencias nulas, por lo tanto, a modo de solución se cambia dicha restricción por la siguiente:

$$1 < f \leq Cp \tag{4.8}$$

El segundo denominador que se encuentra es el producto entre  $f$  y  $p$ . Éste también aparece en varias ocasiones, ya que la cantidad de personas que sube y baja de un bus en cada paradero es  $\frac{Y_b}{f \cdot p}$ . Imponer como restricción que el producto sea mayor que cero no es de mucha utilidad pues sería una restricción indirecta y en la evaluación de todas formas se podría violar. Por este motivo se opta por imponer una nueva restricción sobre  $p$  más restrictiva que la no negatividad pero, al igual que en el caso de la frecuencia, pensando en intervenir lo menos posible la restricción sustentada teóricamente. La nueva restricción es la siguiente:

$$0,1 < p \leq 5 \tag{4.9}$$

Que el número de paraderos sea igual a 0,1 implica que se ubica uno cada 10 kilómetros, lo que no es muy restrictivo.

De todas formas es necesario verificar que la solución no esté cerca de estos valores mínimos ni en las esquinas. Por ejemplo, si en el óptimo el número de paraderos por kilómetro es 0,1 se debe



eliminar esta restricción y resolver nuevamente. Lo mismo si se obtiene una frecuencia de 1 bus por hora.

Con respecto a respetar el dominio de las funciones hay problemas con el logaritmo que aparece en la función de capacidad de un paradero (ecuación 3.8) y con la raíz que aparece en la función para el tiempo en movimiento (ecuación 3.7).

Lo que aparece en la función de capacidad es lo siguiente:

$$\ln\left(\frac{Y_b}{f \cdot p}\right) \quad (4.10)$$

Según las adaptaciones hechas hasta ahora, esto sería en realidad:

$$\ln\left(\frac{Y - Y_a}{f \cdot p}\right) \quad (4.11)$$

Como ya se aseguró mediante las nuevas restricciones que el producto entre  $f$  y  $p$  no fuera cero, sólo falta imponer que el numerador no sea cero. Para esto se impone una nueva restricción lo menos intervencionista posible:

$$0 < Y_a < Y - 1 \quad (4.12)$$

De esta forma, recordando que la demanda está en unidades de pasajeros por hora por kilómetro, en el peor de los casos se va a evaluar  $Y - Y_a = 1$  lo que evita problemas para el logaritmo.

El otro problema ocurre con la función para el tiempo en movimiento cuya expresión es la siguiente (ecuación 3.7).

$$t_{mov} = \frac{1}{\sqrt{(A_v - B_v \cdot \frac{V}{C})}} \quad (4.13)$$

Evidentemente el radicando debe ser no negativo. Si se impone la restricción que el radicando no sea negativo de todas formas el programa evalúa puntos que no cumplen esta restricción ya que es una restricción indirecta, por lo tanto debe replantearse la función para que no haya problemas.

La función incluida en el código es la siguiente:

$$t_{mov} = \frac{1}{\sqrt{\max(A_v - B_v \cdot \frac{V}{C}, 1)}} \quad (4.14)$$

De esta manera nunca el radicando será negativo. Esto hace que la función no sea continua y por lo tanto existe un rango para el grado de saturación en donde no es válida esta expresión. Por esta razón es importante verificar en cada solución que el grado de saturación ( $V/C$ ) no sea cercano al grado de saturación crítico que hace que el radicando de 4.13 sea cero. Este grado de saturación crítico es 112,5% por lo tanto en caso de que el grado de saturación en la vía supere el 100% se debe investigar si la solución está en el punto de discontinuidad, inmediatamente antes o en un punto en la parte continua.

#### 4.2.2. Estudio del modelo computacional

Como la función NMaximize requiere de intervalos iniciales para las variables es necesario estudiar en más detalle el problema para entregar intervalos iniciales adecuados. Como se muestra aquí, este proceso además ayuda a entender la naturaleza del problema que se enfrenta.

Sobre el número de paraderos por kilómetro  $p$  la misma restricción (ecuación 4.9) impone un intervalo bastante razonable por lo que se opta por no entregarle uno adicional.

Las tarifas debieran variar significativamente según los escenarios que se esté evaluando, por lo tanto no se le entrega un intervalo inicial y se deja el que el programa le asigne uno por defecto: entre -1 dólar y 1 dólar. El único caso donde se puede acotar mejor la variable de tarifa es para la tarifa de un viaje en bus cuando se impone el autofinanciamiento del sistema de buses (escenarios BASE, TAR, VE, TAR+VE) ya que se sabe que debe ser positiva. Por este motivo se le da como intervalo inicial  $[0;1]$ .

En el caso de la frecuencia y las demandas las restricciones que se imponen entregan un intervalo inicial para ellas: la frecuencia puede moverse entre 1 y la capacidad del paradero (ecuación 4.8), mientras que la demanda por auto tiene como intervalo inicial prácticamente todos los valores posibles que puede alcanzar: entre cero y la demanda total menos uno (ecuación 4.12).

Con estas adaptaciones e intervalos iniciales ya está todo lo necesario para que el software pueda resolver el problema: no hay posibilidad de indeterminaciones y todas las variables tienen intervalos iniciales para la búsqueda del óptimo. Pero, el programa no es capaz de resolver el problema con estas condiciones, después de 23 minutos de trabajo sólo en el primer escenario (BASE) entrega como output un mensaje explicando que el óptimo no pudo ser encontrado.

Frente a esto la única solución razonable y que no significa pérdida de generalidad es entregar intervalos iniciales de búsqueda diferentes, que faciliten el hallazgo del óptimo. Es importante recordar que éstos funcionan sólo como intervalos iniciales y no como intervalos definitivos, es decir, el resultado de la optimización con la función NMaximize puede estar perfectamente fuera del intervalo inicial de búsqueda. Como los intervalos iniciales más amplios son los de la frecuencia y demanda, son éstos los que se decide acotar. Primero se hará un estudio para la demanda y luego para las frecuencias.

Para ver estos nuevos intervalos iniciales de la demanda conviene mirar qué ocurre con la restricción del equilibrio en la demanda. Es importante recordar que esta restricción juega el papel de representar el equilibrio modal de los usuarios. A continuación se presenta dicha restricción.

$$Y_m = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_m^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (4.15)$$

Esta restricción sobre la variable se puede expresar como una función de las demás como se explica en detalle en la sección 3.6. En resumen, si se está en situación de flujo mixto se tiene:

$$Y_a = \Psi(f, p, P_a, P_b, Y_a) \quad (4.16)$$

Si se incorporan vías exclusivas la función sería:

$$Y_a = \Omega(f, p, P_a, P_b, Y_a, n) \quad (4.17)$$

Para buscar dichos intervalos resulta provechoso graficar  $\Psi$  y  $\Omega$  solamente en función de  $Y_a$  y ver cómo se comporta para distintos valores de la frecuencia, el distanciamiento y las tarifas, con y sin vías exclusivas. En el fondo se fijan las demás variables y se analizan los problemas de punto fijo  $Y_a = \Psi(Y_a)$  e  $Y_a = \Omega(Y_a)$ .

El contexto para llevar a cabo esta estimación es el escenario BASE en el caso de flujo mixto y VE en el de vías exclusivas, por lo que se asume que la tarifa del modo auto es cero. El análisis de cada caso se hace por separado.

- Flujo mixto

En el gráfico siguiente se muestra la función  $\Psi$  para un valor de la frecuencia de 70 buses/hora, 3 paraderos por kilómetro y una tarifa de bus de 0,1 dólares. Este conjunto de valores será llamado R1. La variable independiente es la gente que usa el modo auto  $Y_a$  y la variable dependiente  $\Psi(70, 3, 0, (0, 1), Y_a)$ . Además se presenta la función identidad para ilustrar los puntos en donde se cumple la restricción. En estricto rigor se grafica  $\Psi(R1, Y_a)$  pero se denota  $\Psi(R1)$ .

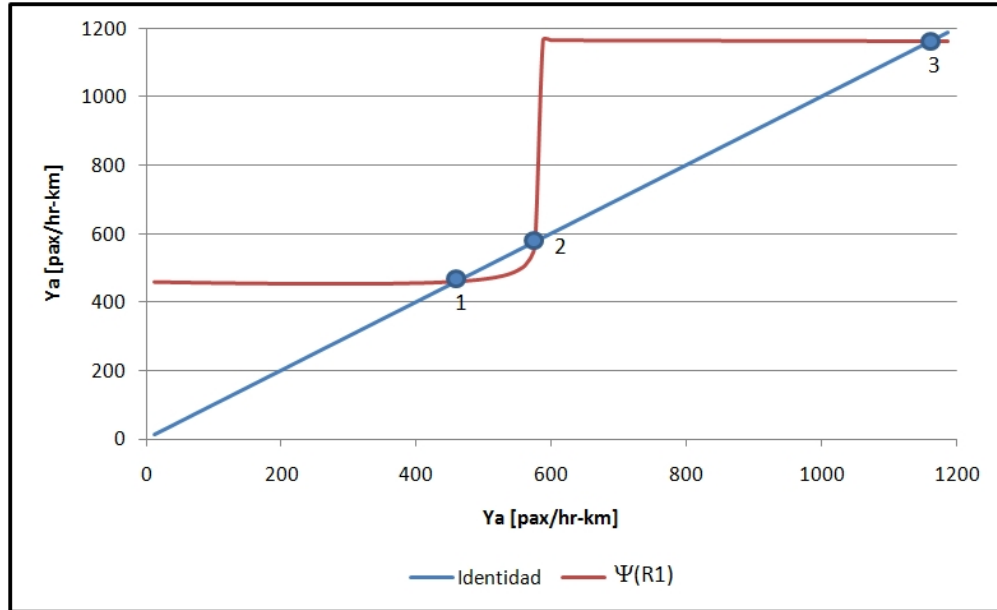


Figura 4.8: Representación gráfica de la restricción de demanda bajo R1. Flujo Mixto.

Con estos valores de las variables (R1) existen 3 equilibrios modales posibles, enumerados del 1 al 3 en la figura. El equilibrio 3, en estricto rigor, no existe ya que aparece en el gráfico sólo por la adaptación numérica a la función de tiempos detallada en la sección de codificación (ecuación 4.14). No tiene sentido porque ocurre en el rango (teórico) en donde la velocidad de circulación para ambos modos es 0 km/hr y la cantidad de gente que elige el modo auto es muy cercana al 100%; en el fondo las personas están prefiriendo estar detenidas dentro de un auto en vez de estar detenidas dentro de un bus. En cambio, los puntos 1 y 2 describen situaciones de equilibrio de la partición modal que efectivamente pueden corresponder a situaciones de alto bienestar social ya que los tiempos de viaje son razonables (en el punto 3 el tiempo de viaje es infinito en teoría y en la práctica debido al ajuste señalado en la ecuación 4.14 es de 10 horas). El problema de optimización busca los valores para  $\{f, p, P_b, Y_a\}$  que simultáneamente maximicen el bienestar social y sean equilibrios de partición modal, es decir, que sean puntos como 1 y 2 en la figura 4.8.

Antes de continuar es importante referirse a tres puntos que dicen relación con el análisis gráfico presentado en esta sección. Primero, cada punto de la función  $\Psi(R1)$  tiene una demanda diferente de auto y por ende una demanda diferente de bus, lo que implica que además de las variables  $R1$  cada punto (o equilibrio) tiene asociado un valor diferente del tamaño de buses: de otra manera no se podría transportar más gente con la misma frecuencia. Esto significa que los equilibrios representados como 1 y 2 no son equilibrios posibles para un conjunto de variables de decisión dado, sino que son puntos factibles en el problema de optimización. Si se diseña el sistema de transporte público y se imponen ciertas tarifas (por ejemplo  $R1$  más un tamaño fijo de buses) no existen 2 equilibrios sino que sólo hay un punto de equilibrio modal. Lo segundo es que por la misma razón, a partir de la representación gráfica de la figura 4.8, no es posible hacer un análisis de estabilidad del equilibrio, no se conoce la dinámica que hay detrás de pasar de un punto a otro e incluso en algunos casos puede que no sea factible moverse; cada punto de la curva está calculado con distinto tamaño de buses y un análisis de estabilidad de un equilibrio debería corresponder a mover gente de un modo a otro con todas las variables de diseño fijas. Lo tercero es que está fuera del alcance de esta tesis estudiar la implementabilidad del óptimo, es decir, no se incorporan los esfuerzos que son necesarios hacer para inducir el equilibrio a través de la decisión de las variables relevantes. Probablemente sea necesario hacer un cambio gradual de un punto sin políticas hacia uno con políticas para evitar caos, comportamiento anormal y resultados no deseados.

Para ver cómo se mueven los puntos 1 y 2 a medida que las variables de optimización toman diferentes valores, se estudian situaciones adicionales. Estas situaciones permiten entender en parte cómo es el proceso de optimización que incluye un equilibrio o, visto de otra manera, cómo se comporta el equilibrio cuando cambian las variables que lo afectan. Se ilustra en la siguiente figura como luce la restricción bajo las condiciones  $R1$  y para dos casos adicionales. El primero, llamado  $R2$ , es una variación de las variables en el sentido de beneficio hacia los usuarios de bus: frecuencia mayor (100 buses/hora); paraderos más cercanos (4 por kilómetro) y tarifa del bus nula. El segundo ( $R3$ ) corresponde a un cambio opuesto al anterior: frecuencia menor (40 buses/hr); paraderos más lejanos (2,5 por kilómetro) y tarifa del bus mayor (0,2 US\$).

De la figura 4.9 se observa que el límite superior de demanda de los equilibrios con sentido, es decir, que efectivamente pueden corresponder a una situación de máximo bienestar social, no varía mucho y es menor a 580 pax/hr-km. Por otro lado, el límite inferior de la demanda de los equilibrios razonables no supera los 400 pax/hr-km. Esta variación, no muy amplia, de la demanda frente a cambios en la variables adelanta lo que se observará al optimizar.

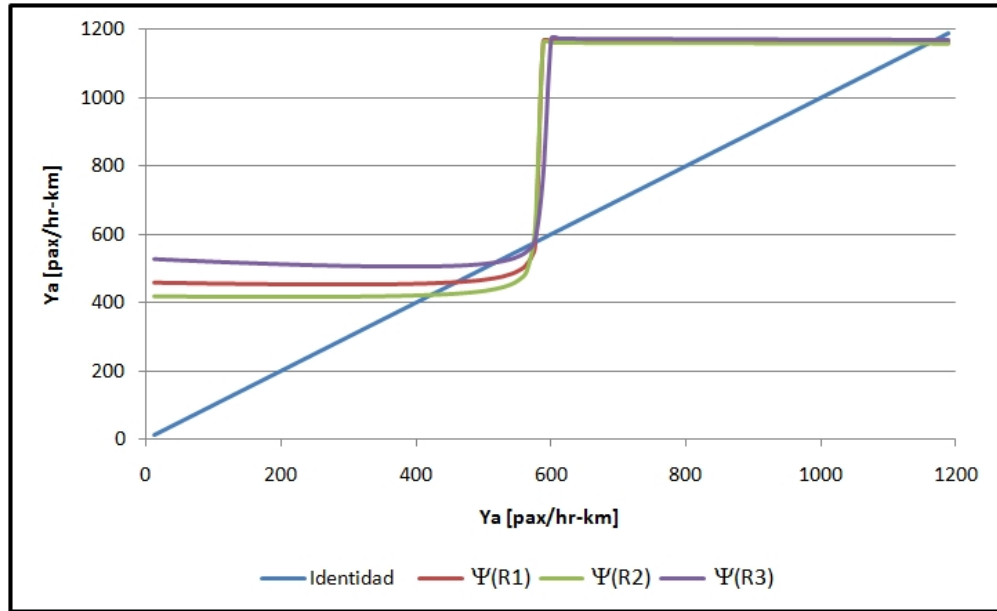


Figura 4.9: Representación gráfica de la restricción de demanda bajo R1, R2 y R3. Flujo Mixto.

Basado en esta información, y con el fin de abarcar un rango aún más amplio, el intervalo inicial para la demanda por automóvil se fija entre los valores 300 y 580 pax/hr-km.

Si se piensa en estos valores para la demanda en auto se está pensando en demandas por bus que oscilan entre 620 y 900 pax/hr-km. Para encontrar los intervalos de frecuencia se opta fijar tamaños de buses de referencia y despejar la frecuencia de la ecuación 4.7. La frecuencia máxima inicial está asociada a la demanda por bus alta y un tamaño de bus relativamente pequeño, mientras que para la frecuencia mínima inicial se usan los datos contrarios. Con un bus de capacidad para 60 personas, se obtiene una frecuencia de 150 buses/hora. Para un bus de 160 personas se obtiene una frecuencia de 38,75 buses/hora. Se adoptan estos valores teniendo en cuenta que configuran un intervalo inicial y no uno definitivo. Así, se fija el intervalo para la frecuencia en [35 - 150] buses/hora.

Con estos intervalos iniciales para la demanda y la frecuencia representados como  $\{Y_a, 300, 580\}$  y  $\{f, 35, 150\}$  se intenta nuevamente resolver el problema y en este caso el software encuentra la solución en tiempos razonables. Esto da muestra de la efectividad de este proceso y lo imprescindible que es, ya que sin estos nuevos intervalos iniciales el óptimo no puede ser encontrado.

- Vías exclusivas

Para vías exclusivas se hace el mismo análisis: primero se representa gráficamente la restricción

bajo condiciones base y luego se mueven las variables antes fijas para ver cómo se comporta el equilibrio. En la figura siguiente se ilustran tres situaciones denominadas V1, V2 y V3. Todas las situaciones ilustradas consideran una pista (de tres) dedicada a los buses. V1 tiene los mismos valores que R1 ( $f = 70$ ;  $p = 3$ ;  $P_b = 0,1$ ); V2 es un cambio favorable a los usuarios de bus, representado por un aumento de la frecuencia a 140 buses/hora, 4 paraderos en cada kilómetro y con tarifa nula; V3, en cambio, es lo contrario: se disminuye la frecuencia a 35 buses/hora, existen 2 paraderos por kilómetro y la tarifa es de 0,25 dólares.

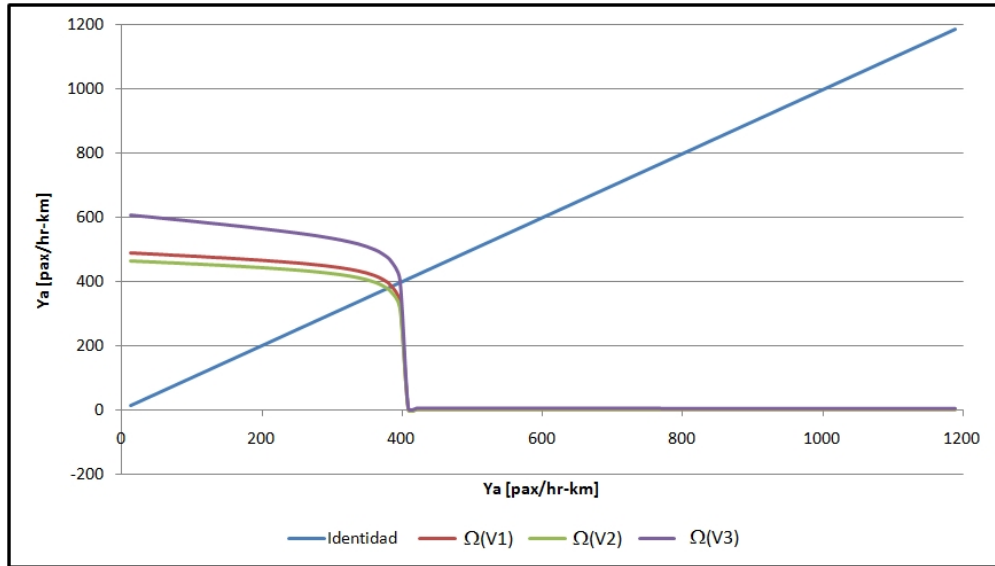


Figura 4.10: Representación gráfica de la restricción de demanda bajo V1, V2 y V3. Vías Exclusivas.

Como se puede observar, en este caso sucede algo completamente distinto. Cuando se modela con flujo mixto, mientras más demanda por auto hay, que en realidad se refiere solamente a más flujo vehicular (moviéndose hacia la derecha en el gráfico), ambos modos perciben el empeoramiento de la velocidad. Por este motivo la cantidad de personas que elige viajar en auto se mantiene casi constante en un primer tramo de flujo, para luego subir bruscamente hasta una situación sin mucho sentido en el que nadie está circulando. En esta situación de detención los usuarios prefieren estar detenidos en el auto que en el bus. Por esta razón los equilibrios candidatos a óptimos se ubican en el ascenso de la función (puntos 1 y 2 de la figura 4.8).

En presencia de vías exclusivas mientras más flujo de automóvil hay, sólo se incrementan los tiempos de viaje del modo auto, por lo tanto la alternativa bus se hace cada vez más atractiva en relación a la otra. Así la demanda por autos va decayendo a medida que aumenta el flujo de vehículos livianos hasta un punto donde nuevamente se llega a un extremo: toda la gente va en bus ya que los tiempos de viaje del auto son excesivos en la reducida capacidad.

Ahora existe sólo un punto factible y se produce cuando la función de demanda por auto decae. Este punto parece ser poco sensible a las otras variables y bordea los 400 pasajeros por hora por kilómetro.

Para fijar un intervalo se debe hacer el mismo procedimiento pero para el otro valor de pistas dedicadas al transporte público (dos de tres). En la siguiente figura se muestra la situación V1 y los análogos a V1, V2 y V3 pero con dos pistas en vez de una dedicada a los buses (V4, V5 y V6).

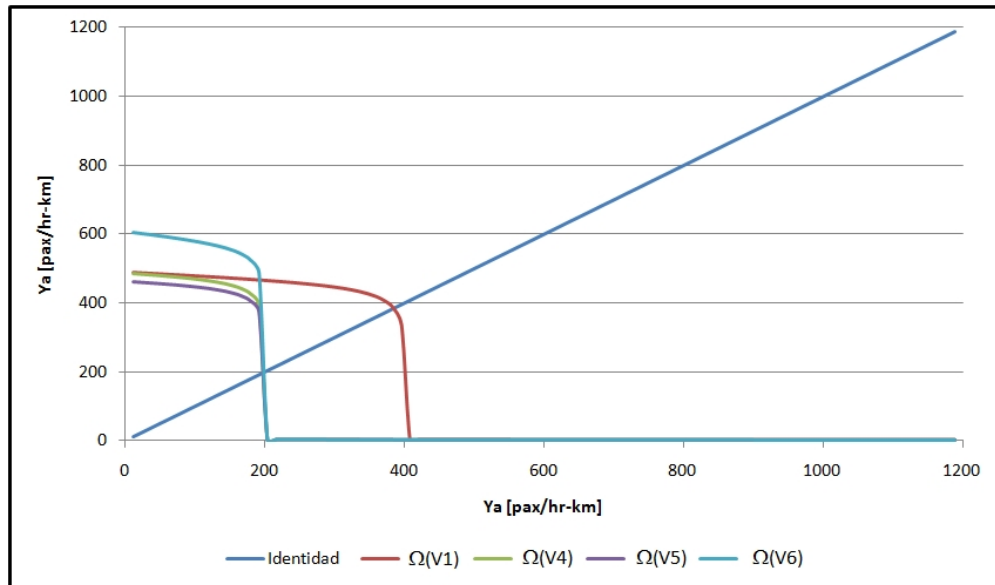


Figura 4.11: Representación gráfica de la restricción de demanda bajo V1, V4, V5 y V6. Vías Exclusivas.

Ocurre lo mismo pero la curva se desliza a una menor demanda de autos, cercana a 200 pax/hr-km. Por este motivo y con el fin de abarcar un rango más amplio se adopta como intervalo inicial de la demanda [100-500] pax/hr-km para el caso de vías exclusivas. El intervalo para la frecuencia se mantiene ya que las variaciones de ésta son menores.

En el caso de vías exclusivas ocurre lo mismo que para el escenario en flujo mixto: la función NMaximize es capaz de encontrar el óptimo cuando se le entregan estos intervalos iniciales.

Como se ha mencionado anteriormente para poder estudiar, evaluar y entender las implicancias de diferentes políticas para combatir la congestión vial es necesario hacer la aplicación central del modelo y otras aplicaciones a modo de análisis de sensibilidad. Los parámetros que se modifican y los nuevos valores que se adoptan para hacer dicho análisis se especifican en el capítulo correspondiente a la sensibilidad, sin embargo, en este capítulo se investigan rangos posibles para la demanda total de viajes para facilitar el proceso posterior, dado que hay una restricción de equilibrio cuyo comportamiento no es trivial y en esta sección se ha estudiado.



El valor base de la demanda total de viajes es 1.200 pax/hr-km que genera una carga de 12.000 pasajeros/hora. De los resultados obtenidos anteriormente se observa que la demanda de viajes en automóvil no varía radicalmente aunque cambien significativamente las otras variables: nunca supera un 50 % y no baja del 25 %. Este comportamiento del modelo logit de Santiago no debiera generar problemas para demandas iguales o inferiores a 1.200 pax/hr-km ya que la congestión disminuye, pero para demandas superiores estos porcentajes, si bien son relativamente bajos, representan niveles de demanda altos, lo que puede llevar a niveles de congestión que hagan que los equilibrios con sentido dejen de existir. Para ilustrar esta situación se grafica el comportamiento de la demanda por modo para tres valores distintos de la demanda total de viajes. La figura es la representación gráfica de la restricción 4.15 (presentada antes en las figuras 4.8 y 4.9) y permite observar equilibrios candidatos a solución del problema. Las tres situaciones se denominan S1, S2 y S3 y los valores de las variables que se utilizan son los siguientes: para S1 la demanda total de viajes es 1.200 pax/hr-km y la frecuencia es de 70 buses/hora; para S2 la demanda total de viajes es 300 pax/hr-km y la frecuencia es de 30 buses/hora; para S3 la demanda total de viajes es 2.000 pax/hr-km y la frecuencia es de 140 buses/hora; en los tres casos el número de paraderos por kilómetro es 3, el cobro al automóvil es 0 US\$/km y la tarifa del bus es 0,1 US\$. A continuación se representa gráficamente la restricción para las 3 situaciones.

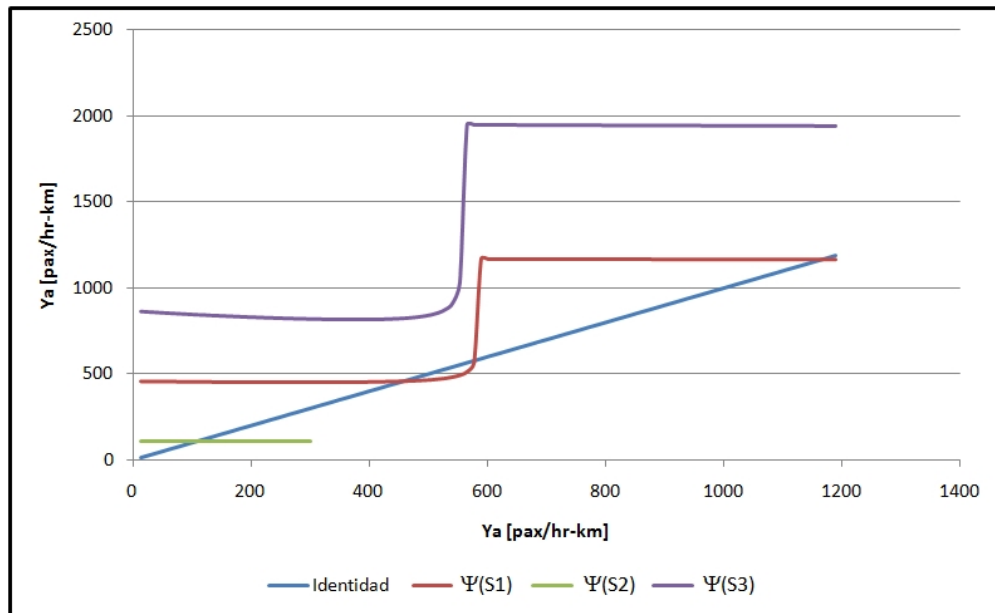


Figura 4.12: Representación gráfica de la restricción de demanda bajo S1, S2 y S3

Se puede verificar que el equilibrio colapsa para una situación de mucha demanda. Esto significa que en un corredor como el modelado, una situación en donde sólo existen los modos automóvil y bus, que los usuarios eligen de acuerdo al modelo logit calibrado para la ciudad de Santiago y en

ausencia de políticas para combatir la congestión (subsidio, tarificación vial o vías exclusivas), el sistema no es capaz de responder frente a niveles de demanda muy altos. En el fondo, el escenario llamado BASE es insostenible para niveles de demanda muy elevados. Evidentemente implementar estas políticas hace viable transportar esta cantidad de personas respetando el equilibrio modal. Si es que no se hace esto, una alternativa es crear un nuevo modo de transporte que genere cambios en la partición modal y acapare una fracción de los usuarios de automóviles y otra, invertir en aumentar la capacidad vía infraestructura. Esto se puede observar en Santiago, por ejemplo, con la construcción de metro o inversión en infraestructura. Lo que no deja de ser interesante, pero se escapa del alcance de esta tesis, es comparar el beneficio social, incorporando los costos de inversión, de implementar estas políticas versus construir metro o nueva infraestructura. También esto ocurre porque hay ausencia de una alternativa externa como sería no viajar, viajar en otro corredor o hacerlo a pie.

Con estos antecedentes se confirma que es perfectamente posible hacer aplicaciones del modelo para demandas bajas y se concluye que el escenario BASE no es válido para demandas muy superiores a 1.200 pasajeros por hora por kilómetro, al menos con la capacidad de la vía que se utiliza. Por lo tanto, si se quiere hacer un análisis de beneficio de políticas es muy posible que haya que usar otro punto de referencia.

Es importante también destacar a estas alturas la gran diferencia que hay en cómo se desempeña el sistema, y el equilibrio en particular, en flujo mixto y con vías exclusivas. De comparar las figuras 4.9 y 4.10 se puede observar que en ambos casos las formas de las curvas cambian totalmente. El sólo hecho de implementar vías exclusivas hace que exista un equilibrio razonable independiente de las condiciones que se le imponga al sistema de buses, por ejemplo, el autofinanciamiento, y además se puede atender cualquier nivel de demanda. En el fondo, implementar vías exclusivas asegura una atractividad del bus relativa frente al auto que hace que siempre exista un equilibrio en donde algunas personas eligen este modo. En flujo mixto, con niveles altos de demanda total, y por ende mayor congestión, para que exista el equilibrio con sentido económico se deben mover las variables considerablemente (ya que como se ve en la figura 4.9 la curva no es muy sensible). Esto puede llevar a tener que entregar subsidios bastante altos o a que la diferencia entre la tarifa del bus y la tarifa del automóvil sea considerable.

### **4.3. Síntesis y comentarios**

A lo largo de este capítulo se especifica prácticamente todo lo necesario para aplicar el modelo teórico planteado en el capítulo anterior.

Primero se tratan los parámetros del modelo, proceso que involucra investigar acerca de cómo

se han tratado las componentes del modelo en la literatura y los estudios que se han llevado a cabo para estimar los parámetros de cada unidad, e incluso, en algunos casos, involucra sofisticar el uso de parámetros a través de regresiones lineales. Necesariamente se debe centrar algunos parámetros y estimaciones en una ciudad y para el análisis de la tesis se hace pensando en Santiago.

La segunda etapa es la implementación del modelo en el software de optimización Mathematica, que incluye adaptaciones especiales, modificación de algunas funciones e inclusión de nuevas restricciones para que el problema pueda ser resuelto computacionalmente. Todo esto con el especial cuidado de no perder generalidad y no intervenir las condiciones que permiten encontrar el óptimo del problema, especialmente cuando se reduce la región factible para no dejar al óptimo afuera. De la misma manera se definen intervalos iniciales para algunas variables poco acotadas que resultan ser imprescindibles para la resolución del problema.

La codificación se lleva a cabo intentando simplificar al máximo el problema de modo de evitar sobreexigir innecesariamente el sistema en donde se proceda a resolver. En esta parte es donde tanto la reducción de variables como los intervalos iniciales juegan un rol fundamental.

En el proceso de análisis de parámetros se observa lo que ocurre para demandas altas y que es importante de comentar: bajo esta modelación en particular y en ausencia de las políticas de subsidio, tarificación y vías exclusivas, no se puede transportar una demanda muy alta de pasajeros. Esto es algo que destaca la importancia que se le debe dar a las tres políticas de transporte que se evalúan en esta tesis al momento de pensar en cómo combatir la congestión.

El planteamiento teórico del modelo se complementa con la investigación y establecimiento de parámetros y con la codificación del problema para sentar las bases para aplicarlo y así generar una herramienta de evaluación y estudio de políticas de transporte que permita obtener conclusiones y recomendaciones acerca de ellas.

El siguiente paso corresponde a usar esta herramienta configurada por el modelo, los parámetros y la codificación, de manera de obtener resultados de las aplicaciones, especialmente la denominada aplicación central, y presentarlos de manera clara y precisa. A partir de éstos se debe entonces desarrollar un análisis que permita obtener las conclusiones centrales de la tesis.

## Capítulo 5

# Aplicación central: resultados y análisis

### 5.1. Introducción

La aplicación central de esta tesis corresponde a la puesta en práctica del modelo de un período planteado en el capítulo 3, utilizando los parámetros detallados en el capítulo 4. Es denominada central ya que es la aplicación sobre la cual se realiza una presentación y análisis detallado de los resultados. Además es el punto de referencia para hacer las comparaciones en el análisis de sensibilidad y extensión a dos períodos que se muestra en el capítulo 6.

A lo largo de este capítulo se muestran los resultados de resolver el problema de optimización en cada uno de los escenarios planteados, principalmente a través de tablas y gráficos. Los resultados que se presentan son: los valores de las variables de nivel de servicio ( $f$ ,  $p$ ,  $k$ ), las variables financieras (tarifas, subsidios, ingresos del sector público, etc.), resultados del equilibrio que resulta óptimo (velocidades, tiempos de transporte y otros), las particiones modales resultantes o niveles de demanda de equilibrio y, por supuesto, los resultados asociados al bienestar social y excedente de los consumidores.

Se realiza un profundo análisis de los resultados que permite sacar el máximo provecho a la herramienta generada en esta tesis. A partir de este análisis se pueden obtener las primeras conclusiones y comenzar a entender las implicancias de cada una de las políticas de transporte en estudio.

Con el avance del capítulo se van desarrollando simultáneamente la presentación de los resultados y el análisis, así como también en algunos casos se incluye una comparación con trabajos

anteriores que modelen el problema de forma similar. Finalmente se presenta un resumen con los principales comentarios e implicancias.

Los escenarios para flujo mixto de esta aplicación, es decir, en ausencia de vías exclusivas, son los explicados en el capítulo 3 y se resumen a continuación:

- Escenario base (BASE): no hay subsidio (autofinanciamiento de buses), sin tarificación vial.
- Escenario subsidio (SUB): se entrega subsidio óptimo al sistema de buses, no hay tarificación vial.
- Escenario tarificación vial (TAR): no hay subsidio, se aplica tarificación vial óptima.
- Escenario subsidio y tarificación vial (SUB+TAR): hay subsidio y tarificación. El dinero recaudado por tarifas cubre los costos operacionales del sistema de buses.
- Escenario subsidio con tarifas no negativas (SUBP): se entrega subsidio a la operación de buses, no hay tarificación vial. Se impone que la tarifa del bus no puede ser negativa, por lo que no necesariamente es el subsidio óptimo.

Los otros escenarios son exactamente los mismos que para flujo mixto, pero se le agrega la incorporación de vías exclusivas. Éstos también se encuentran en detalle en el capítulo 3.

- Escenario vías exclusivas (VE): sin subsidio ni tarificación vial. Se implementan vías exclusivas.
- Escenario subsidio (SUB+VE): se entrega el subsidio óptimo, hay vías exclusivas y no hay tarificación vial.
- Escenario tarificación vial (TAR+VE): el sistema de buses se autofinancia, existe tarificación vial y vías exclusivas.
- Escenario subsidio y tarificación vial (SUB+TAR+VE): se aplican todas las medidas posibles. El dinero recaudado por ambos modos cubre los costos de operación de los buses.
- Escenario subsidio con tarifas no negativas (SUBP+VE): se entrega un subsidio con la restricción de que la tarifa de bus no sea negativa. No hay tarificación, pero si hay vías exclusivas.

Es importante recordar que, como se muestra teóricamente en el capítulo 3, los escenarios SUB, TAR y SUB+TAR son absolutamente equivalentes en términos de bienestar social, partición modal, diseño del transporte público, velocidades y tiempos; sí habrá diferencias en los excedentes

de los consumidores y las recaudaciones. Estas equivalencias, por supuesto, ocurren en presencia y ausencia de vías exclusivas. Al conjunto de estas políticas (tarificación, subsidio y ambas a la vez), de ahora en adelante, se les denominará políticas tarifarias. Producto de esta equivalencia, cuando se hable del beneficio de las políticas tarifarias se habla del beneficio que entrega cada una de las políticas (tarificación, subsidio y ambas a la vez); lo mismo ocurre con las variables de diseño del transporte público, niveles de servicio y otras.

## 5.2. Variables

Lo primero que se presenta en esta sección es el valor que toman las variables de optimización, a saber, aquellas asociadas a la operación de los buses, es decir, frecuencias ( $f$ ), número de paraderos equiespaciados por kilómetro ( $p$ ) y capacidad de los buses ( $k$ ) y las variables tarifarias, que corresponden a las tarifas que se cobra a ambos modos y los subsidios que se entregan.

### 5.2.1. Variables de diseño del transporte público

El diseño óptimo del transporte público tiene, al menos, tres componentes en este modelo: la frecuencia con la que circulan los buses, el tamaño de los buses (representados por la cantidad de pasajeros que pueden transportar) y el número de paraderos que se instalan en un kilómetro. En el modelo se incluye la variable  $p$  que representa el número de paraderos por kilómetro que existen, pero para ilustrar esta variable se utiliza, a lo largo de este y de los próximos capítulos, el distanciamiento entre los paraderos, que es simplemente  $1/p$  [km].

Los valores óptimos de estas variables son diferentes según las políticas de transporte que se utilice. Esto porque, al igual que las tarifas, son variables de optimización del problema y por razones de políticas se imponen restricciones o se modelan los tiempos con funciones diferentes, lo que restringe una o más variables cambiando así el valor de todas. Por esta misma razón se espera también que las particiones modales no sean las mismas en todos los escenarios.

En la figura 5.1 se presenta la frecuencia y tamaño de los buses que son óptimos para cada escenario. En esta figura se puede ver la forma que tiene la respuesta óptima a las distintas combinaciones de medidas. La frecuencia oscila entre 72 y 87 buses/hora y la capacidad de los buses entre 94 y 113 pasajeros. Basso et al. (2010) usa demandas similares y obtiene capacidades similares pero frecuencias mucho menores. Lo mismo ocurre en el trabajo de Larsen (2009) pero las capacidades, si bien son similares, alcanzan valores un poco superiores. Las diferencias de frecuencias se pueden deber al modelo de partición modal, ya que para una misma demanda total los equilibrios que resultan óptimos pueden ser muy diferentes y se pueden deber a la función de congestión.

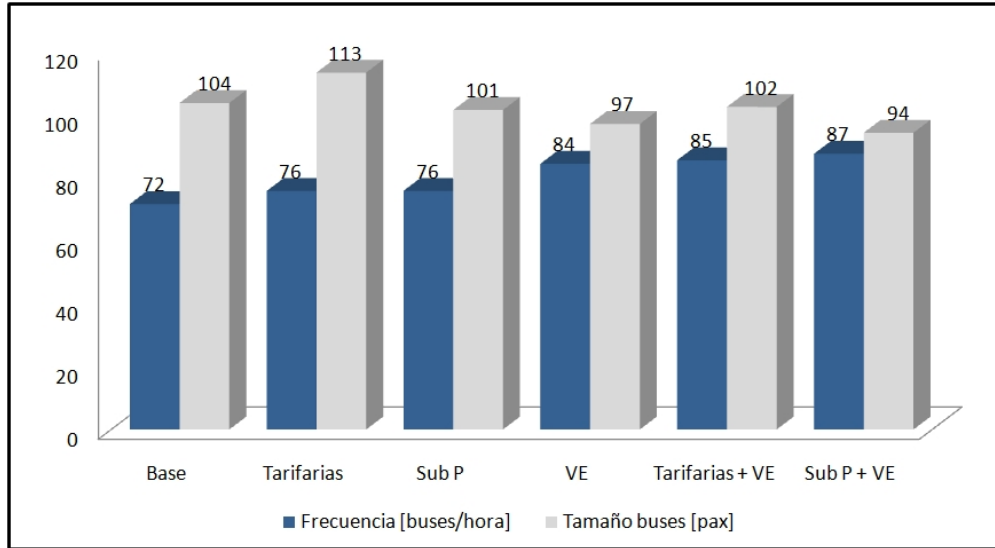


Figura 5.1: Frecuencia y tamaño de buses óptimo por escenario.

El nivel de carga que se genera en esta aplicación es de 12.000 pasajeros por hora, y se decide pensando en modelar una carga similar a la observada en el eje Pajaritos en el sentido más cargado. Este eje, de acuerdo a SECTRA(2003b), es el noveno eje con más demanda de Santiago y la frecuencia que se observa en período punta, de acuerdo al mismo estudio, es de 127 buses por hora. Este valor es aproximadamente un 50 % mayor que lo que el modelo entrega como frecuencia óptima. Es importante destacar dos diferencias entre ambas situaciones: en este modelo se considera que el pago es mediante tarjeta y las frecuencias observadas son con un medio de pago en efectivo al chofer, cambio que se refleja en el tiempo marginal de subida por pasajero, lo que se ha mostrado afecta las frecuencias óptimas en los modelos tipo Jansson (1980, 1984) sobre un corredor en la denominada regla de la raíz cuadrada; otra diferencia es que en este modelo sólo existe una línea que sirve toda la demanda del corredor y por ende toda la demanda aborda en el corredor, en cambio las mediciones reportan la existencia de 23 líneas sobre el eje y que no sirven exclusivamente la demanda de éste.

Las capacidades están medidas en pasajeros y consideran una fracción importante de ellos de pie. Las capacidades óptimas que entrega el modelo están en un lugar intermedio entre los buses pequeños que se observan en Santiago (liebres con capacidad de 40 pasajeros) y los más grandes (buses articulados con capacidad de 160 pasajeros). De hecho, son bastante cercanos a los buses intermedios con capacidad de 80 pasajeros que se observan en Santiago, y que operaban mayoritariamente antes de la implementación de Transantiago. Se observa una diferencia con el diseño del actual sistema de buses de Santiago que considera buses de capacidad igual a 160 en los corredores principales de la ciudad, pero no es directa una comparación pues se deben considerar

otros aspectos en el modelo. En el capítulo de análisis de sensibilidad se discute un poco más sobre este tema.

La implementación de políticas tarifarias, en ausencia de otras medidas, genera un incremento pequeño de la frecuencia y un aumento en el tamaño de los buses. Este aumento de frecuencia y capacidad de buses producto de una política de subsidio (y de tarificación) se observa independiente de si se está en flujo mixto o con segregación de flujo. Esto es esperable ya que la política produce cambios en las tarifas del modo bus (ver tabla 5.1) y en la demanda por lo que la respuesta óptima es aumentar tanto las frecuencias como el tamaño de los buses. Este resultado está en la misma línea de los resultados de análisis en trabajos anteriores (Jara-Díaz y Gschwender, 2009) basados en modelos tipo Jansson (1980, 1984) donde el autofinanciamiento del sistema necesariamente implica frecuencias menores y buses más chicos.

La entrega del subsidio inferior al óptimo que se analiza en el escenario SUBP hace que la frecuencia sea levemente superior y la capacidad de los buses sea sutilmente inferior con respecto al caso de autofinanciamiento. Esto ocurre tanto en presencia como en ausencia de la política de vías exclusivas. Lo que se ve es que el aumento de frecuencia producto de subsidio con tarifas no negativas es el mismo aumento de frecuencia que en el caso de subsidio óptimo, pero la variación del tamaño de buses es en el otro sentido. El cambio en frecuencia es esperable pues esta política va en la dirección de los subsidios óptimos y el alivio de la congestión por lo que se esperan demandas mayores de bus que deben ser servidas. En este caso el subsidio es sólo para cubrir los costos operacionales y por lo tanto un aumento de costo operacional es directamente disminución de bienestar social, a diferencia del caso base donde el efecto de aumento de costos de operación se anula con lo que pagan los usuarios. Si se producen aumentos de frecuencia se puede reducir el tamaño de los buses para aumentar el bienestar social por el lado de los costos. La frecuencia no se puede dejar de aumentar porque el beneficio es claro y en ausencia de tarificación es una forma de hacer más atractivo el bus frente al automóvil.

Los resultados del trabajo realizado por Jara-Díaz y Gschwender (2009) sobre autofinanciamiento y restricciones financieras, no son directamente comparables porque la modelación es diferente. Un aspecto importante es que en esta tesis hay interacción entre los modos bus y auto, y en el trabajo citado sólo se ve desde la perspectiva de los buses. Además la demanda por modo es elástica en este modelo, depende de las tarifas y variables de ambos modos y se incorporan efectos de congestión tanto en la circulación como en los paraderos y que además es congestión cruzada cuando se analizan situaciones de flujo mixto. Junto con esto, el escenario de subsidio sin tarifas negativas no tiene relación alguna con el análisis de Jara-Díaz y Gschwender (2009) acerca de impacto de restricciones financieras exógenas en el diseño óptimo de transporte público ya que la restricción que se impone sobre el problema es que las tarifas de bus no sean negativas permitiendo subsidiar el 100 % del costo operacional.



El paso de subsidio óptimo (o políticas tarifarias) al escenario SUBP, como se dijo, es permitir subsidiar el 100 % del costo operacional pero sin pagarle a la gente por utilizar el bus. El movimiento de subsidio óptimo a subsidio realista hace que los buses sean más pequeños y las frecuencias se mantengan. Es decir, si se sigue subsidiando el costo operacional las frecuencias no decaen (y por lo tanto los tiempos de espera tampoco) pero el tamaño de los buses sí lo hace ya que la atraktividad por tarifas del bus en comparación al auto ya no puede alcanzarse y, por lo tanto, se espera que la demanda por bus decaiga.

Las vías exclusivas, por su parte, tienen un efecto considerable sobre las frecuencias ya que se ven incrementadas en 12 buses/hora, que corresponde a poco menos del 20 %. Esto, obviamente, impacta en los tiempos de espera como se muestra en detalle en una sección posterior. Lo contrario ocurre con el tamaño de los buses que se ve disminuido pero en menor magnitud. En presencia de políticas tarifarias y del subsidio inferior al óptimo ocurre prácticamente el mismo efecto si se opta por segregar el flujo de automóviles y buses, es decir, implementar vías exclusivas aumenta las frecuencias y achica los buses bajo cualquier circunstancia. Lo que está detrás de esto es el hecho de que sin vías exclusivas no existen beneficios por aumentar la frecuencia pues la congestión que le generan los autos a los buses es muy fuerte; incluso cuando se está permitiendo subsidio, o sea, cuando existe la posibilidad de financiar aumentos de costo operacional, los aumentos de frecuencias no son del mismo nivel que con las vías exclusivas. Lo que ocurre al implementar vías exclusivas es que se libera la congestión cruzada de los autos a los buses y por lo tanto es óptimo usar frecuencias más altas, manteniendo de todas formas los tiempos de viaje por sobre el caso base. De hecho, incluso las frecuencias de autofinanciamiento con vías exclusivas son más de un 10 % mayores que las de políticas tarifarias (que incluye el subsidio óptimo) en flujo mixto. Además, pese a que hay un aumento considerable de frecuencias, el costo operacional disminuye con la implementación de vías exclusivas ya que los tiempos de viaje son mucho menores (los resultados se pueden ver en detalle en el apéndice E).

Este resultado del impacto sobre las frecuencias de la segregación de flujos, es encontrado por Basso et al. (2010) bajo condiciones similares. Larsen (2009) también encuentra que las vías exclusivas disminuyen el tamaño de buses en presencia de subsidios y de tarificación por congestión.

Con respecto a los paraderos, en la figura 5.2 se presenta la distancia óptima entre ellos bajo los distintos escenarios. El distanciamiento se mantiene más o menos constante en los diferentes escenarios de políticas: se mueve entre los 280 y los 295 metros aproximadamente. La diferencia entre la distancia máxima y la mínima es de 14 metros, cifra bastante reducida, que en la práctica significa unos segundos más de caminata. Se puede afirmar que es bastante razonable fijar el distanciamiento de los paraderos en el valor promedio: la pérdida de bienestar de usar paraderos a 295 metros de distancia versus separarlos a 280 metros es despreciable. Visto de otra manera, el beneficio de aplicar una política no debiera verse muy afectado si no se ajusta el distanciamiento entre paraderos.

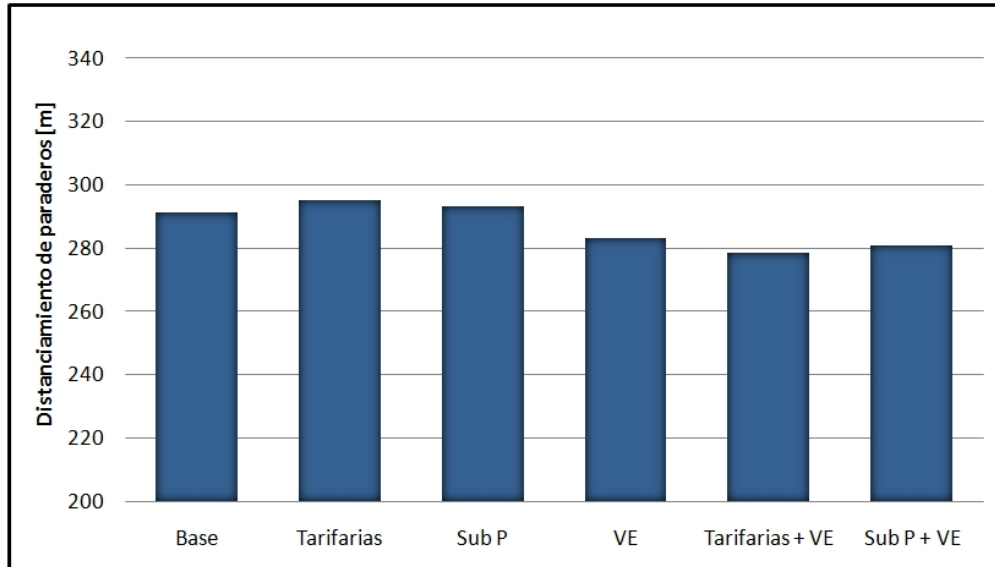


Figura 5.2: Distanciamiento óptimo de paraderos por escenario.

Este valor está fuertemente asociado a la ponderación del tiempo de acceso en la función del tiempo generalizado. Si se utiliza otra especificación del tiempo en la función de utilidad estos valores cambian. Por ejemplo, si la ponderación del tiempo de acceso en el tiempo generalizado de viaje cambia de 3,63 a 2,5 el distanciamiento de paraderos aumenta en aproximadamente 45 metros.

En relación a la capacidad que se destina exclusivamente al transporte público cuando se implementan vías exclusivas, resulta que en todos los escenarios en los que se implementa esta política, el número óptimo de pistas dedicadas a los buses es 1, por lo tanto siempre que se hable de esta medida se debe pensar que de un total de tres pistas, una se dedica a los buses y dos al automóvil.

### 5.2.2. Tarifas y subsidios

En esta sección se presentan las tarifas óptimas de cada escenario y el monto de subsidio que se debe entregar cuando corresponda. Es importante recordar que siempre que se habla de subsidio esto corresponde a la entrega del subsidio óptimo salvo en el escenario SUBP, en que se agrega la restricción de tarifas no negativas.

La información de las tarifas se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.1: Tarifas por escenario

<b>Escenario</b>	<b>Tarifa Bus [US\$]</b>	<b>Tarifa Auto [US\$/km]</b>
BASE	0,11	0,00
SUB	-0,47	0,00
TAR	0,10	0,08
SUB+TAR	-0,07	0,06
SUBP	0,00	0,00
VE	0,09	0,00
SUB+VE	-0,50	0,00
TAR+VE	0,09	0,09
SUB+TAR+VE	-0,07	0,06
SUBP+VE	0,00	0,00

La tarifa de autofinanciamiento del sistema de buses (escenarios BASE, TAR, VE, TAR+VE) es aproximadamente 0,1 dólares, lo que equivale a más o menos \$55. Esta cifra es bastante baja en comparación a las tarifas observadas en Santiago. Hay, al menos, cuatro factores que hacen que esta tarifa sea tan menor a las observadas: el primero es que la condición impuesta es el autofinanciamiento, por lo tanto se debe comparar con la tarifa que permite cubrir costos y no con la que se cobra para obtener ganancias y rendimiento del capital. El segundo está relacionado con el hecho de que sólo se consideran los costos operacionales y no se están incluyendo los otros costos asociados a un sistema de buses: sistema de recaudación de tarifas (se supone el uso de tarjetas como modo de pago), sistema de control operacional e información al usuario, infraestructura operacional, etc. El tercero es que sólo se está considerando un período punta con afluencia constante; en esta aplicación existe siempre una carga invariante de 12.000 pasajeros/hora por lo tanto no se está incorporando que existen períodos con demanda baja donde la afluencia es menor y se deben utilizar los mismos buses. La cuarta razón dice relación con que incluso en períodos punta, por motivos de cobertura y que el flujo no es homogéneo en todo el período, hay sectores en donde la demanda es mucho menor y la ocupación de los buses es bastante baja. Estos efectos de red no se toman en cuenta tampoco.

Cuando se implementa la política de tarificación por congestión, esta tarifa cobrada al automóvil se mueve entre 0,06 y 0,09 dólares por kilómetro, equivalentes a aproximadamente entre 30 y 50 pesos por kilómetro. Este valor es cercano a lo que cobran actualmente las autopistas urbanas de Santiago en períodos de baja demanda.

En los dos escenarios de subsidio óptimo como política tarifaria (con y sin vías exclusivas), se

le paga a cada usuario por viajar en bus una cantidad aproximada de 0,5 US\$ (\$ 225). Resulta evidente que no se generan recaudaciones y por lo tanto no se cubren los costos operacionales. En los análisis de tarificación óptima en transporte público sin interacción con otros modos (Jara-Díaz, 2007) se argumenta que en presencia de economías de escala, la tarifa óptima a cobrarle a los usuarios no alcanza a cubrir los costos operacionales y, por ende, requiere subsidio. En este modelo, se hace un análisis de un sistema de transporte mixto en el cual existen dos modos con demanda elástica que interactúan de varias maneras y se obtiene algo diferente. La tarifa óptima del bus es negativa: el subsidio ya no es sólo para cubrir costos operacionales sino que para inducir una partición modal que incremente el bienestar social. Se puede argumentar que no se puede inducir la partición modal que alcance este valor óptimo de bienestar social exclusivamente mediante cambios en los tiempos producto de movimientos de las variables de servicio del transporte público; como se modelan efectos de congestión si se aumentan las frecuencias se disminuye el tiempo de espera pero inevitablemente aumenta el tiempo de viaje. Otra forma de ver el resultado, es pensar en que el costo marginal total, en el óptimo, es inferior al costo medio de los usuarios de bus (costo producto de tiempos) y, por lo tanto, lo óptimo es cubrir con subsidio los costos operacionales y además esta diferencia de costo marginal total y costo medio de los usuarios de transporte público. Este resultado de tarifas de bus negativas en ausencia de tarificación vial ha sido encontrado en otros trabajos con un enfoque similar al de esta tesis (Mohring, 1979; Larsen, 2009; Basso et al., 2010).

Un elemento clave en los resultados de las variables es que los usuarios eligen el modo que maximiza su utilidad y los estratos de ingreso más alto tienen preferencias más marcadas por el modo auto (que se reflejan en las constantes modales). Además, se suma que la utilidad marginal del ingreso es menor para los estratos de ingreso más alto por lo tanto para un tiempo generalizado fijo, la tarifa que hace que el 90 % de los usuarios de estrato bajo elijan bus hace que un porcentaje mucho menor de la gente de estratos de ingreso más alto lo elija. Mientras más aumenta el ingreso, menos usuarios eligen el bus. Por estos motivos, la alternativa de subsidio óptimo es entregarle una cantidad muy alta de dinero a la gente para que viaje en bus y así inducir la partición modal de equilibrio que resulta óptima.

Se presenta en la tabla 5.2 el subsidio total y el subsidio por pasajero del sistema de buses. El monto del subsidio óptimo es bastante alto cuando ésta es la medida tarifaria que se aplica. Alcanza un valor aproximado de 500 US\$/hr-km lo que equivale a aproximadamente 6 veces el costo operacional. Este monto es muy grande y su implementación es prácticamente inviable por el monto que significa y por el hecho de que se le debe pagar a la gente por un viaje en bus. El subsidio por pasajero es el mismo en flujo mixto o cuando se implementan las vías exclusivas y es igual a 0,6 dólares.

El subsidio por pasajero se calcula dividiendo el subsidio total (ingresos menos costos) por la cantidad de gente que utiliza el modo bus.

Tabla 5.2: Subsidios por escenario

Escenario	Subsidio [US\$/hr-km]	Subsidio [US\$/pax]
BASE	0	0,0
SUB	485	0,6
TAR	0	0,0
SUB+TAR	139	0,2
SUBP	82	0,1
VE	0	0,0
SUB+VE	516	0,6
TAR+VE	0	0,0
SUB+TAR+VE	140	0,2
SUBP+VE	79	0,1

El efecto de la combinación de las políticas de subsidio y tarificación es importante. Cuando se incluye tarificación vial y subsidio, sigue siendo óptimo entregarle dinero a la gente para que viaje en bus, aunque en una cantidad mucho menor (0,07 US\$/viaje). Como se puede ver en la tabla 5.2, la política de tarificación disminuye considerablemente el monto total de subsidio tanto en presencia como en ausencia de vías exclusivas. Como se explica en el capítulo 3, cuando se aplica esta combinación de medidas existen infinitas combinaciones de tarifas (del viaje en bus  $P_b$  y por congestión a los autos  $P_a$ ) que llevan al óptimo social si es que no se impone una restricción. En este caso particular (escenario SUB+TAR) se impone la restricción que el dinero recaudado por tarifas de los dos modos alcance exactamente para cubrir los costos operacionales del bus (problema 3.42). Si se impone otra restricción, otras serían las tarifas, y por ende es factible generar el mismo bienestar social aplicando otra combinación de tarifas que mantenga la diferencia óptima  $[(P_a + c_{0a}) \cdot \frac{l}{a} - P_b]^*$ . Debido a que es esta diferencia la que se mantiene constante, es directo ver que al aumentar la tarifa  $P_a$ , debe aumentar la tarifa  $P_b$ , lo que explica la disminución de la cantidad de dinero que conviene pagarle a la gente por viajar en bus, y por ende el subsidio, con la implementación de tarificación. En estas condiciones particulares de modelación, existe una combinación de tarifas en donde no hay que entregarle dinero a los usuarios de bus, a costa de un incremento en la tarifa del auto, que también es equivalente a las políticas tarifarias. La combinación de tarifa nula de transporte público y un cobro al automóvil de 0,07 US\$ por kilómetro es equivalente, en cuanto a bienestar, a los escenarios de políticas tarifarias. Esto significa que la implementación de la tarificación por congestión es una forma de poder alcanzar el óptimo con subsidios con posibilidades reales de ser implementados y con tarifas menores a las que son necesarias si se aplica sólo tarificación vial. Sin esta tarificación por kilómetro, la política de subsidio, es prácticamente imposible de llevar a cabo debido a que requiere tarifas negativas y el monto total es elevado. Algo importante que no

se considera es que los costos de tarificar no son nulos y tampoco es cierto que entra al sistema toda la recaudación teórica por tarifas. Lo que sí se asume es una tarificación de primer mejor en el sentido que es un cobro por kilómetro, lo que resulta bastante complicado de poner en marcha en la práctica.

Como se puede notar en la tabla 5.1 en el escenario SUBP la tarifa del bus es cero lo que significa que la restricción impuesta sobre la tarifa del bus es activa (ver problema 3.43). La idea central de este escenario es analizar la situación en que se entrega un subsidio inferior al óptimo. En este caso particular está representada por un subsidio que no signifique entregarle dinero a la gente por utilizar el modo e implica que la tarifa del bus sea nula. Por este motivo las recaudaciones también son nulas y el subsidio corresponde únicamente al costo operacional. Este subsidio alcanza un valor cerca de seis veces menor que el subsidio óptimo, que corresponde a un valor de 82 US\$/hora-km que equivale a un subsidio de 0,1 dólar por pasajero. En este punto se refuerza el hecho que la mayor parte del subsidio óptimo no es por motivo de cubrir los costos operacionales del sistema.

La implementación de vías exclusivas genera aumentos en el monto total de subsidio ya que viaja más gente en bus, pero el subsidio por pasajero es el mismo. Además las vías exclusivas reducen levemente las tarifas del bus en todos los escenarios y aumenta el cobro al automóvil en los casos que se considera tarificación vial. El efecto sobre las tarifas de bus es debido a que las vías exclusivas implican menos congestión para los buses (que ya no son afectados por los autos) lo que hace que disminuyan los costos de operación al menos un poco (ver apéndice E) pese al aumento de frecuencia, y además esta ventaja comparativa frente al auto debiera generar aumentos en la demanda, lo que hace que el costo operacional se divida en más personas. Con respecto al efecto sobre el cobro al auto, existen dos situaciones que generan cambios opuestos sobre las tarifas por congestión: primero, los autos dejan de congestionar a los buses lo que debiera significar una reducción en el cobro por congestión; segundo, ven disminuida la capacidad para circular por lo que la congestión entre automóviles aumenta considerablemente y por ende la tarifa también. De los resultados se deduce que el segundo efecto predomina levemente sobre el primero.

### **5.3. Resultados de niveles de servicio**

En esta sección se presentan los resultados asociados a niveles de servicio que se obtienen cuando se aplican diferentes políticas de transporte. Entre los resultados que se reportan están las velocidades comerciales, los tiempos de transporte, capacidad y grado de saturación de los paraderos junto con el tamaño de flota necesario en cada escenario. El objetivo es ver como impacta en el nivel de servicio la variación de las variables de optimización.

### 5.3.1. Velocidad y tiempo de viaje

La velocidad comercial es la distancia recorrida en el viaje (que en este modelo es fija) dividida por el tiempo total de viaje, por lo que realizar análisis de velocidad y de tiempos de viaje es redundante. Es por esta razón que se usa la velocidad comercial como referencia y se presenta en la siguiente figura para ambos modos, en cada uno de los escenarios.

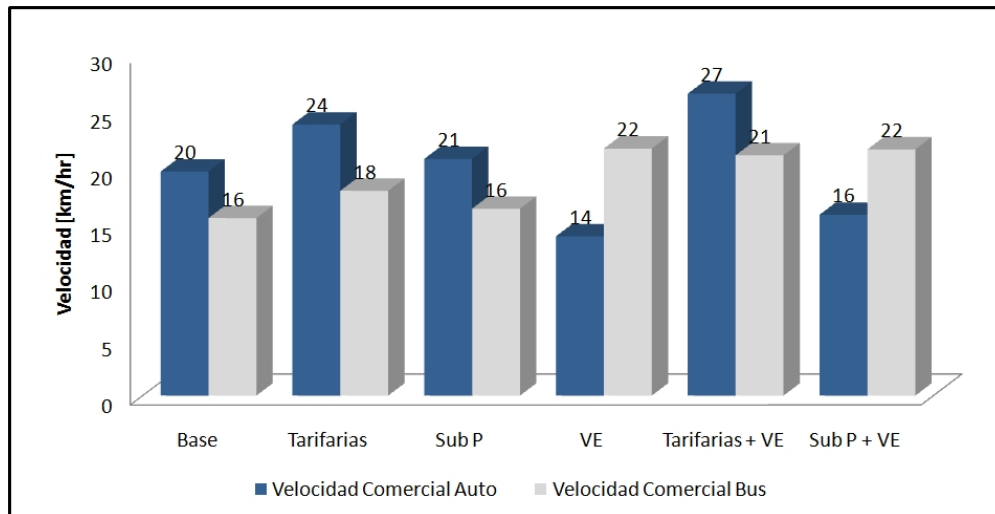


Figura 5.3: Velocidades comerciales de cada modo por escenario.

La entrega de subsidio o la implementación de tarificación vial en una situación de flujo mixto, beneficia en términos de velocidades a ambos modos. Aumenta la velocidad comercial del auto y también, aunque en menor medida, la del bus. Este resultado es absolutamente esperable puesto que las medidas tarifarias son precisamente para combatir la congestión y se ve directamente de la figura 5.3 que lo logran. Uno de los motivos principales de este aumento de velocidad es el traspaso de usuarios del automóvil al bus.

La política de subsidio con tarifas no negativas deja prácticamente sin variación las velocidades, lo que indica que no hay beneficios en este sentido. Esto ocurre independientemente si se está en condiciones de flujo mixto o si se ha implementado la política de vías exclusivas y luego se agrega el subsidio subóptimo. Esto revela que entregar un subsidio inferior al óptimo, pero más realista, no genera grandes beneficios, ni tampoco se acerca a los que logra el subsidio óptimo, en cuanto a reducir la congestión, ya que las velocidades prácticamente se mantienen igual.

La implementación de vías exclusivas en ausencia de políticas de tarificación o subsidio óptimo tiene un gran impacto sobre las velocidades, pero dispar por modo. La velocidad comercial del bus se ve aumentada considerablemente (de 16 km/hr a 22 km/hr), en cambio la del auto baja de

20 km/hr a 14 km/hr. Es evidente que esta medida juega en beneficio de los usuarios de bus. Lo mismo ocurre cuando se segrega el flujo en presencia de un subsidio inferior al óptimo, que es lo más similar a lo que se observa en la realidad de los sistemas subsidiados. Este cambio es lógico pues se le está sacando de encima al transporte público la congestión que le generan los vehículos particulares y se les restringe el espacio a estos últimos.

Este efecto de las vías exclusivas no ocurre si es que se está en una situación inicial de tarificación vial, subsidio o ambas. Al pasar de cualquiera de los escenarios de políticas tarifarias en flujo mixto a la situación de estas políticas pero además con vías exclusivas, lo que se produce es un aumento de las velocidades de ambos modos. El efecto sobre los buses es el mismo explicado anteriormente, pero en este caso sobre el automóvil hay una diferencia pues cualquiera de las políticas tarifarias genera el movimiento de gente hacia el bus que logra reducir la congestión entre autos (en comparación al caso de sólo políticas tarifarias). Esto hace referencia a que se mantienen las políticas y no los valores de las variables, por ejemplo, al pasar de subsidio óptimo a vías exclusivas más subsidio óptimo, el valor del subsidio es diferente pero óptimo en ambos casos.

Si se aplican las políticas tarifarias dentro del contexto de flujo segregado, ocurre que la velocidad del modo bus no se ve afectada mayormente y la del modo auto aumenta cuantiosamente. En el fondo al aplicar esta medida se compensan un poco las desventajas hacia el auto en términos de velocidad que le genera la implementación de vías exclusivas. De hecho, la velocidad máxima que puede alcanzar el modo auto en algún óptimo, es cuando se implementa alguna política tarifaria y las vías exclusivas de manera conjunta. Este es un efecto de las medidas en la descongestión producida entre los autos, mientras que los buses se adaptan de forma óptima no generando variación en la velocidad.

### 5.3.2. Tiempos de transporte en bus

Los tiempos de espera y acceso para el modo bus se presentan en la tabla 5.3; estos tiempos son nulos para el modo automóvil.

Los tiempos de espera que resultan son muy bajos y no varían mucho de acuerdo al escenario, principalmente porque la frecuencia óptima siempre se mueve en rangos altos. El tiempo de espera promedio mayor es de 25 segundos aproximadamente y el menor de 20 segundos. El caso de demandas menores, y por ende, tiempos de espera mayores se analiza en el capítulo 6; también se analiza en dicho capítulo qué ocurre cuando se cambia el valor del parámetro  $\theta$  que multiplica al inverso de la frecuencia en la expresión del tiempo de espera (ecuación 3.5), que para esta aplicación es 0,5.

Como el tiempo de acceso depende directa y únicamente de la distancia entre los paraderos, se mantiene prácticamente constante en los 2 minutos y fracción.



Tabla 5.3: Tiempos de espera y acceso en cada escenario.

Escenario	Tiempo de espera [min]	Tiempo de acceso [min]
Base	0.42	2.4
Tarifarias	0.40	2.5
Sub P	0.40	2.4
VE	0.36	2.4
Tarifarias + VE	0.35	2.3
Sub P + VE	0.34	2.3

Con respecto a los tiempos de viaje, se pueden dividir en dos componentes: el tiempo en movimiento y el tiempo por detención en los paraderos. En la figura siguiente se muestra el tiempo total que ocupa un bus por cada paradero, junto con el valor de cada una de las componentes.

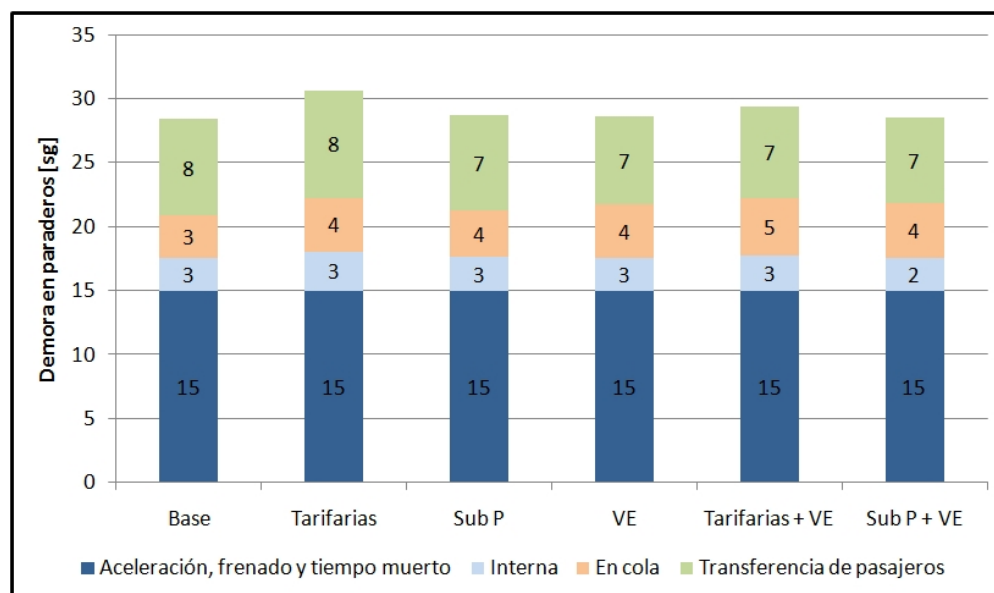


Figura 5.4: Demora por paradero según escenario.

El tiempo que ocupa un bus en cada paradero debido a aceleración, frenado, tiempo muerto, demoras y transferencia de pasajeros varía entre los 28 y los 31 segundos. Esta es una cifra más o menos constante independiente del escenario. Las demoras (interna y por cola) suman cerca de 7 segundos en cada paradero que representa un 25% del tiempo detenido, cifra no despreciable que por lo general se omite.

En la tabla 5.4 se presentan las dos componentes del tiempo de viaje en bus junto con el porcentaje que representan del tiempo total de viaje.

Tabla 5.4: Tiempos de espera y acceso en cada escenario.

Escenario	Tiempo en circulación		Tiempo en paraderos	
	[min]	[%]	[min]	[%]
Base	22.2	58 %	16.2	42 %
Tarifarias	16.0	48 %	17.3	52 %
Sub P	20.2	55 %	16.3	45 %
VE	10.8	39 %	16.8	61 %
Tarifarias + VE	10.8	38 %	17.6	62 %
Sub P + VE	10.8	39 %	16.9	61 %

En los tres escenarios de vías exclusivas la mayoría del tiempo de viaje en bus es por la operación en paraderos. Las vías exclusivas le quitan congestión a los buses lo que, a su vez, hace que disminuyan los tiempos de circulación, o netamente en movimiento, y haga que el factor limitante sea la operación de paraderos. En flujo mixto también constituyen una alta proporción del tiempo total. Esto confirma que los paraderos son un cuello de botella principal en la operación de buses (Fernández y Planzer, 2002).

### 5.3.3. Capacidad y grado de saturación paraderos

A continuación se presenta la capacidad y los grados de saturación en los paraderos para cada escenario.

Tabla 5.5: Capacidad y grado de saturación paraderos.

Escenario	Grado de saturación paraderos	Capacidad paradero [buses/hr]
Base	35 %	205
Tarifarias	39 %	195
Sub P	37 %	206
VE	39 %	214
Tarifarias + VE	41 %	210
Sub P + VE	40 %	218

Como se explica en el capítulo 3, en este modelo, la capacidad de un paradero depende del diseño del paradero, de la tasa de subida y de la tasa de bajada de pasajeros. Como se puede ver en la tabla 5.5 la capacidad de los paraderos es cercana a los 200 buses por hora lo que es un valor

bastante alto. Esto se explica porque los paraderos son de 3 sitios y son diseñados de la mejor manera posible y también porque la tasa de subida y bajada de pasajeros (que en el modelo son iguales) resultado de la optimización y el equilibrio no supera los 4 pasajeros por bus.

Pese a la alta capacidad de los paraderos, resulta óptimo mantener el grado de saturación de los paraderos muy cerca del 40%. Esto indica que, a pesar de que pueden circular una mayor cantidad de buses por hora por el paradero, no es conveniente que lo hagan pues las demoras aumentarían a niveles que generan pérdidas en el bienestar social. Es importante disponer de paraderos de alta capacidad para que las frecuencias puedan alcanzar valores razonables manteniendo el grado de saturación relativamente bajo. Este análisis no tiene como objetivo entregar recomendaciones de diseño del paradero ya que, en este modelo, se optimizan variables que afectan la capacidad de los paraderos y también se optimiza la frecuencia por lo tanto no es comparable a las recomendaciones de diseño que se hacen para una frecuencia y demanda dadas.

### 5.3.4. Flota

Para finalizar con la presentación y análisis de resultados de los niveles de servicio se muestra en la siguiente tabla la flota de buses por kilómetro necesaria para operar el sistema en los diversos escenarios.

Tabla 5.6: Tamaño de flota por escenario.

<b>Escenario</b>	<b>Tamaño Flota [bus/km]</b>
Base	4.6
Tarifarias	4.2
Sub P	4.6
VE	3.9
Tarifarias + VE	4.0
Sub P + VE	4.0

Tanto las políticas tarifarias como las vías exclusivas generan una disminución de la flota necesaria para satisfacer óptimamente la demanda. A pesar de los aumentos de frecuencia, el tiempo de viaje (o de ciclo) es menor y se da que el producto de ambos disminuye. El mayor cambio en la flota se observa con la medida de segregación del flujo (VE) y es aproximadamente una reducción del 18% de ésta producto del gran beneficio en tiempos que significa para el transporte público esta medida. Por las mismas razones enunciadas anteriormente la política de subsidio con tarifas no negativas no genera cambios en la flota de buses en relación al escenario base.

## 5.4. Particiones modales

En esta sección se muestran las particiones modales de equilibrio que maximizan el bienestar social en cada escenario de manera agregada sobre todos los estratos, en la figura 5.5

La partición modal de equilibrio que resulta óptima, tiene una participación mayoritaria del bus independiente del escenario que se mire.

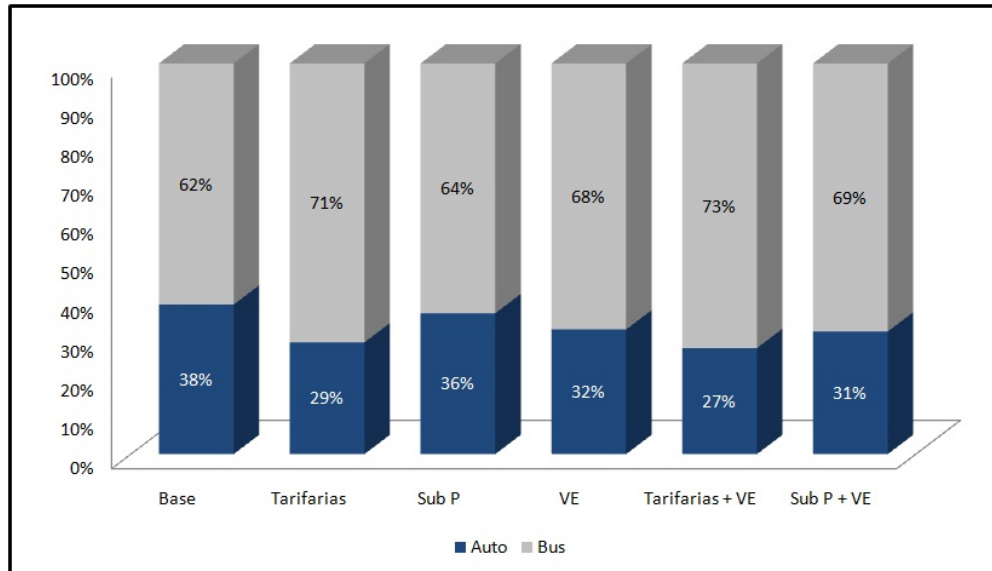


Figura 5.5: Partición modal por escenario.

De la figura 5.5 es posible deducir que implementar una política (subsidio, tarificación o vías exclusivas) o alguna combinación de ellas incrementa la demanda por bus. La aplicación de políticas va acompañada, en cada caso, de una optimización del transporte público por lo tanto no se puede mirar por separado el efecto en la partición modal de implementar la política y de cambiar las variables de diseño del sistema de buses. Lo que se puede afirmar es que la demanda por bus aumenta y por ende la optimización de éste es fundamental. Cada escenario enfrenta una demanda diferente de auto y de bus, y por lo tanto los resultados y conclusiones que se obtengan pueden diferir de los que se pueden deducir a partir de un análisis bajo el supuesto de demanda por modo inelástica. Estos resultados son producto de los movimientos de las frecuencias y tarifas principalmente, junto con los niveles de servicio. Por ejemplo, la política de subsidio óptimo está asociada a entregarle dinero a la gente que usa el bus, a aumentar las frecuencias y además los tiempos de viaje resultan menores por lo tanto es esperable que la demanda por transporte público crezca significativamente. Este crecimiento depende del modelo de partición modal que se utilice, es decir, los porcentajes de uso de cada modo se espera que cambien en cada ciudad o cada realidad.

Dentro de las políticas en estudio, las que más cambio generan en la elección modal son las denominadas tarifarias, le siguen las vías exclusivas y finalmente el subsidio con tarifas no negativas. Este último punto es importante ya que el escenario SUBP es el que probablemente se acerca a las realidades de varias ciudades del mundo y, como puede observarse, el efecto en la partición modal (y los niveles de servicio como se mostró anteriormente) es bastante modesto. Además, la combinación de alguna política tarifaria y vías exclusivas aumenta aún más la demanda por bus. Con el subsidio de tarifas no negativas, además de la poca variación que presentan los niveles de servicio (velocidades, tiempos, etc.) y principalmente producto de ella, se observa un cambio en la partición modal muy reducido.

En las siguientes figuras se presenta la partición modal óptima de cada escenario desagregada por estrato socioeconómico. Esto permite observar cómo es la participación de cada estrato por modo y además en cuáles estratos se generan los cambios más importantes según las políticas. Los estratos están ordenados por ingreso de manera ascendente, de modo que el estrato 1 es el estrato de menor ingreso y el estrato 5 el de mayor ingreso. Información de las características de cada estrato se encuentra resumida en la sección 4.1.1 y con más información en el apéndice A.

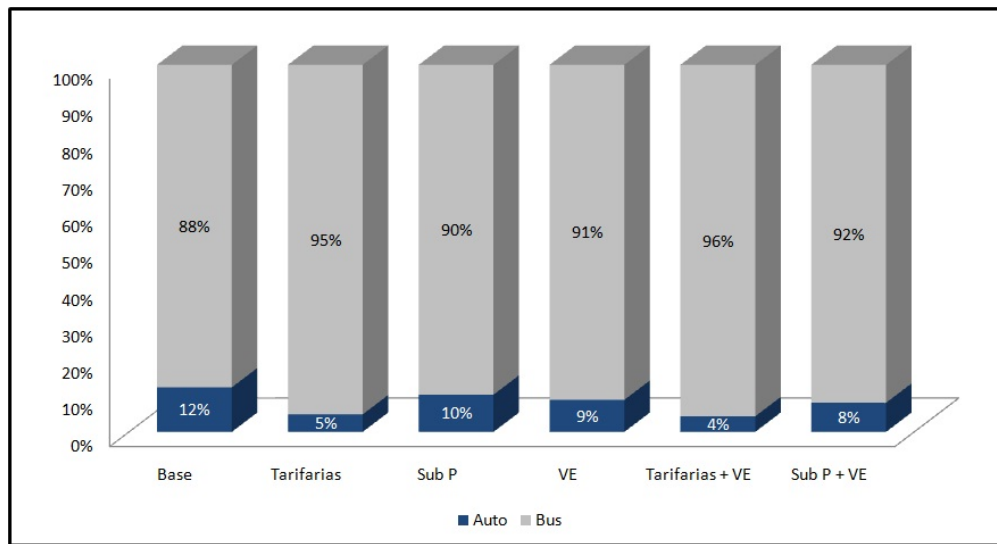


Figura 5.6: Partición modal por escenario. Estrato bajo (1).

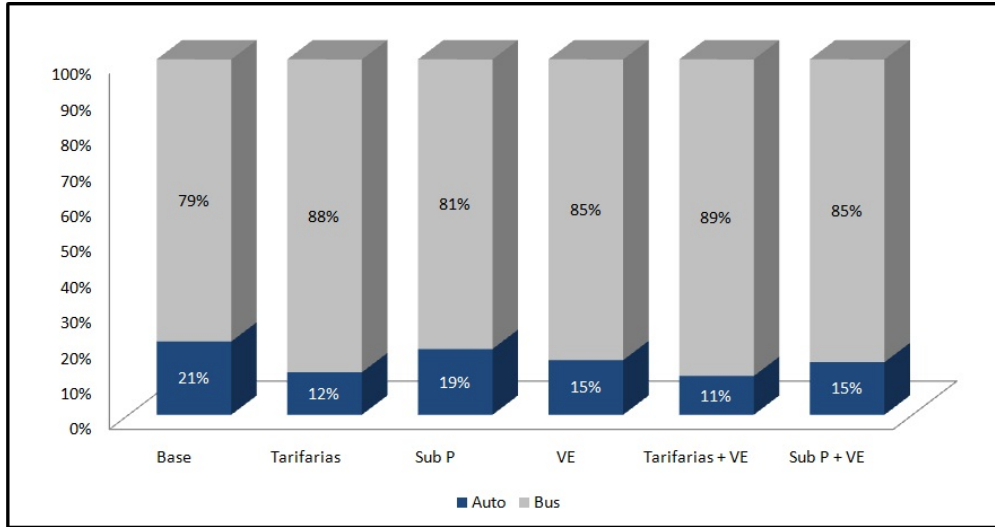


Figura 5.7: Partición modal por escenario. Estrato medio-bajo (2).

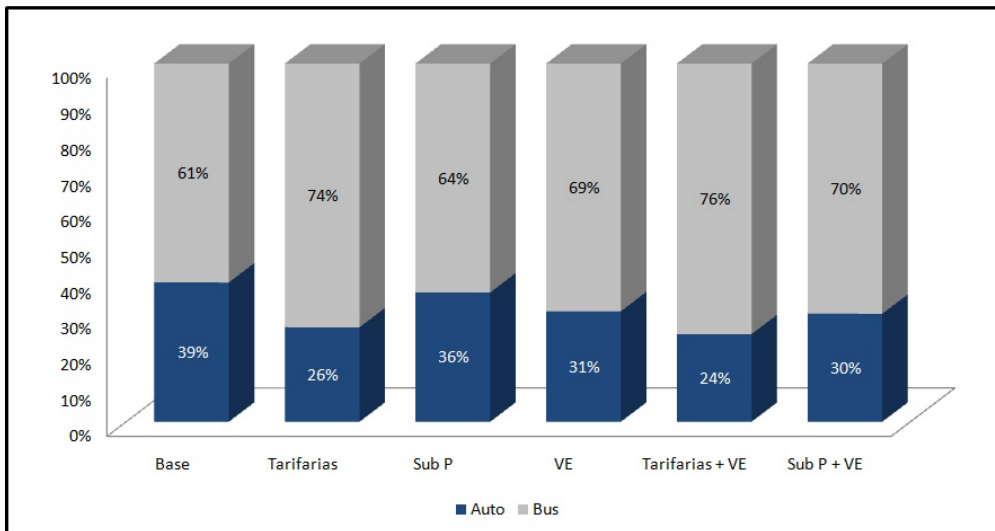


Figura 5.8: Partición modal por escenario. Estrato medio (3).

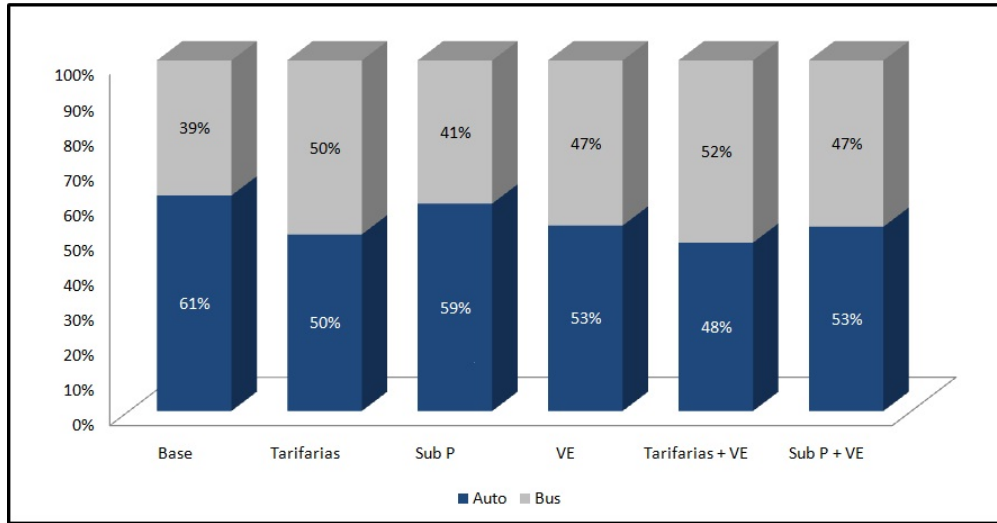


Figura 5.9: Partición modal por escenario. Estrato medio-alto (4).

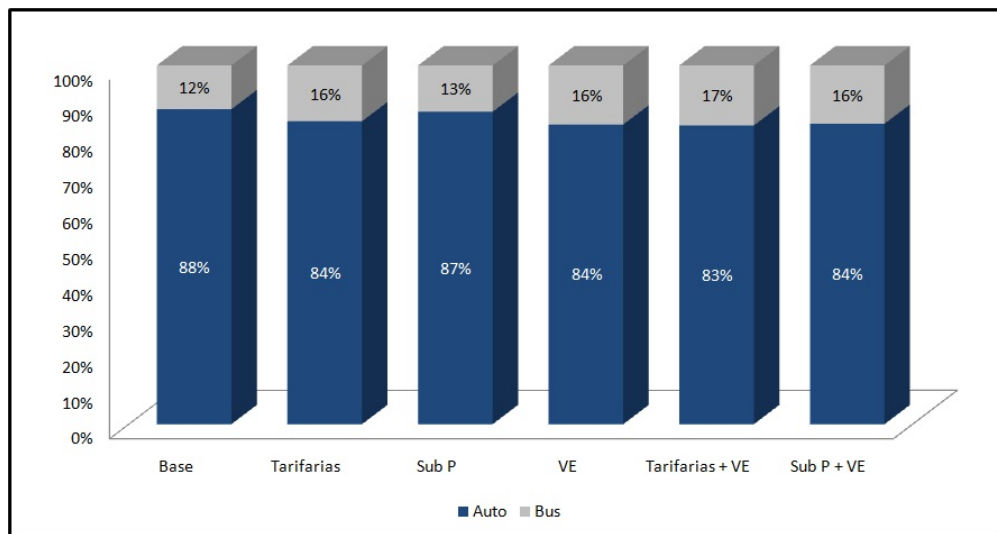


Figura 5.10: Partición modal por escenario. Estrato alto (5).

De esta desagregación de la partición modal por estrato se puede notar la gran diferencia que existe en la elección modal de los individuos pertenecientes a distintos grupos socioeconómicos. La tendencia es clara: mientras mayor sea el nivel de ingreso en un estrato, mayor es la participación del modo automóvil. Si se compara el estrato de ingreso bajo con el de ingreso alto, ocurren situaciones absolutamente opuestas: en el estrato 1 el modo bus es elegido por cerca del 90 % de la gente que lo compone, mientras que en el estrato 5 cerca del 85 % de los individuos elige viajar en automóvil. El estrato medio-bajo es bastante similar en términos de elección de modo al estrato de ingreso bajo, y

los otros estratos tienen comportamiento intermedio. Esto es razonable dado el comportamiento de los usuarios y considerando las particiones modales que se observan en Santiago, que son reportadas en el capítulo 4 (tabla 4.4, figura 4.2).

La mayor variación de partición modal ocurre justamente en el estrato que tiene mayor participación en la población total: el estrato medio (32%). En general en los estratos 2, 3 y 4 ocurre un cambio claramente significativo de demanda por modo. Los estratos extremos (bajo y alto) son los que menos variación presentan, lo que coincide con que son los con menor cantidad de personas. De esto se concluye que son las personas de los estratos 2, 3 y 4 las que responden ante cambios en las políticas de transporte. Las implicancias distributivas de cada política se analizan en secciones posteriores.

## 5.5. Bienestar

El principal resultado de esta sección corresponde al bienestar social. Como se explica en el capítulo del modelo, el valor mismo del bienestar es de poca significancia ya que, primero, no se puede obtener exactamente debido a que en el excedente de los consumidores hay una constante que no se conoce; segundo, poco habla de cada escenario y de las políticas el valor absoluto del bienestar social. Lo que en realidad interesa mirar es la variación de bienestar social con cada política: si aumentó o disminuyó y cuánto comparativamente.

Para hacer las comparaciones se toma el valor del escenario correspondiente y se compara con el escenario base. En la figura siguiente se presenta la variación de bienestar social de cada escenario con respecto al base. Esto representa cuánto se gana al implementar una o varias políticas dependiendo lo que se mire.

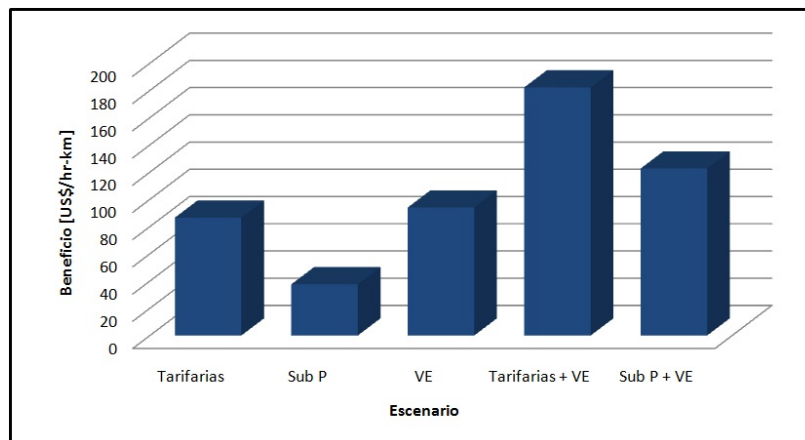


Figura 5.11: Variación del bienestar social con respecto al escenario base.



El beneficio de implementar cualquiera de las políticas tarifarias es, aproximadamente, 85 US\$/hr-km. Si se observa la columna asociada al escenario SUBP, se nota que al aplicar un subsidio inferior al óptimo debido a la restricción de tarifas no negativas (lo que lo hace realista), el beneficio de la política se ve reducido drásticamente a menos de la mitad. Esta reducción de beneficio es esperable ya que, como se vió, las velocidades prácticamente no cambian, viajar en bus es levemente más barato y las particiones modales poco cambian. El beneficio va por el aumento de frecuencias y disminución de los tiempos, efectos que son leves.

La política de vías exclusivas, de acuerdo a los resultados, genera un aumento de bienestar social levemente inferior a los 95 US\$/hr-km, lo que la hace mejor en estos términos a las políticas de subsidio, tarificación o alguna combinación de ambas. Esta diferencia es obviamente aún mayor cuando se contrasta con un subsidio sin tarifas negativas. La superioridad de las vías exclusivas sobre el resto de las políticas también es reportada por Basso et al. (2010).

Aplicar alguna de las medidas tarifarias en conjunto con vías exclusivas genera un beneficio aproximadamente igual a la suma de ambos por separado. Esto quiere decir que la ganancia en bienestar social de implementar cualquiera de las tres políticas (subsidio, tarificación vial y vías exclusivas) es prácticamente la misma independiente de la situación en que se esté, es decir, siguen siendo igual de provechosas. Lo mismo ocurre con la entrega de un subsidio limitado, cuyo beneficio es casi el mismo si se ha aplicado la política de vías exclusivas o no. En otras palabras, se aprecia que las políticas no parecen ser sustitutas unas de otras, sino que se complementan.

De la figura 5.11 también se puede hacer un análisis de utilidad considerable en relación al escenario SUBP. Este escenario es lo más cercano a muchas realidades de otros países donde se subsidia la operación del sistema de buses. De estos resultados se pueden observar algunas cosas importantes. Lo primero es que aumentar los subsidios actuales en ciertos países, que podría corresponder a moverse de SUBP a SUB en la figura 5.11, genera aumento de bienestar social; por lo tanto este argumento, que es también planteado por otros autores (por ejemplo Parry y Small (2009)) encuentra sustento en este modelo. Lo segundo es que si se está en una situación de subsidios al costo de operación, lo máximo que se puede lograr implementando políticas tarifarias (subsidio óptimo, incorporar tarificación por congestión o combinaciones) tiene un techo, representado por el beneficio social de las políticas tarifarias; el beneficio de aplicar vías exclusivas, en presencia de subsidio del 100% del costo operacional, es 1,7 veces mayor que el beneficio de aplicar políticas tarifarias óptimas sobre un subsidio realista, por lo tanto es claro que las vías exclusivas son mucho más provechosas si la situación base es de subsidios con tarifas no negativas. Y lo tercero que se puede plantear, es que la utilidad de la tarificación por congestión no desaparece nunca, en particular, si hay una política de subsidios subóptimos (pero, por lo mismo, realistas en este modelo) tarificar por congestión se vuelve especialmente importante.

El bienestar social tiene dos componentes: el excedente de los consumidores (EC) y el resultado

financiero de la operación de buses más la recaudación por tarifas al automóvil. A este último se le llama resultado financiero del sector público (RFSP) si es que se considera que es él quien incurre en el gasto por operación del sistema de buses y es él quien recibe la recaudación por tarifas de ambos modos y entrega el subsidio necesario. En la figura 5.12 se presenta la variación con respecto al escenario base del excedente de los consumidores y de dicho resultado financiero. La suma de ambos es la variación de bienestar social representada en la figura 5.11 y esta forma de presentar las componentes permite analizar cómo se ve afectado el bienestar de cada tipo de agente con cada una de las políticas. La variación de excedente de los consumidores graficado y en el cual se basa el análisis siguiente corresponde a la suma directa del excedente de cada uno de los usuarios, por lo tanto un aumento de éste no necesariamente significa que todos hayan aumentado el suyo ya que pueden haber variaciones opuestas entre un estrato y otro (como se mostrará más adelante), pero con magnitudes diferentes.

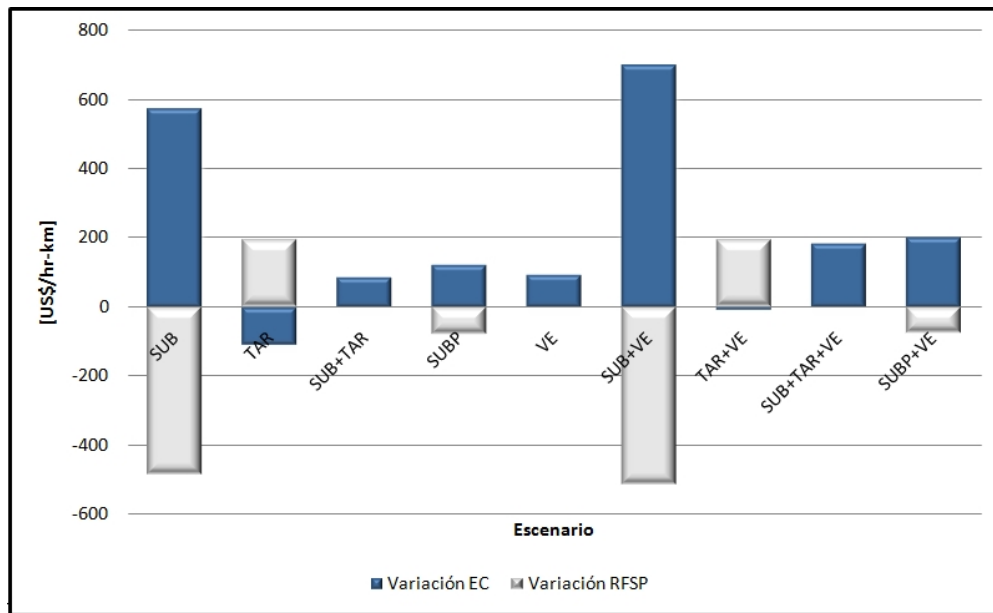


Figura 5.12: Variación del excedente de los consumidores y del resultado financiero del sector público con respecto al escenario base.

El caso de la política de subsidio es básicamente un gran aumento de excedente de los consumidores financiado solamente por el planificador central vía subsidio; se trata de una transferencia monetaria desde un agente a otro como se ve en la sección de tarifas y subsidios. Este subsidio óptimo abarca un 100 % del costo operacional y además incluye un subsidio directo al viaje ya que las tarifas del bus son negativas. Las tarifas y subsidios se muestran en la sección anterior, específicamente en las tablas 5.1 y 5.2, donde se destaca que gran parte de este subsidio óptimo es por subsidio al viaje. Así, la primera columna de la figura 5.12 sugiere, producto del gran costo para

el sector público, por qué una política de subsidios de primer mejor, sin tarificación por congestión, puede ser impracticable.

La política de subsidio con tarifas no negativas es lo mismo pero sin el subsidio al viaje, es decir, hay un aumento del excedente de los consumidores con respecto al escenario base a costa de que el sistema público subsidia el 100 % de la operación de buses, ya que la tarifa es cero.

De la tarificación vial se puede decir que ocurre algo inverso a lo que pasa con la política de subsidio pero en menor magnitud. El principal agente que percibe el beneficio de esta política es el agente recaudador del dinero ya que el excedente total de los consumidores se ve reducido debido a que el sistema de buses sigue autofinanciándose y al auto se le aplica un cobro por congestión. En términos de excedente de los consumidores global, los viajeros están peor, lo que no significa que los tiempos de viaje y espera sean mayores.

La estrategia de aplicar tarificación vial y entregar el subsidio óptimo haciendo que el resultado financiero del sector público sea cero, lógicamente produce un aumento general de bienestar en los consumidores. Esto se debe principalmente a que sigue habiendo subsidio con tarifas de bus negativas y los tiempos de viaje de ambos modos aumentan (figura 5.3), efecto que predomina sobre la disminución del excedente de los usuarios que utilizan el auto producto de la tarificación. Otras combinaciones de tarifas, si es que la restricción es otra, generan efectos diferentes manteniendo el bienestar social.

Lo que ocurre con las vías exclusivas es interesante ya que genera de manera directa un aumento de bienestar social a través de un aumento del excedente total de los consumidores y sin pérdidas para el sector público debido a que los buses se autofinancian. Si bien los usuarios de auto se ven ampliamente perjudicados en tiempo, la mayoría de las personas usa el transporte público que se ve enormemente favorecido en tiempo de viaje y de espera. El efecto de la mejora hacia el bus pesa más que el efecto negativo sobre los autos.

Los efectos de combinaciones de políticas en términos de bienestar de los agentes son muy cercanos a la suma de los efectos de cada una por separado, salvo en el caso del subsidio óptimo con las vías exclusivas. En esta combinación el incremento del excedente de los consumidores es mayor a la de sólo subsidio, pero también el déficit del sector público es mayor. En presencia de vías exclusivas se mantiene que al aplicar subsidio y tarificación simultáneamente no hay costo para el sector público, sólo aumento del excedente de los consumidores.

Se puede hacer un análisis más detallado del beneficio que perciben los usuarios con cada política en estudio. Cada estrato posee su respectivo excedente, ya que, a pesar de que enfrentan los mismos tiempos y tarifas, poseen distinta utilidad marginal del ingreso y valor del tiempo. Si se divide este excedente por la cantidad de personas que pertenece a cada estrato se obtiene el excedente individual de cada uno de los integrantes de dicho estrato. Comparando este excedente

individual en distintos escenarios se puede saber cómo y cuánto se ven afectados los integrantes de cada estrato con las distintas políticas de transporte, es decir, se puede llevar a cabo un acabado análisis de impactos distributivos. Para esta subsección es conveniente recordar que el estrato 1 es el de menor ingreso y el 5 el de mayor ingreso.

Como el excedente de los consumidores no tiene sentido como valor absoluto (no se conoce con certeza debido a la constante, ecuación 3.19), se debe comparar las variaciones de un escenario con respecto a otro. En las figuras siguientes se presenta la variación del excedente individual por estrato del escenario base con respecto a distintos escenarios. Se utiliza el escenario base como referencia porque precisamente es el que representa la ausencia de las políticas que se desea evaluar en esta tesis. Para que la figura sea aún más ilustrativa se muestra la variación del escenario base y de otro escenario (con respecto al base) unidas por una recta. Siempre el primer punto será cero (es la variación del excedente del escenario base con respecto al escenario base) y el segundo tendrá el valor correspondiente a la variación de cada escenario. De esta forma una recta con pendiente positiva significa un aumento de excedente individual y una con pendiente negativa, una disminución.

La siguiente figura representa la variación del excedente del consumidor individual para el escenario SUB. Es la variación que se produce al entregar subsidios óptimos desde la situación base.

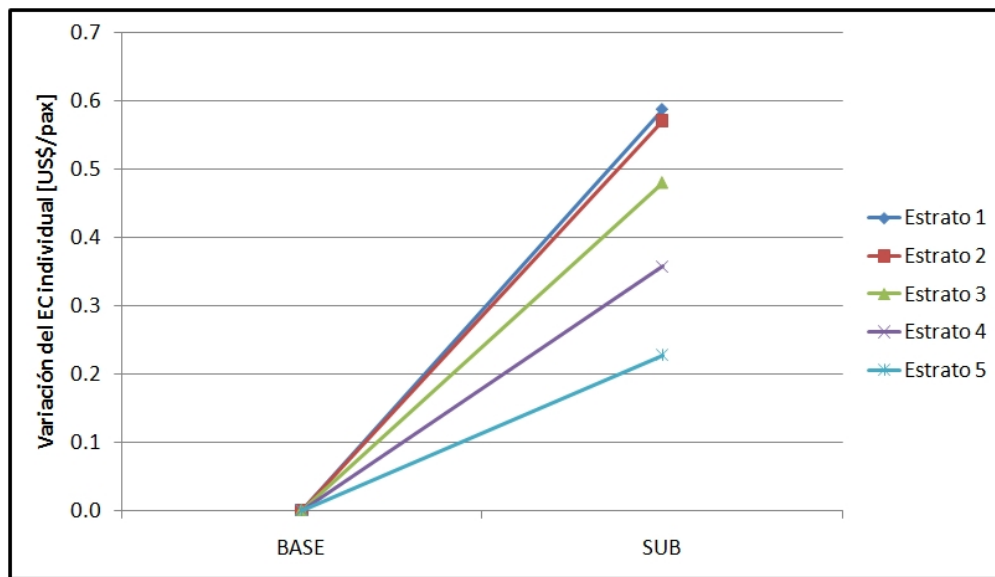


Figura 5.13: Variación del EC individual por subsidio óptimo.

Como se puede notar, con esta medida todos los usuarios se ven beneficiados directamente: su excedente aumenta. El aumento de excedente de los estratos de menor ingreso (1 y 2) es muy similar entre sí y superior al del resto. El aumento de excedente para los individuos de los estratos

medio, medio-alto y alto es menor a medida que el ingreso aumenta.

A partir de estos resultados se puede esperar que la política de subsidio sea altamente respaldada por los usuarios ya que se están viendo beneficiados directamente.

A continuación se presenta la figura correspondiente a la variación de excedente individual para el escenario de tarificación vial.

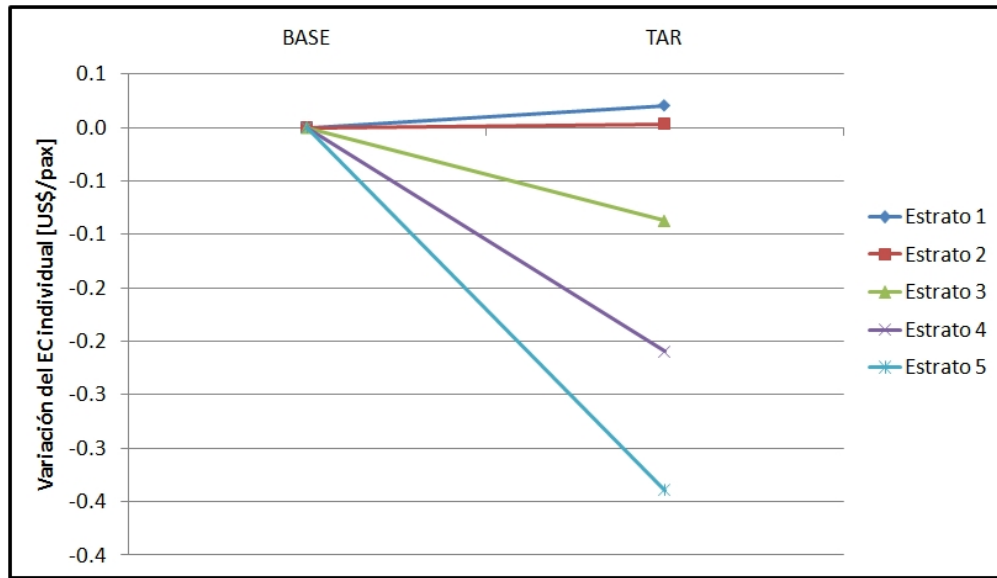


Figura 5.14: Variación del EC individual por tarificación vial.

Cuando se implementa la tarificación vial óptima, la variación de excedente en los estratos de ingreso bajo y medio-bajo es muy cercana a cero. Esto no ocurre para el resto de los individuos: los estratos 3, 4 y 5 perciben una disminución en su excedente. Dentro de estos tres, mientras mayor es el ingreso, mayor es la disminución de excedente.

En este punto hay una gran diferencia con el análisis de tarificación vial en un sistema de autos aislado. Cuando Verhoef y Small (2004) analizan impactos distributivos en la tarificación de primer mejor llegan al resultado que los usuarios que se ven más perjudicados son los de bajo valor del tiempo (como se revisa en el capítulo 2). En esta tesis, cuando se incorpora modelación de sistemas de transporte mixtos con clara interacción entre sistema de transporte público y privado, y junto a aplicar tarificación de primer mejor (espacial), se optimiza el sistema de transporte público, los efectos son totalmente opuestos: mientras mayor ingreso y mayor valor del tiempo tengan los usuarios, más reducido ven su bienestar, llegando a que incluso los de estratos bajo y medio-bajo no se ven perjudicados, sino levemente beneficiados.

Por estos motivos, se espera que los individuos de estratos de ingreso medio hacia arriba sean

reacios a la implementación de la tarificación vial. Por su parte los estratos de bajos ingresos es probable que sean indiferentes frente a esta política.

La misma representación gráfica se muestra a continuación para la combinación de subsidio y tarificación por congestión que hace que el resultado financiero del sector público sea cero.

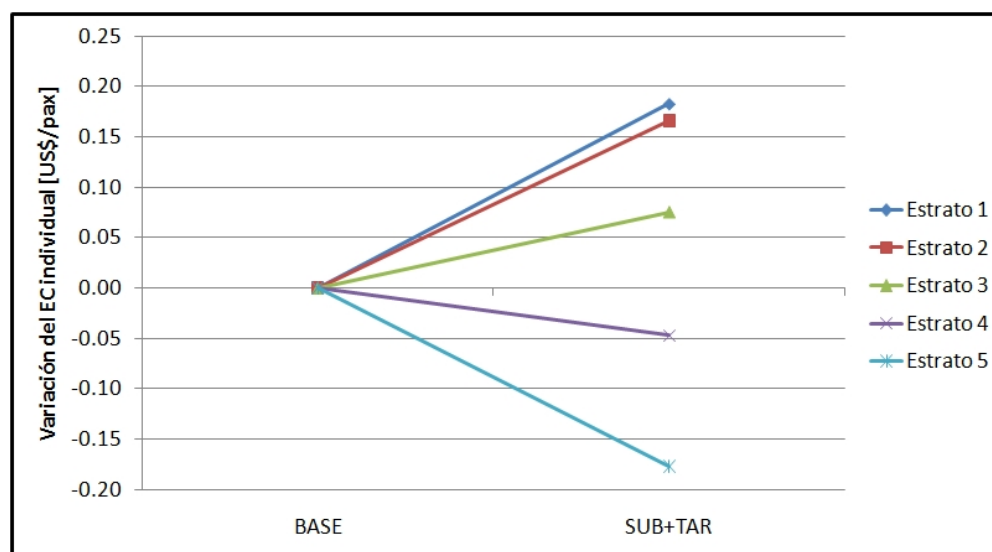


Figura 5.15: Variación del EC individual por tarificación vial y subsidio.

Para el caso de esta combinación se puede observar que hay efectos opuestos según el estrato socioeconómico. Las personas que pertenecen a los estratos 1 y 2 se ven afectadas casi de la misma manera: un aumento en su excedente. Por otro lado, los de estrato medio presentan un aumento de su excedente pero en niveles bastante moderados. En cambio, los integrantes de los estratos 4 y 5 ven reducido su bienestar personal: el estrato medio-alto tiene una leve disminución del excedente mientras que el estrato alto tiene una reducción de bienestar del mismo orden que el aumento de los estratos bajo y medio-bajo.

Como se ve en la figura 5.12 el excedente global de los consumidores es positivo. Esto se debe a que el 74 % de la población pertenece a los estratos 1, 2 y 3 mientras que solamente el 9 % pertenece al estrato de ingreso alto.

Lógicamente esta política de combinación va a encontrar reacciones dispares: las personas de los primeros tres estratos se ven beneficiados con esta política por lo tanto van a ser adherentes; el resto va a ver empeorada su situación y tomando en cuenta sólo el beneficio personal no apoyarían esta medida. Como se ha argumentado en repetidas ocasiones, hay otras combinaciones que son equivalentes pero difieren en los excedentes de los agentes. Si ambas tarifas aumentan esta figura se movería en dirección hacia lo que ocurre con la tarificación (figura 5.14), en cambio si ambas

disminuyen se mueve hacia la situación de subsidio óptimo (figura 5.13). Existe una combinación de tarifas que se puede imponer que deja a los estratos de mayor ingreso en el peor de los casos indiferentes y al resto con beneficios directos y por ende sería una política con aceptación global.

El análisis siguiente es el asociado a las vías exclusivas. En la figura 5.16 se muestra la variación de excedente individual de los consumidores por estrato.

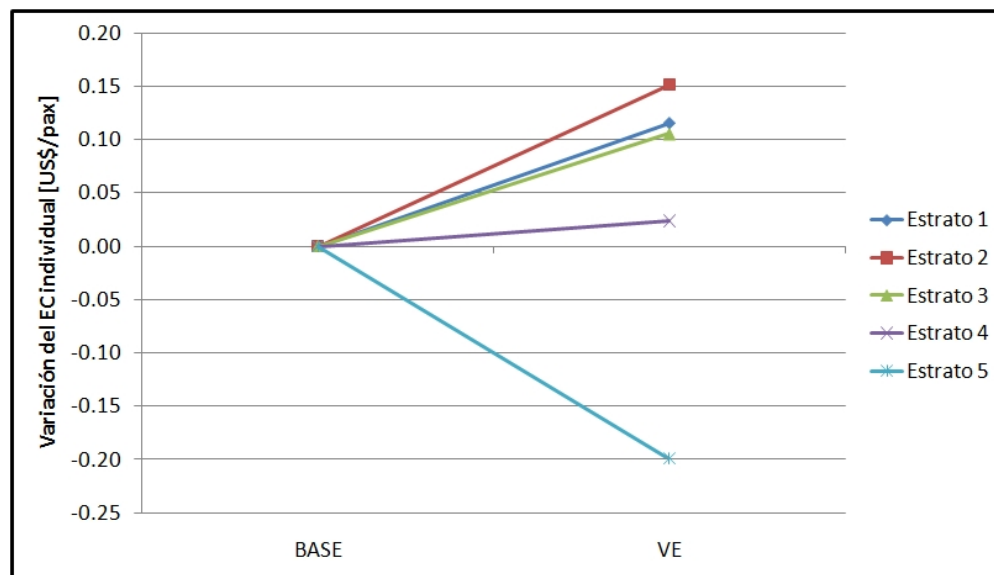


Figura 5.16: Variación del EC individual por vías exclusivas.

Lo que ocurre con esta política es bastante interesante: la gran mayoría de la población se ve beneficiada con la implementación de vías exclusivas. El único tipo de individuo que se ve perjudicado es el perteneciente al estrato de ingreso alto, probablemente debido a la partición modal de 88% de auto de este estrato en el escenario base, que cambia solamente a 84% con las vías exclusivas. Las magnitudes de los beneficios son mayores para los del estrato 2, prácticamente iguales para el estrato 1 y 3, y muy leves para el estrato 4. En cambio el desbeneficio para las personas de ingreso alto es superior al beneficio del estrato más favorecido.

La reacción de los usuarios frente a una implementación de vías exclusivas es clara, pero delicada. Si bien la mayoría se ve beneficiado y estaría a favor de esta medida, el estrato de mayor ingreso se ve más perjudicado que lo que se ve beneficiado cualquiera de los demás. El apoyo hacia la política por lo tanto sería mayoritario y el rechazo por parte de los sectores más adinerados de la población sería fuerte.

El siguiente análisis es el asociado al subsidio inferior al óptimo que tiene tarifas de bus no negativas. En la figura siguiente se muestra la variación de excedente individual de los consumidores por estrato.

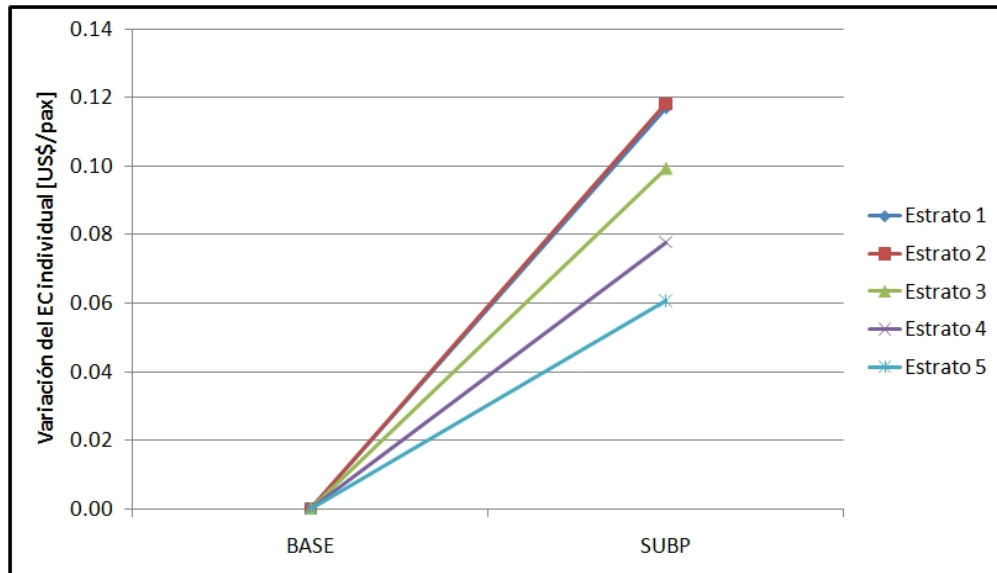


Figura 5.17: Variación del EC individual por subsidio de tarifas no negativas.

Lo que se ve en este caso es esperable: las variaciones en el excedente individual de los consumidores son de la misma forma que para el caso de subsidio óptimo pero su magnitud es mucho menor. El aumento de excedente individual que les genera esta medida a los usuarios es, aproximadamente, 5 veces menor que el que entrega el subsidio óptimo, lo que hace que sea bastante bajo.

Como consecuencia de esto, la reacción esperada de los usuarios de transporte va a ser positiva ya que se ven beneficiados directamente todos los individuos independiente de su estrato socioeconómico pero los beneficios son moderados. Para los estratos de ingreso alto el beneficio es casi despreciable por lo tanto puede llegar a haber cierta indiferencia si se considera sólo los beneficios personales para esta política.

El último análisis corresponde al de la política que integra todas las medidas y que es la que más beneficio social entrega. En la figura 5.18 se muestra la variación de excedente individual de los consumidores por estrato.



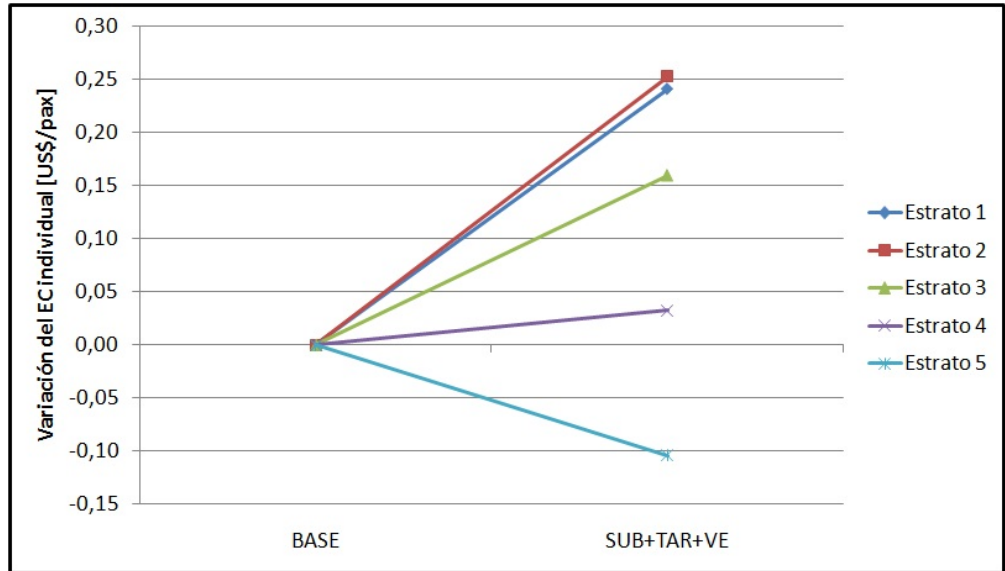


Figura 5.18: Variación del EC individual por subsidio, tarificación vial y vías exclusivas.

Lo que ocurre en este caso es que el único estrato que se ve perjudicado es el de ingreso alto y, por ende, la gran mayoría de la población ve aumentado su excedente. La disminución de excedente para el estrato 5 es menor que en el caso de vías exclusivas y menor que en el caso de subsidio y tarificación a la vez.

## 5.6. Síntesis y conclusiones

En este capítulo se presentan los principales resultados asociados a la aplicación central de esta tesis. Se puede observar bien qué ocurre en varios aspectos cuando se implementa una política o alguna combinación de ellas. Las tres políticas en estudio son una alternativa real para solucionar el problema de la congestión o para mejorar la calidad de vida de la gente y que, de hecho, son ampliamente aplicadas en varias ciudades del mundo en distintas proporciones. Sin embargo, los resultados difieren en implementabilidad y tipo de impacto.

Existen varios criterios para comparar las políticas, por lo tanto no es simple responder cuál es mejor. La respuesta depende, entre varias cosas, de los intereses del planificador central. Un criterio indiscutible es la variación de bienestar social que genera una medida: es objetivo y muy importante. También se puede ver cuál agente es el que percibe el beneficio, cuánta gente se está viendo beneficiada y a qué grupo socioeconómico se está favoreciendo y a cuál no. Se pueden mirar los niveles de congestión, el diseño óptimo del transporte público que es necesario incorporar y varias otras cosas.

De los resultados se puede ver que las frecuencias resultantes son bastante altas lo que implica que los tiempos de espera son bajos; el tamaño de los buses es mediano, ya que supera ampliamente los buses pequeños y no alcanza el tamaño de los articulados o superiores.

La implementación de vías exclusivas se posiciona como la política que, por sí sola, mayor beneficio social entrega, alcanzando aproximadamente un 10% más de bienestar social que las políticas de tarificación vial o subsidio y mucho más (2,5 veces) que la política de subsidio con tarifas de bus no negativas, que es la que se asemeja a lo que se puede observar en la práctica cuando hay subsidios al transporte público. Esta medida tiene varias implicancias, una de ellas es que disminuye la flota necesaria de buses para transportar de manera óptima a los usuarios. Un punto muy importante de esta disposición de la infraestructura vial, es que no requiere que el resultado financiero del sector público sea negativo: el beneficio de esta medida se alcanza cobrando una tarifa de bus que autofinancia el sistema y sin aplicar tarificación vial sobre los autos. Como se puede observar en la figura 5.16, con esta medida la mayoría de la población se ve directamente beneficiada. Donde puede tener dificultades esta política, es que perjudica severamente en tiempos a los usuarios de automóvil y por ende les genera una disminución de su bienestar personal. Si bien el porcentaje de usuarios que se ve afectado negativamente por esta medida es minoritario, resulta ser el grupo con mayores recursos económicos de la población. Además para implementarla en la realidad, se requiere de demarcación del pavimento, elementos físicos segregadores, un tratamiento especial para virajes y acceso a la propiedad y una fiscalización que no requiere de muchos recursos, pero es compleja de llevar a cabo debido a los potenciales bloqueos que puede producir o la tecnología avanzada necesaria para evitarlos. Además es favorable una campaña de concientización de la población.

Las políticas tarifarias (tarificación por congestión, subsidio y la combinación de ambas) generan un bienestar inferior al que producen las vías exclusivas, pero bastante cercano. Las tres opciones tarifarias son equivalentes en términos de bienestar, pero tienen distintas implicancias y efectos sobre los agentes. El gran beneficio que pueden llegar a significar las vías exclusivas es algo que Mohring (1979) señala hace tiempo con un modelo similar pero más simplificado y es una hipótesis que sitúa a esta política como una política fuerte que genera gran beneficio social incluso comparable con las políticas tarifarias. Esto último ha sido confirmado en otros trabajos (Larsen, 2009; Basso et al. (2010)) y bajo esta modelación también se puede observar.

La entrega del subsidio óptimo, como se muestra en las secciones anteriores, consiste en un aumento del bienestar de todos los individuos financiado por el sector público. También la mayor parte del subsidio óptimo no es por motivo de cubrir los costos operacionales del sistema sino que para inducir una partición modal que aumente el bienestar social. Las variables de servicio se ven mejoradas para ambos modos: disminuyen los tiempos de viaje, y los tiempos de espera del bus también se ven reducidos. Por estos motivos es esperable que la medida sea ampliamente apoyada por los usuarios. El monto total del subsidio óptimo es bastante grande (US\$ 485 por hora por

kilómetro), si se piensa en un corredor de 10 kilómetros se debe inyectar cerca de 2.600.000 pesos por hora punta al sistema. Este monto tiene dos principales dificultades: la primera es que los fondos públicos tienen un costo asociado que no es despreciable, para entregar 1 peso de subsidio la sociedad incurre en un costo mayor a 1 peso; la segunda es que este subsidio óptimo implica que se le pague a cada usuario una cantidad de dinero por usar el bus cercana a los 250 pesos, lo que es bastante complicado y está lejos de ser usual en los sistemas de transporte del mundo. Estas dos razones sumadas al alto valor del subsidio hacen que esta política sea prácticamente imposible de implementar en contraste a lo que sucede con las otras, especialmente con las vías exclusivas. Si se piensa en un subsidio más realista, en el cual no se entregue dinero por viajar en bus, sino que éste sea, a lo más, gratis, el beneficio social de la medida se ve disminuido a menos de la mitad y este beneficio disminuye a medida que se cobra más por viajar en bus.

La tarificación vial, por su parte, produce una disminución del bienestar de la mayoría de las personas y, a las que no perjudica, tampoco las beneficia significativamente. El que percibe las ganancias de esta política es el agente que se lleva la recaudación. Las tarifas de esta medida son del orden de los 50 pesos por kilómetro. La dificultad de implementación de la tarificación vial va por el rechazo que va a suscitar en la población, especialmente en los sectores de mediano y alto ingreso, y porque es sumamente complicado ejecutar una tarificación de primer mejor en un corredor. Junto con esto se debe incluir que parte de la recaudación se pierde por ineficiencia o evasión entre otras cosas; no es cierto que el 100 % de la recaudación entra directamente al agente recaudador. Lo que se utiliza en la práctica es tarificación de algunos arcos, tarificación por tramos o simplemente tarificación por ingresar a una determinada área. Sin duda estas tarificaciones más practicable no generan el mismo beneficio que la de primer mejor. Una ventaja de la tarificación es que genera un excedente en el sector público que puede ser invertido en transporte o dirigido de alguna manera que aumente el bienestar social.

La combinación de tarificación y subsidio que se analiza en esta tesis es la complementación de ambas que permite que el sector público no necesite subsidiar o entregar dinero. Los individuos se ven afectados de distinta manera con esta combinación de medidas (figura 5.15): una gran cantidad de la población se ve beneficiado directamente, pero en los dos estratos de mayor ingreso ocurre todo lo contrario. Si bien ya no está la dificultad asociada al costo de los fondos públicos, sigue siendo difícil de implementar porque supone una tarificación vial de primer mejor y un subsidio al viaje, es decir, se le debe seguir pagando a la gente por usar el bus.

Si la situación inicial es del estilo SUBP (subsidio realista) se puede mejorar, descartando el subsidio óptimo, con dos alternativas reales: vías exclusivas y tarificación por congestión. Esta última, como se explica antes, es bastante complicada de llevar a cabo y la primera genera más beneficio social y aumenta el excedente de la mayoría de las personas.

Lo que más aumenta el bienestar social es la implementación de las políticas tarifarias y la

de vías exclusivas conjuntamente, y este aumento es muy similar a la suma de los beneficios de las medidas por separado. Esto quiere decir que ambos tipos de políticas son igual de provechosas si se está en presencia o no de la otra y también que no disputan entre ellas. En esta situación las velocidades comerciales son prácticamente las más altas para ambos modos. Las implicancias asociadas a cada una de las posibilidades dentro de las políticas económicas se mantienen, por lo tanto va a haber situaciones donde todos se ven beneficiados directamente y otras donde sólo algunos perciben el beneficio. La incorporación de las vías exclusivas no disminuye el subsidio óptimo y tiene un efecto leve de aumento sobre la tarifa óptima a cobrarle a los usuarios de auto debido a que predomina el efecto de reducción de capacidad y aumento de la congestión por sobre la externalidad negativa que le dejan de causar a los usuarios de bus. Este primer mejor del modelo que constituyen la aplicación de todas las medidas en estudio no está exento de dificultades ya que se transmiten todas las de la tarificación y subsidio mencionadas en los párrafos anteriores.

Este análisis de resultados es la base para poder entender qué hay detrás de cada política y poder sacar conclusiones acerca de ellas. Estos resultados están sujetos a los supuestos hechos en la modelación y al contexto expresado en los valores de los parámetros, especialmente a la demanda total de viajes que en esta aplicación es alta y produce congestión. Se analiza en este modelo un corredor homogéneo en el espacio, por lo que no es posible captar efectos de red ni de heterogeneidad espacial como desbalance y concentraciones de la demanda.

Por esto mismo, para hacer más completo el análisis y las conclusiones se debe realizar el estudio bajo condiciones distintas, es muy importante estudiar qué es lo que ocurre con los resultados cuando éstas cambian. Por este motivo es muy provechoso hacer un completo análisis de sensibilidad para investigar cómo se comportan estas medidas bajo demandas inferiores, tiempos diferentes, distribuciones de la población distintas, etc. Además se debe hacer un análisis similar para la extensión a dos períodos ya que es un paso hacia delante en la modelación y permite potenciar las conclusiones.

## Capítulo 6

# Análisis de sensibilidad

### 6.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es hacer un análisis de sensibilidad detallado que permita poder tener una medida del impacto en los resultados que producen las distintas especificaciones y supuestos adoptados. En el fondo, se desea investigar cuánto varían los beneficios y efectos de cada política cuando se realizan cambios en el valor de los parámetros y en algunos supuestos para ver de qué modo cambian las conclusiones de políticas.

Esto permite que se puedan obtener conclusiones más sólidas con un respaldo más fuerte y también identificar aquellos parámetros claves que convendría tener en cuenta para estimarlos de la mejor manera posible en el análisis de políticas. Además se puede hacer comparaciones entre resultados para cuantificar el beneficio de una decisión del planificador central que se ve reflejada, en este modelo, en cambios de parámetros, como por ejemplo, la forma de pago en el bus o el diseño de los paraderos.

Si bien el proceso que se realiza es igual al de la aplicación central y los resultados que se obtienen son igual de completos y poseen el mismo nivel de detalle presentado en el capítulo anterior, no es el propósito de este apartado presentarlos de la misma manera sino que destacar, cuando corresponde, las principales diferencias, similitudes y, por sobre todo, ver si se mantienen las conclusiones acerca de las políticas.

El análisis de sensibilidad en cada caso tiene dos grandes ramas: una es el estudio de bienestar, que entre otras cosas incluye la comparación entre el beneficio que genera la política de vías exclusivas y las políticas tarifarias; la otra es cómo se ve afectado el diseño óptimo de transporte público con las distintas alteraciones de los parámetros y supuestos. Si el equilibrio de elección modal cambia significativamente también es necesario reportarlo.

Los parámetros y supuestos que se estudian tienen relación con los siguientes aspectos:

- Nivel de demanda.
- Largo del viaje.
- Tiempo de espera.
- Tiempo de subida por pasajero.
- Demoras por cola y demora interna.
- Distribución de la población según ingreso.
- Diseño de los paraderos.
- Fracción del tiempo de operación en paraderos que se le adiciona al tiempo de viaje de los autos en condiciones de flujo mixto.
- Tiempo de aceleración, frenado y tiempo muerto.

Además se evalúa la extensión del modelo a dos períodos con y sin diferenciación intertemporal de tarifas.

La mayoría de las comparaciones se hacen en relación a los resultados del capítulo 5. Cuando se habla de aplicación central se refiere al modelo de un período del capítulo 3, con los parámetros del capítulo 4 cuyos resultados se presentan en detalle en el capítulo 5. Los nombres de los escenarios siguen siendo los mismos que se han explicado en capítulos anteriores.

## 6.2. Demanda

En esta sección se analizan variaciones de la demanda total por viajes. Como se explica en la sección 4.2.4 no es directo analizar qué ocurre con demandas superiores y además este modelo está basado en un corredor de tres pistas por lo tanto demandas más altas son difíciles de servir, especialmente en ausencia de políticas de transporte; en la realidad no es común observar estas demandas en un eje de tres pistas para estos dos modos. Por estos motivos se hace un análisis más detallado para demandas inferiores a los 1.200 pasajeros por hora por kilómetro. Los valores adoptados para las demandas de sensibilidad corresponden a valores que generan una carga similar a la de algunos ejes de la ciudad de Santiago, reportados en MTT (1998), y en SECTRA (2003a, 2005).

Las dos demandas totales que se analizan son una demanda “media” de 700 pasajeros por hora por kilómetro y una demanda “baja” de 300 pasajeros por hora por kilómetro. Estas demandas generan cargas constantes de 7.000 y 3.000 pasajeros por hora respectivamente ya que el largo de viaje es de 10 kilómetros. La demanda media se puede observar, por ejemplo, en Irarrázaval en el sentido más cargado durante la hora punta, mientras que la demanda baja se observa en avenidas con mucho menor flujo o en algunos corredores importantes pero en el sentido menos cargado.

Es evidente que el diseño óptimo de transporte público cambia debido a que cambia la demanda total de viajes. Por este motivo se obtiene que tanto las frecuencias como la capacidad de los buses son menores en todos los casos, y, con la implementación de las políticas, los cambios en estas variables son en el mismo sentido pero con menor magnitud. Lo mismo ocurre con la flota necesaria para operar el sistema. Por ejemplo, la frecuencia óptima en presencia de vías exclusivas sigue siendo mayor y los buses más chicos con respecto a la misma situación de políticas pero sin la segregación de flujos. El distanciamiento de paraderos también es relativamente constante con las políticas de transporte pero para demandas bajas la distancia es levemente superior (alrededor del 10%).

Los tiempos de viaje y demoras en paraderos son más bajas que en la aplicación central pues la congestión es mucho menor. Esto también tiene un leve efecto sobre las particiones modales resultantes que tienden a cambiar muy poco a pesar de la implementación de cualquier medida y la participación del modo bus siempre es mayoritaria.

Lo más importante de destacar en este análisis de sensibilidad con la demanda se encuentra en el aumento de bienestar social que genera cada tipo de política. Esto se puede observar en la figura 6.1, donde se muestra el beneficio de aplicar ambos tipos de medidas en los dos escenarios de demanda.

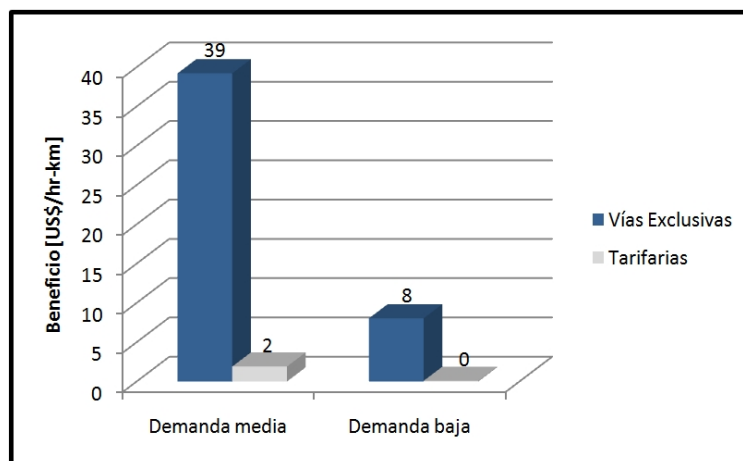


Figura 6.1: Beneficio social de políticas para demandas media y baja.

La política de subsidio, tarificación o ambas a la vez consiguen beneficios prácticamente despreciables tanto para la demanda media como para la baja. Cuando la demanda es de 700 pasajeros por hora por kilómetro (carga de 7.000 pasajeros/hora) el subsidio óptimo corresponde a subsidiar el 100 % del costo operacional del sistema de buses y pagarle una cantidad reducida a los usuarios del bus por viajar; cuando la demanda es más baja el subsidio óptimo corresponde al 50 % del costo. En el marco de la política de tarificación vial, el cobro por congestión disminuye a medida que disminuye la demanda total, producto de la menor congestión que existe.

Lo que se observa es que, con la disminución de la demanda total de viajes, mover gente del automóvil al bus mediante tarifas no genera tanto beneficio como en los otros casos y por esto las tarifas cambian. Haciendo una analogía con los análisis de buses en líneas aisladas, la curva de costos marginales totales debiera cambiar con la disminución de la demanda. Al no haber mucha congestión no se vuelve imprescindible bajar gente de los modos ineficientes en cuanto al uso del espacio, por lo mismo las particiones modales de autofinanciamiento son muy similares a las de políticas tarifarias. Subsidiar el costo operacional del sistema de buses sigue siendo beneficioso aún cuando la demanda total es menor y los efectos de congestión son bajos. En estos resultados pesa mucho el modelo de demanda que se usa y las valoraciones de los individuos por los atributos.

No ocurre lo mismo con las vías exclusivas que si bien, ven disminuido su potencial cuando disminuye la demanda, sigue alcanzando valores considerables y muchísimo más grandes que los de las demás políticas. Es importante destacar que el beneficio social no es directamente comparable entre casos con demandas diferentes pues está directamente relacionado con la demanda a través de la suma de los excedentes de cada usuario, para demandas inferiores se suma el beneficio de menos personas.

El subsidio con tarifas no negativas por definición (se agrega una restricción al escenario de subsidio) genera un beneficio igual o inferior al de las políticas tarifarias por lo tanto no vale la pena hacer más análisis que éste.

Con respecto a demandas más altas que las analizadas en la aplicación central, el problema es que en ausencia de políticas de transporte, el equilibrio modal se alcanza en un nivel de congestión tan alto, que no hay circulación, como se explica en la sección 4.2.4. Pero la implementación de políticas, afortunadamente, hace que el problema de optimización sí tenga una solución y por lo tanto se puede analizar qué ocurre en estos casos. Lo que no se puede evaluar es cuánto beneficio entrega cada política con respecto a la ausencia de ellas, ya que no hay un caso base para tomar de referencia, pero sí se puede examinar, en presencia de subsidio, tarificación, vías exclusivas y combinaciones, el diseño óptimo del transporte público, los resultados del equilibrio, las tarifas y subsidio, etc. El análisis se realiza para una demanda de 1.800 pax/hr-km que genera una carga de 18.000 pasajeros por hora, la que se puede llegar a observar en los corredores más grandes y con más demanda de la ciudad de Santiago.



Con respecto al diseño óptimo de transporte público en la siguiente figura se presentan las frecuencias y tamaño de bus para los escenarios de políticas tarifarias, de vías exclusivas y de la aplicación de ambas.

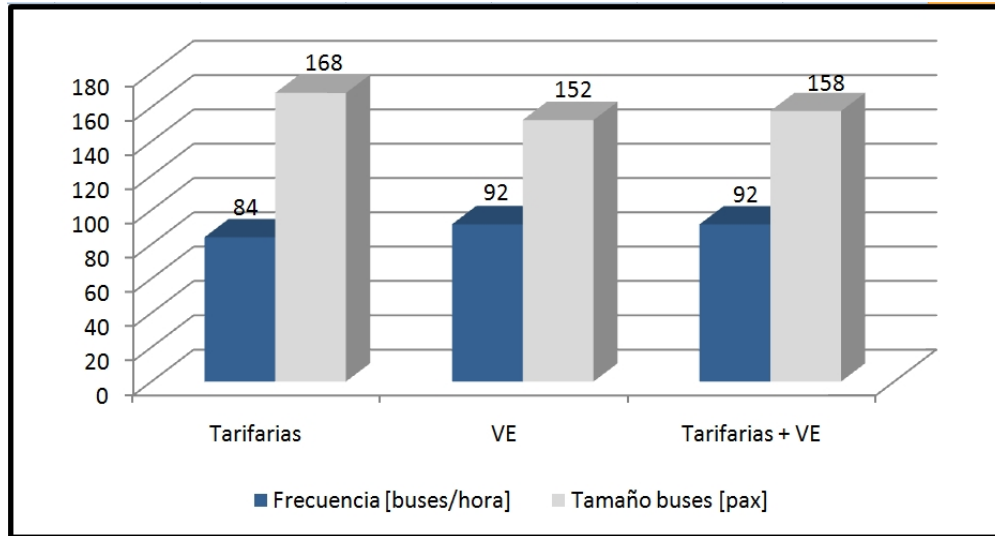


Figura 6.2: Frecuencia y tamaño de buses para demanda total alta (1.800 pax/hr-km).

Las frecuencias óptimas para la aplicación central ( $Y = 1.200$  pax/hr-km) son: 76 buses/hora en presencia de políticas tarifarias, 84 buses/hora cuando hay vías exclusivas y 85 buses/hora si se aplican ambas a la vez. Cuando la demanda se incrementa un 50 %, pasa de 1.200 pax/hr-km a 1.800 pax/hr-km, las frecuencias óptimas aumentan relativamente poco: en el caso de mayor aumento corresponde a un 11 %, que es bajo políticas tarifarias, y cambia de 76 buses por hora cuando la demanda es 1.200 pax/hr-km a 84 buses por hora cuando se incrementa a 1.800 pax/hr-km.

El aumento de la capacidad de los buses es muchísimo mayor. En la aplicación central los tamaños de los buses son: 113 pasajeros cuando se ejecutan políticas tarifarias, 97 pasajeros en presencia de vías exclusivas y 102 pasajeros en la combinación de ellas. Con el aumento de la demanda los buses crecen aproximadamente un 50 %, como se puede ver en la figura 6.2 y llegan a buses de capacidad cercana a 160 pasajeros.

En resumen, con el aumento de la demanda, ocurren dos cosas: las frecuencias cambian relativamente poco con respecto a la demanda de la aplicación central y los tamaños de los buses crecen considerablemente. Para este nivel de demanda muy alto se observan buses del tamaño de los articulados que circulan por los ejes principales de Santiago. Lo que se puede deducir de estos resultados es que la respuesta óptima frente a un incremento de la demanda de un nivel alto a uno muy alto, es aumentar las frecuencias levemente y el tamaño de los buses considerablemente. Este resultado se explica por la congestión que existe en el sistema tanto en las vías como en los paraderos. Los

paraderos siguen siendo un factor limitante ya que en segregación de flujos las frecuencias no aumentan considerablemente con respecto a flujo mixto a pesar de tener menos congestión en la pista exclusiva.

La partición modal que resulta en el óptimo es prácticamente la misma en los tres escenarios y es aproximadamente 80% para el modo bus y 20% para el automóvil. Se mantiene la tendencia a la mayoritaria participación del bus y en este caso incluso aumenta.

La política de subsidio con el acrecentamiento de la demanda es aún más costosa ya que el subsidio óptimo alcanza un valor de 1.820 US\$/hr-km, que equivale a un poco más de un dólar por pasajero. Por otro lado la tarificación es más fuerte: la tarifa a cobrarle a los autos es aproximadamente de 0,2 dólares por kilómetro, lo que hace que un viaje en auto sólo por efecto de la tarifa cueste más de mil pesos. En el fondo con niveles muy altos de demanda es óptimo que hayan particiones modales más cargadas al bus en relación a demandas menores, y para lograr esto se puede hacer mediante tarifas o mediante tiempos. Como hay congestión severa, la frecuencia no puede aumentar mucho y el efecto Mohring no aplica tanto, por lo tanto, la forma de hacerlo es con una diferencia de tarifas entre ambos modos mayor (en realidad lo que aumenta es  $[(P_a + c_{0a}) \cdot \frac{l}{a} - P_b]$ ). Por esto, si no hay tarificación el subsidio es muy grande y si no hay subsidio las tarifas a los autos deben aumentar también.

Por lo mismo, la combinación de tarificación vial con subsidio al transporte público, en donde el dinero recaudado cubre los costos de operación del sistema de buses, parece ser mucho más razonable: el subsidio total disminuye a un sexto y la tarifa del auto a un poco más de la mitad.

Las conclusiones de políticas cambian un poco con la demanda. Para demandas bajas se mantiene el resultado de que las vías exclusivas generan mayor beneficio que las políticas tarifarias e incluso la superioridad aumenta bastante. El beneficio de entregar subsidios óptimos, tarificar los autos o alguna combinación decae fuertemente con la disminución del nivel de demanda, acercándolo al beneficio de entregar los subsidios con tarifas no negativas. En el caso de demanda baja ( $Y = 300$  pax/hr-km) son equivalentes ya que el subsidio óptimo considera tarifas positivas.

Con demandas superiores no se cuenta con un caso base para hacer comparaciones pero sí se puede sacar algunas conclusiones. Cuando la demanda alcanza los 1.800 pax/hr-km que equivale a una carga de 18.000 pasajeros por hora, la situación de máximo bienestar social con aplicación de sólo una política es con las tarifarias. Es decir, en este nivel de demanda las políticas de tarifas superan a las vías exclusivas (no se puede obtener un % por falta de escenario base). Destaca que los subsidios con tarifas no negativas son ampliamente inferiores al resto de las políticas lo que muestra que si el nivel de demanda cambia esta política sigue generando mucho menos beneficio que las demás.

### 6.3. Largo de viaje

En este modelo el largo de viaje ( $l$ ) es constante, es decir, toda la gente viaja la misma distancia. La aplicación central considera un largo de viaje de 10 kilómetros y para esta sensibilidad se modifica en 5 kilómetros, es decir, un primer caso es disminuir el largo de viaje a 5 kilómetros, y el segundo es aumentarlo a 15.

Un cambio en el largo de viaje significa un cambio en el nivel de congestión. Por construcción del modelo, la carga de pasajeros en un tramo es el producto de la demanda por viajes y el largo del viaje, por lo tanto si se varía el largo del viaje, la carga de pasajeros varía de la misma manera. La diferencia entre aumentar la demanda y hacer más largo el viaje radica en que si se aumenta la demanda la congestión en la circulación misma crece ya que aumenta la carga, pero también aumenta la cantidad de gente que accede al sistema en un kilómetro por lo que se espera que las demoras sean mayores, por ejemplo, en los paraderos ya que se sube más gente a los buses. En cambio, cuando el viaje es más largo, sólo aumenta la congestión en la circulación misma producto del incremento de la carga y en los paraderos sigue accediendo la misma gente.

La carga resultante de asumir un largo de 5 km. es de 6.000 pasajeros por hora lo que se puede observar en corredores de mediano tamaño y es similar a la carga que genera la demanda media analizada en la sección anterior. De asumir un largo de viaje de 15 km. resulta una carga 18.000 pasajeros/hora, exactamente la misma que se genera con la demanda más alta del análisis de sensibilidad.

Esto sólo implica un cambio en el nivel de congestión vial porque la demanda total se mantiene constante y la cantidad de pasajeros que accede al sistema en un kilómetro es la misma.

A continuación se realiza el análisis de sensibilidad por separado para los dos valores de  $L$ .

- Largo de viaje de 5 kilómetros

Con la disminución del largo de viaje a 5 kilómetros ocurren los cambios lógicos asociados a una menor carga y congestión en el sistema: las frecuencias y los tamaños de los buses disminuyen ya que hay que transportar menos gente a la vez; las velocidades comerciales aumentan, especialmente la del automóvil. También la distancia entre paraderos disminuye aproximadamente 50 metros.

Un cambio importante se produce en las particiones modales que resultan del equilibrio con las variables óptimas. En la siguiente figura se compara la partición modal del bus resultante con la de la aplicación central.

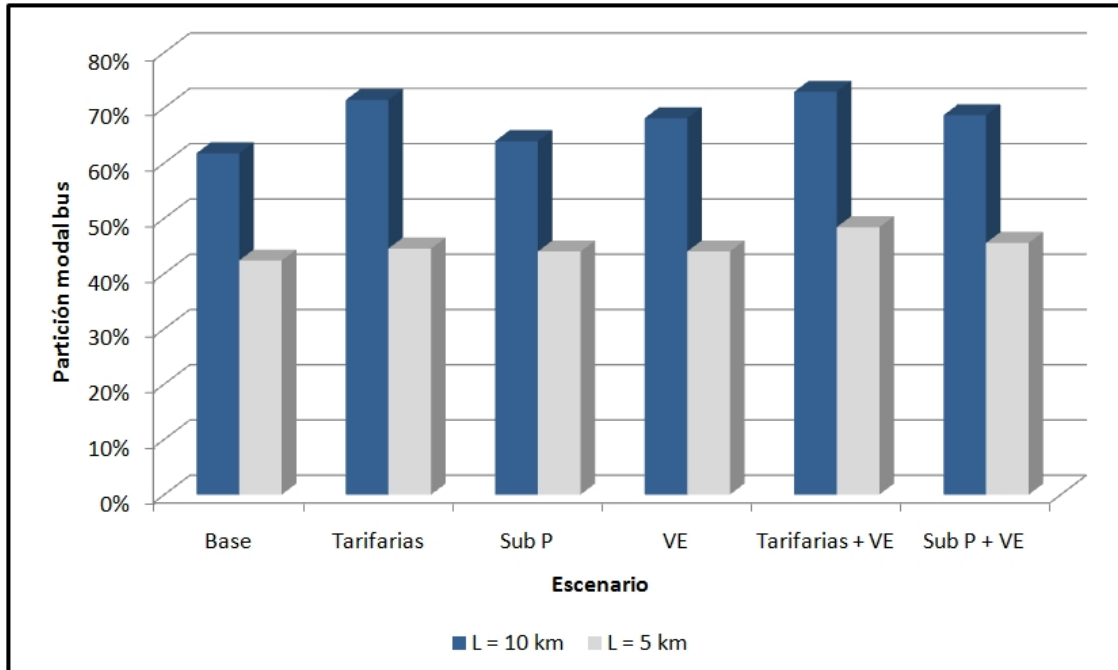


Figura 6.3: Comparación de la Partición modal del bus para disminuciones del largo de viaje.

La participación del bus decae fuertemente cuando disminuye el largo de viaje. Para un viaje de 10 kilómetros, incluso cuando la demanda por viajes disminuye y genera cargas similares, la mayoría de los viajes se realizan en bus como se menciona en la sección anterior. Cuando cambia el largo a 5 kilómetros el bus es elegido aproximadamente por un 40% de los individuos y por lo tanto el auto pasa a ser el modo con la participación mayoritaria. Esto es explicado por el hecho de que al disminuir el largo de viaje, sólo disminuye la carga y no cambia la gente que accede al sistema. Como la congestión en la circulación disminuye bastante, conviene que más gente vaya en automóvil y así disminuir la congestión que se produce en los paraderos producto de las transferencias de pasajeros. Visto de otra manera, la externalidad de un usuario más en el auto (proveniente de los buses) cambia.

Con respecto al beneficio social de implementar ciertas políticas hay un cambio significativo de beneficios y también de implicancias lo que se muestra en la siguiente figura a través de la representación de la diferencia de bienestar social con respecto al escenario de ausencia de políticas. Este gráfico es del mismo tipo del que se presenta en el capítulo 5 con el fin de analizar los beneficios de cada una de las políticas.

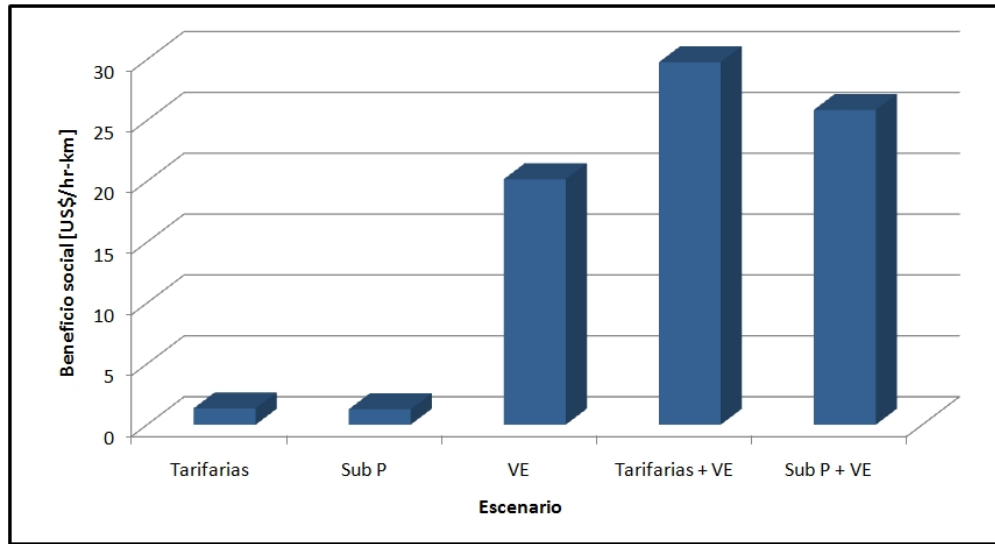


Figura 6.4: Beneficio social de políticas para largo de viaje de 5 km.

Al igual que para demandas inferiores, el beneficio de implementar vías exclusivas es ampliamente superior al de implementar una política de subsidio, tarificación o ambas a la vez. Se puede observar que una vez implementada la política de segregación de flujo, las políticas tarifarias, incluyendo al subsidio subóptimo, generan un beneficio mayor que el de implementarlas en flujo mixto pero menor que el de las vías exclusivas. En este caso la combinación de políticas genera un beneficio social mayor que la suma de los beneficios de aplicarlas por separado. Esto no ocurre con disminuciones de la demanda (resultado que no se muestra gráficamente).

El resto de las implicancias de las políticas se mantiene muy similar al de la aplicación central.

- Largo de viaje de 15 kilómetros

Como se señala anteriormente, con el aumento del largo de viaje aumenta la carga de pasajeros por hora y la congestión en la vía. Por este aumento necesariamente las frecuencias y los tamaños de los buses deben crecer para poder transportar a toda la gente. El movimiento de ambas variables se muestra en la figura 6.5.

En comparación con la aplicación central (figura 5.1) se puede comprobar que tanto la frecuencia como la capacidad de los buses son mayores en este caso. El aumento de la frecuencia es moderado ya que es entre un 4% y un 22% según el escenario, pero el aumento del tamaño de los buses es cuantioso: la capacidad óptima de los buses cuando el largo de viaje es 15 kilómetros es por lo menos un 50% mayor, alcanzando hasta un aumento del 69%. Para este valor del largo de viaje el tamaño de los buses es similar al de un bus articulado de capacidad 160 pasajeros.

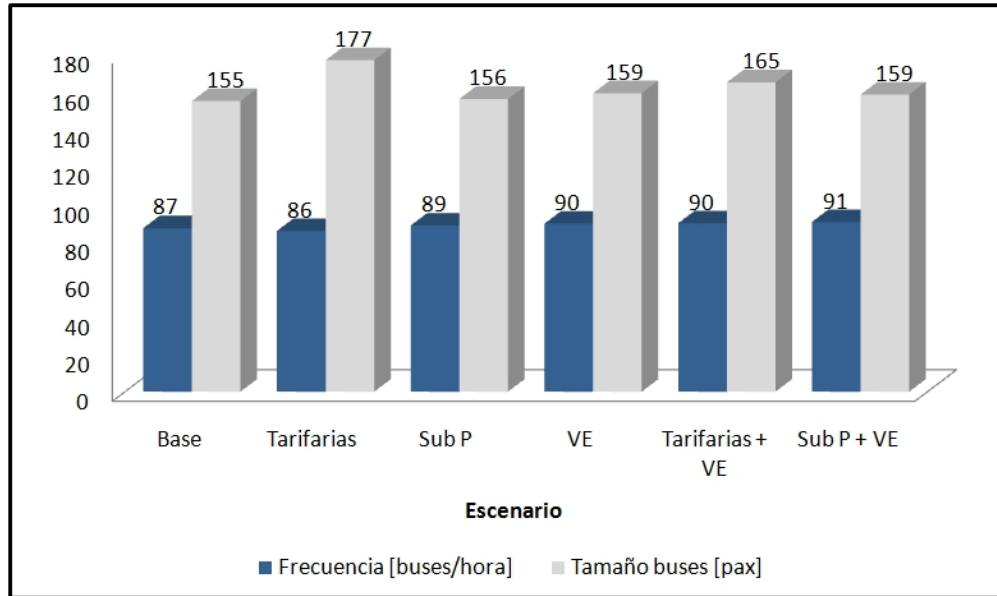


Figura 6.5: Frecuencia y tamaño de buses para largo de viaje 15 km.

De esto se deduce que la respuesta óptima del diseño del sistema de buses frente a un aumento de la carga de 12.000 a 18.000 pasajeros por hora es principalmente a través de un incremento de la capacidad de los buses, acompañado de un aumento menor de la frecuencia. Esta variación leve en la frecuencia mantiene el grado de saturación de los paraderos en niveles inferiores al 50%. El crecimiento del tamaño de buses es levemente superior al que se obtiene con demandas de 1.800 pax/hr-km.

Por lo tanto, en el sentido del diseño óptimo del transporte público ocurre lo mismo si se aumenta la demanda o el largo de viaje. Con respecto a las particiones modales, ocurre lo mismo que cuando se incrementa la demanda. En este caso la participación del bus aumenta a niveles cercanos al 80%. La participación del modo automóvil se ve reducida en el óptimo. El cambio en la partición modal del bus se puede observar en la figura siguiente.

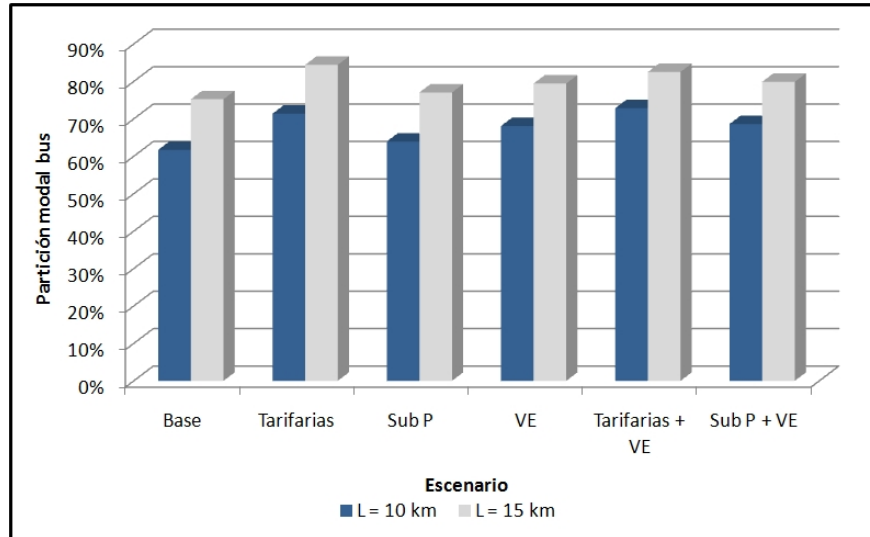


Figura 6.6: Partición modal del bus para aumento del largo de viaje.

En este caso el aumento del largo de viaje sigue manteniendo situaciones congestionadas por lo tanto el cambio se parece al que se produce cuando se aumenta la demanda, ya que la externalidad de un usuario más de auto es distinta pero similar.

Para hacer un análisis de beneficio social de las políticas con el aumento del largo de viaje se presenta a continuación la figura que muestra la variación de bienestar de cada uno de los escenarios con respecto al escenario sin políticas. Es la misma figura presentada anteriormente en los otros análisis de diferencia de bienestar social (figuras 6.1 y 6.4), que permite ver gráficamente el beneficio que da alguna política o la combinación de ellas.

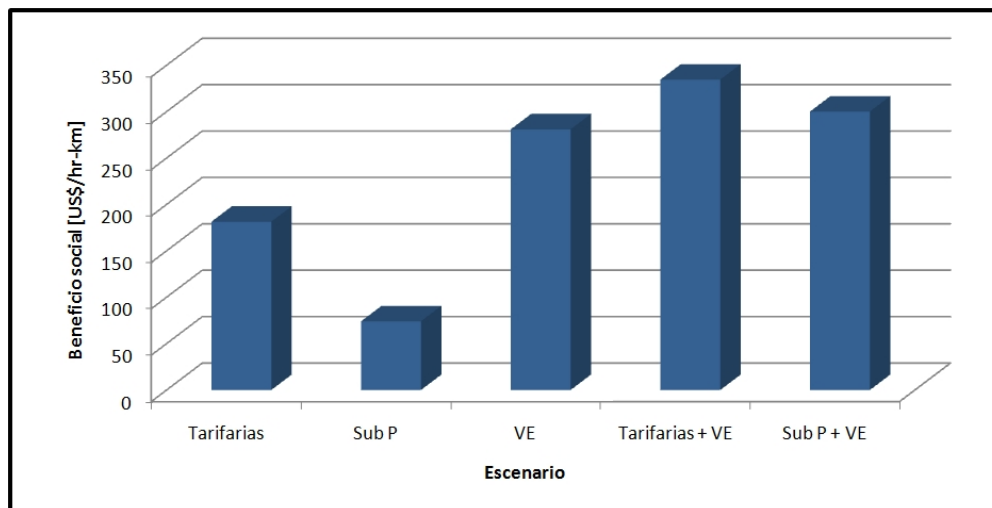


Figura 6.7: Beneficio social de políticas para largo de viaje de 15 km.

La política de vías exclusivas es superior, en cuanto a beneficio social se refiere, a la tarificación vial y al subsidio en este caso. Este resultado se tenía en la aplicación central pero la diferencia entre las medidas tarifarias y la segregación de flujo crece. En la aplicación central las vías exclusivas reportan un beneficio de 95 US\$/hr-km mientras que las políticas tarifarias uno de 85 US\$/hr-km, en donde la diferencia es de 10 US\$/hr-km equivalentes aproximadamente al 13% del beneficio total de la medida de segregación de flujo. En cambio, cuando el largo de viaje aumenta a 15 km. los beneficios de implementar políticas son mucho mayores: 180 US\$/hr-km. por políticas tarifarias y 280 US\$/hr-km por efecto de vías exclusivas. La diferencia aumenta y las vías exclusivas generan un beneficio superior en aproximadamente un 50% con respecto a las otras. El subsidio de tarifas no negativas se queda muy atrás en relación a las demás políticas, ya que genera un beneficio equivalente a un 40% del de las políticas tarifarias e igual a un 26% del beneficio de segregación el flujo. Se puede concluir que cuando aumenta la congestión vial, si la demanda total no sube, es mejor segregación los flujos de forma de eliminar la congestión cruzada para beneficiar principalmente al sistema de buses generando simultáneamente frecuencias más altas y cambios en la partición modal.

Es importante mencionar que el subsidio óptimo en este caso es aproximadamente el doble del de la aplicación central, por lo tanto se requiere contar con más recursos para inyectarle al sistema si se quiere aplicar esta política. Esto es porque aumenta la congestión y la demanda total se mantiene, es decir, se necesita cambiar más gente desde el auto hacia el bus que en la aplicación central y esto se logra aumentando la diferencia de costo para los usuarios de ambos modos ya que en flujo mixto no se pueden generar diferencias importantes de tiempo. La aplicación conjunta con tarificación vial sigue manteniendo un rol importante en la reducción de los subsidios óptimos.

La combinación de políticas tarifarias con vías exclusivas, a diferencia de lo que ocurre con largo de viaje menor, no produce un aumento de bienestar considerable con respecto a la situación de sólo vías exclusivas. En este caso las políticas no se complementan igual de bien y el beneficio de ambas es mucho menor que la suma del beneficio de cada una por separado.

En relación a los efectos distributivos de la política de vías exclusivas, en la aplicación central y en el caso de largo de viaje de 5 km los impactos de las medidas sobre los distintos estratos se mantenían relativamente invariantes, pero cuando aumenta a 15 kilómetros los impactos cambian. El cambio más significativo que ocurre es con las vías exclusivas donde todos los estratos ven aumentado su excedente del consumidor individual. En los otros casos el estrato de mayor ingreso se veía bastante perjudicado en cuanto a bienestar personal.



## 6.4. Tiempo de espera

En el modelo, el tiempo de espera es una fracción del intervalo teórico de tiempo entre dos buses, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$t_e = \theta \cdot \frac{1}{f} \quad (6.1)$$

El valor utilizado en la aplicación central es  $\theta = 1/2$ . En este análisis se evalúan dos casos. El primero es aumentar este valor al doble y el segundo a cuatro veces, es decir, a 1 y a 2 respectivamente. El impacto de esto está únicamente en el tiempo de espera: para una frecuencia dada, mientras mayor es el valor de  $\theta$ , mayor es el tiempo de espera. Esta sensibilidad al parámetro  $\theta$  es equivalente a un cambio en la ponderación del tiempo de espera en la función de tiempo generalizado o un cambio, para un valor del tiempo dado, en la proporción entre el valor del tiempo de espera con respecto a los demás. También puede interpretarse como que aumenta la varianza de los intervalos, lo que en algunos casos se denomina efecto pelotón; tiene relación con la regularidad con la que circulan los buses.

Los resultados en general son muy similares a los de la aplicación central, los equilibrios prácticamente no cambian, el distanciamiento de paraderos es el mismo y lo más importante es que el beneficio asociado a las políticas es bastante cercano. El cambio ocurre en la relación de beneficio entre las políticas tarifarias y las vías exclusivas. En el caso en que  $\theta$  vale 2, las políticas tarifarias superan por poco (1%) a las vías exclusivas, contrario a lo que inicialmente pasaba (las vías exclusivas eran superiores y por un margen mayor).

Las conclusiones de políticas son sensibles a este parámetro ya que en su valor extremo se cambia la relación de orden, y se genera prácticamente un empate, entre las vías exclusivas y las políticas tarifarias. Esto quiere decir que hay sensibilidad frente a cambios en valores relativos del valor del tiempo, o sea, si aumenta la valoración por el tiempo de espera frente a los otras, las políticas tarifarias son igual de convenientes que las vías exclusivas; visto desde otra perspectiva, hay sensibilidad a la facilidad de acceso al bus, ya que un valor alto de  $\theta$  puede ser visto como la existencia de impedimentos para subirse al bus, por ejemplo, dificultad para subir al primero que pasa y esperar el siguiente; equivalentemente valores bajos de  $\theta$  podría representar conocer la programación de los buses o tener una buena estimación de cuando van a pasar por el paradero.

Otra variación que se puede destacar es en las frecuencias y capacidad de los buses que resultan del óptimo. En las tablas siguientes se presentan las frecuencias y las capacidades de los buses para la aplicación central y para los dos valores de sensibilidad.

Tabla 6.1: Comparación de frecuencias óptimas para distintos valores de  $\theta$ .

Escenario	Frecuencias [buses/hora]		
	Aplicación central ( $\theta = 0,5$ )	$\theta = 1$	$\theta = 2$
Base	72	75	81
Tarifarias	76	79	84
Sub P	76	79	86
VE	84	88	94
Tarifarias + VE	85	89	94
Sub P + VE	87	91	97

Tabla 6.2: Comparación de tamaños de bus óptimos para distintos valores de  $\theta$ .

Escenario	Capacidad bus [pasajeros]		
	Aplicación central ( $\theta = 0,5$ )	$\theta = 1$	$\theta = 2$
Base	104	98	90
Tarifarias	113	109	101
Sub P	101	96	89
VE	97	93	87
Tarifarias + VE	102	99	93
Sub P + VE	94	91	85

Como se puede observar existe un cambio en las frecuencias óptimas, que en el primer caso el aumento no es superior al 5% y en el segundo caso no sobrepasa el 14%. Esto evidentemente genera un cambio en los tiempos de espera. Por supuesto al ser la frecuencia levemente superior debe ocurrir lo mismo con la flota de buses. Esto es consistente con la teoría: los aumentos de  $\theta$  hacen que el tiempo de espera valga más por lo tanto el efecto Mohring es más importante y por ende las frecuencias crecen disminuyendo así los tiempos de espera.

En los tamaños de buses ocurre lo mismo pero en el otro sentido: éstos disminuyen en porcentajes muy similares a los del aumento de la frecuencia.

## 6.5. Tiempo por aceleración, frenado y tiempo muerto

El modelo incorpora que en cada paradero un bus ocupa  $t_p$  segundos que consisten en detenerse, acomodar la altura del bus al nivel del paradero en los casos que la tecnología lo requiera, abrir las

puertas, cerrarlas y acelerar (excluyendo las demoras interna y por cola y el tiempo de transferencia de pasajeros). En la sección de parámetros se fija este valor en 15 segundos. A modo de análisis de sensibilidad se analizan tres situaciones: una disminución de este tiempo a 10 segundos, un aumento moderado de este tiempo a 20 segundos y un aumento grande que equivale a 25 segundos. Según las investigaciones hechas y reportadas en el capítulo 4, el valor de 25 segundos está asociado prácticamente al peor de los casos, que estaría representado por buses muy grandes (sobre los 150 pasajeros) y congestión severa de pasajeros en los andenes. Este valor no tiene mucha relación con el diseño del paradero si no más bien con la operación que se produce en él, de la cantidad de pasajeros que aborda un bus y por ende de las frecuencias, distanciamiento de paraderos y demanda por bus, lo que hace que este relacionado con la optimización. En la literatura no existe una forma funcional para este tiempo que dependa de las variables de optimización por lo tanto se asume un valor razonable a priori y se hace un análisis de sensibilidad.

Con la variación de  $t_p$  no existen grandes cambios. Todo permanece muy similar, por ejemplo, las frecuencias y tamaño de buses no cambian más de un 3% en ningún caso, los tiempos de viaje son muy similares y en general las implicancias de cada política se mantienen. Sin embargo, hay importantes cambios en la variación de bienestar social que causa cada política si se asumen distintos valores de este parámetro. En la figura 6.8 se ilustra el beneficio de las vías exclusivas y el de las políticas tarifarias para el valor base de  $t_p$  y los tres valores de sensibilidad.

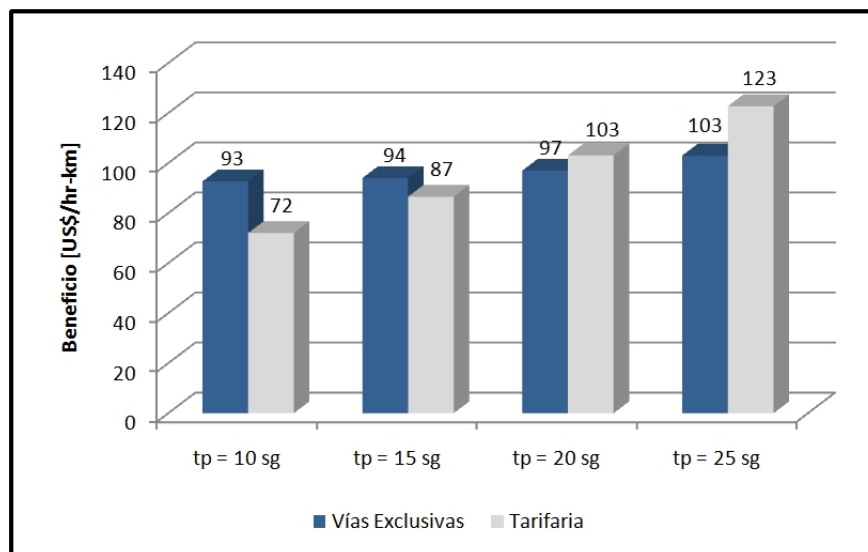


Figura 6.8: Beneficio social de políticas para diversos valores de  $t_p$ .

Se puede observar que una disminución de este valor hace que la política de vías exclusivas sea aún más superior a las tarifarias que en el caso base. Lo contrario ocurre cuando dicho valor aumenta: cuando  $t_p$  vale 20 segundos, las políticas son muy similares en cuanto a beneficio social se refiere, mientras que en el caso de tiempos de 25 segundos, cualquier política tarifaria es un

20% superior a la de vías exclusivas. Este valor de 25 segundos de tiempo, si es que se puede dar, está asociado a buses grandes y congestión severa de pasajeros, y en este caso el modelo entrega buses de capacidad máxima de 115 pasajeros y sin congestión en andenes (no más de 4 personas subiendo a cada bus en un paradero). En el fondo,  $t_p$  depende de las variables de diseño del transporte público y la congestión en andenes y estas condiciones no varían significativamente con el cambio de valor de  $t_p$ . Si se agrega el hecho de que en la literatura se ha señalado que es correcto asumir este valor constante (Fernández y Tyler, 2005), lo más razonable es mantener las conclusiones de políticas asociadas a la aplicación central ya que es el valor de  $t_p$  más sensato dadas las frecuencias, tamaños de buses y ausencia de congestión en los paraderos que resultan.

El otro cambio se produce en el número de paraderos por kilómetro que se ubican. Si bien este valor cambia con los distintos valores de  $t_p$ , su tendencia a mantenerse relativamente constante entre los escenarios de políticas no cambia. Por este motivo se presenta en la siguiente figura el distanciamiento promedio sobre todos los escenarios, para los diferentes valores de la suma de tiempo por aceleración, frenado y tiempo muerto.

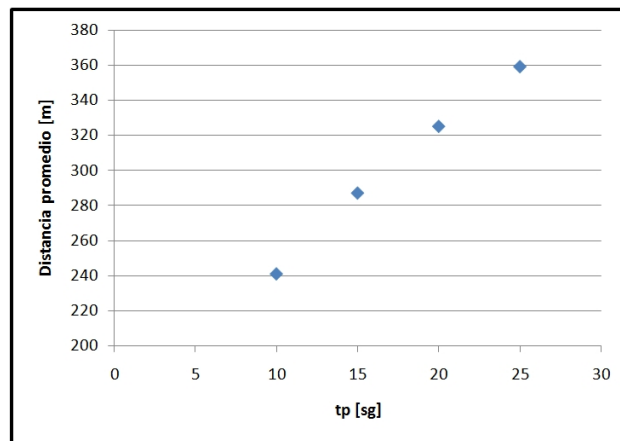


Figura 6.9: Distancia promedio entre paraderos para diferentes valores de  $t_p$ .

La relación es bastante lineal, a medida que se aumenta el tiempo fijo que ocupa un bus en cada paradero lo óptimo es separarlos más, en otras palabras, conviene que el bus se detenga menos veces. Esto, obviamente, impacta en los tiempos de acceso que se ven aumentados lo que produce una desventaja comparativa del bus frente al auto.

## 6.6. Tiempos de subida

El supuesto con respecto a los tiempos de subida de este modelo es que existe un tiempo marginal de subida  $t_{sb}$ , que cada pasajero demora lo mismo en subir e igual o menos en bajar y que

la subida y bajada ocurren simultáneamente por puertas especializadas, en particular hay sólo una de subida. El valor de este tiempo se considera 2,5 segundos por pasajero suponiendo un sistema de pago con tarjeta. El análisis que se hace en esta sección corresponde a un aumento de este valor al doble, lo que podría asociarse a un pago poco eficiente al conductor.

Con la variación del tiempo marginal de subida de 2,5 segundos por pasajero a 5 segundos por pasajero, los cambios que ocurren están relacionados con la frecuencia y tamaño de buses. El beneficio de las políticas, las implicancias y efectos distribucionales, el equilibrio de partición modal, el distanciamiento de paraderos y otros se mantienen casi igual; las conclusiones respecto de las políticas no cambian, es decir, la política que más beneficio genera sigue siendo la de vías exclusivas, seguida de cerca por las políticas tarifarias; el subsidio de tarifas no negativas se desempeña bastante peor que las demás y la combinación de políticas genera un beneficio muy similar a la suma de los beneficios de aplicarlas por separado.

El gran y único cambio con esta variación es el diseño óptimo del transporte público, específicamente la frecuencia y el tamaño de los buses. En la figura 6.10 se muestra la frecuencia en los distintos escenarios para ambos tiempos marginales de subida.

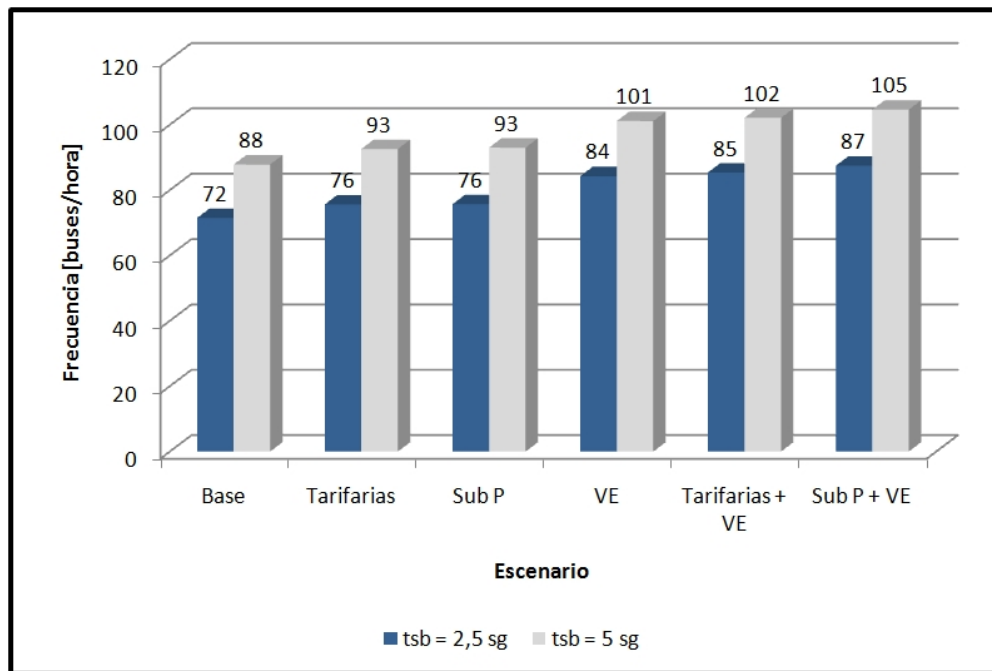


Figura 6.10: Frecuencias óptimas para distintos tiempos marginales de subida.

Resulta que las frecuencias óptimas con un tiempo marginal de subida de 5 segundos por pasajero son al menos un 20% mayores que las de la aplicación central. Con la capacidad de los buses ocurre algo muy similar pero en el otro sentido: las capacidades disminuyen al menos un

20 % con un aumento del tiempo marginal de subida. Ambas variables son sensibles al valor de este parámetro.

Finalmente se puede hacer un análisis directo del beneficio que genera pasar de un sistema en el cual los pasajeros tarden 5 sg. a uno en donde tarden 2,5 sg. Esto se hace simplemente restando los valores de bienestar social que resultan de cada escenario con ambos valores. En el escenario denominado base, que es sin subsidio, sin tarificación vial y en flujo mixto, la disminución del tiempo genera un beneficio de 100 US\$/hr-km que es muy similar al beneficio que entrega implementar vías exclusivas, entregar el subsidio óptimo o tarificar cuando el tiempo es de 5 sg. En los otros escenarios el beneficio no disminuye a menos de 70 US\$/hr-km. Este posible cambio de sistema de pago genera beneficios considerables, similares a los de aplicar las políticas de transporte en estudio, por lo que se posiciona como una política relevante a considerar. Existen también otras alternativas de sistema de pago que pueden generar tiempos de transacción de pasajeros aún más bajos que los considerados en la aplicación central. Un ejemplo es cuando se implementan zonas pagas, en las cuales se paga al momento de acceder al paradero y la subida y bajada de pasajeros ocurre simultáneamente por varias puertas, lo que se traduce en una disminución del tiempo promedio de subida de un pasajero. A la luz de estos resultados, es razonable pensar que esta forma de pago también generaría beneficios sociales importantes.

## 6.7. Demoras por cola e internas

Una de las innovaciones de esta tesis es la incorporación de funciones analíticas para las demoras en paraderos en el análisis microeconómico de políticas. En esta sección se analiza el efecto en los resultados de considerar estas demoras constantes y el efecto de despreciarlas. Así el primer caso en evaluación corresponde a asumir que la demora total es de 6 segundos: 3 segundos por demora interna y 3 segundos por demora en cola. El segundo caso es suponer que no existen tales demoras y corresponde al supuesto normal de los modelos de buses aislados como se muestra en la revisión bibliográfica, entre los cuales destacan los modelos de Mohring (1972, 1976), Jansson (1980, 1984) y las extensiones hechas por otros autores. Además este supuesto se ha hecho en este tipo de análisis basados en modelos que incorporan la interacción entre transporte público y privado (por ejemplo Mohring, 1979; Larsen, 2009; Basso et al. 2010).

Al cambiar de supuesto en relación a las demoras, es decir, pasar de funciones de demoras a valores constantes no genera cambio en las conclusiones de políticas, en el sentido de que el beneficio social de cada una de ellas se mantiene en la misma relación que con la función analítica de demora.

Lo que cambia es el diseño óptimo del transporte público, las variables de servicio como por ejemplo la velocidad y consecuentemente, la partición modal. Para ilustrar esta situación se presentan las frecuencias óptimas para la aplicación central (con función de demora) y los dos casos de

análisis de sensibilidad descritos recientemente. Como se puede observar el cambio es importante. En algunos escenarios puede significar una diferencia en la frecuencia óptima de casi un 50 %.

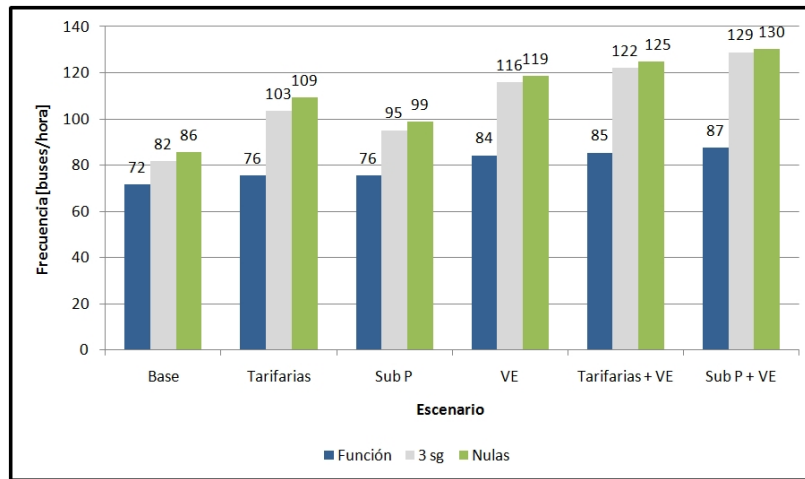


Figura 6.11: Frecuencias óptimas para variaciones del supuesto de demoras en paradero.

En la figura 6.12 se muestra qué sucede con el tamaño de los buses.

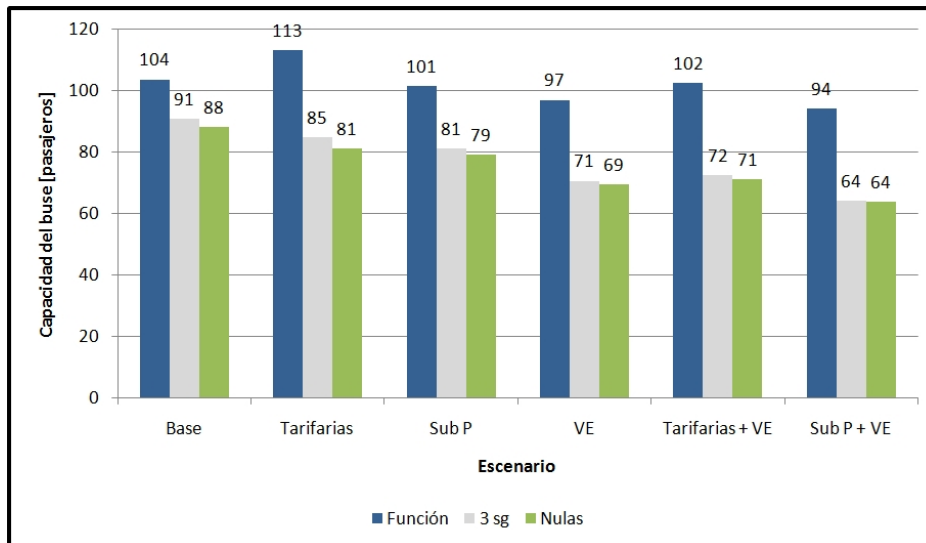


Figura 6.12: Tamaño de buses óptimos para variaciones del supuesto de demoras en paradero.

Con el cambio de supuesto (de funciones de demora a demoras constantes) el tamaño de los buses decrece drásticamente, en oposición a lo que ocurre con la frecuencia que aumenta bastante. Pero además existe un cambio en la implicancia de implementar alguna política tarifaria: en ausencia de vías exclusivas entregar subsidio (o tarificar) hace que aumenten las frecuencias y disminuya el tamaño de los buses. Esto último no ocurre cuando se incluye en la modelación la congestión en

los paraderos, lo que se puede apreciar en las figuras 6.11 y 6.12: entregar subsidio o tarifificar hace que aumenten tanto las frecuencias como la capacidad de los buses.

Las velocidades comerciales aumentan moderadamente cuando se suponen demoras constantes e iguales a 3 segundos, y aumentan un poco más cuando se considera que tales demoras no existen. El distanciamiento de paraderos también aumenta con el cambio de supuesto.

## 6.8. Número de sitios del paradero

En la aplicación central se asume que los paraderos están diseñados de forma óptima y que poseen tres sitios para buses. Dependiendo del tamaño de los buses esto puede significar dedicarle entre 40 y 65 metros solamente al paradero. El análisis de sensibilidad que se realiza en esta sección corresponde a suponer que se le dedican menos sitios al paradero (dos sitios y únicamente uno). Esto cambia los parámetros de las funciones de capacidad del paradero y de las demoras; además, cuando hay un sitio, la demora interna deja de existir y sólo hay demora por cola.

Los cambios que se producen en los beneficios que generan la política de vías exclusivas y las políticas tarifarias, y en las variables de diseño frecuencias y tamaño de vehículos son importantes. En la siguiente figura se compara el beneficio social que entrega dar subsidio, implementar tarifificación o ambas (bajo el nombre de políticas tarifarias) versus el del subsidio subóptimo y el de vías exclusivas, para diferentes números de sitios.

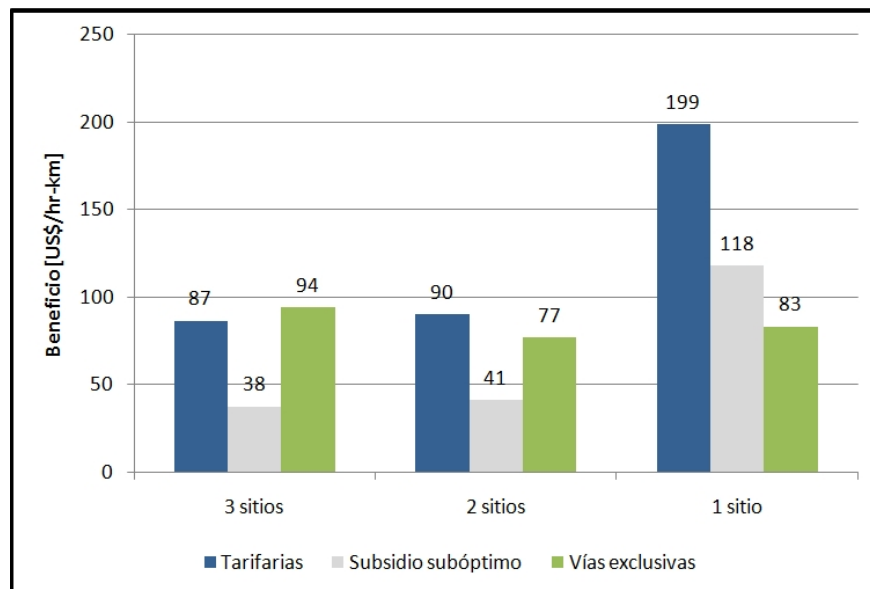


Figura 6.13: Comparación de beneficio de políticas según diseño de paraderos.



Como se puede notar si hay 2 ó 3 sitios los beneficios de las políticas no se alteran demasiado, la implementación de vías exclusivas pasa, de ser poco más beneficiosa que alguna tarifaria, a generar levemente menos beneficio que ellas. El subsidio subóptimo mantiene su condición de inferioridad.

Cuando se le dedica solamente un sitio al paradero, los cambios en los beneficios son muy importantes. La política de vías exclusivas genera un beneficio similar al que da con mayor número de sitios, pero mucho menor que el de las otras políticas. Entregar un subsidio subóptimo supera a las vías exclusivas y se muestra, por primera vez, como una política importante a considerar en cuanto a beneficio social. Por su parte, el subsidio óptimo, la tarificación y una combinación de ellas generan beneficios muy superiores al que entregan las vías exclusivas, superándola por más del doble. Esto ocurre sin necesidad de aumentar el monto del subsidio ni la tarifa del auto. En este caso las conclusiones de políticas son completamente diferentes.

Para hacer un análisis similar al anterior pero del diseño óptimo del transporte público se presenta en la siguiente figura la comparación entre las frecuencias óptimas en el escenario donde se aplica alguna política tarifaria y se implementan vías exclusivas conjuntamente. Se presentan sólo éstas porque son representativas del cambio que hay entre los tres casos de diseño de paraderos. En los otros escenarios de políticas los cambios son en el mismo sentido, pero los valores de la frecuencia y del tamaño de los buses son distintos; la variación es acorde al escenario.

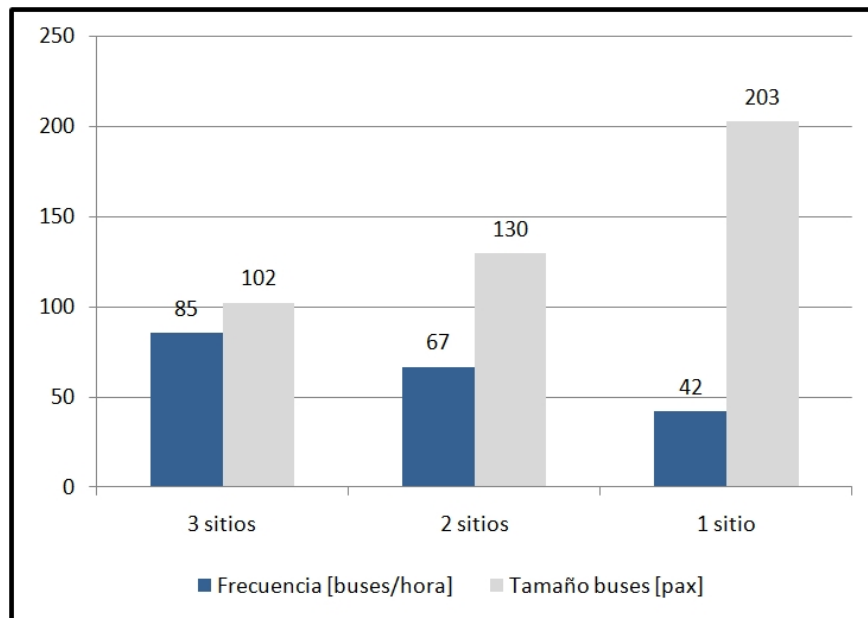


Figura 6.14: Frecuencia y tamaño de buses óptimos según diseño de paradero en escenario de mayor bienestar social.

Como se puede observar, las frecuencias y tamaño de buses cambian fuertemente si se diseña el paradero con uno, dos o tres sitios. Mientras menos sitios tenga un paradero, menor es la frecuencia

óptima y mayor el tamaño de buses. En el caso de paraderos de un sitio los buses llegan a ser de tamaños superiores a los más grandes que se observan en Chile, lo que muestra el importante efecto que tiene dedicarle poco espacio a los paraderos sobre el diseño óptimo del sistema de buses.

Con el mismo procedimiento que se hace en la sección 6.6 de restar bienestar social entre escenarios análogos para los diferentes diseños de paraderos, se puede obtener el beneficio de usar paraderos de dos y tres sitios en vez de uno de un sitio. Pasar de un diseño de paraderos de un sitio a uno de dos genera un beneficio de entre 200 y 300 US\$/hr-km dependiendo de cuál sea la situación inicial de políticas, pero de todas maneras es más de lo que genera cualquiera de las políticas de transporte que se analizan en esta tesis. Ahora, pasar de 2 a 3 sitios produce un beneficio de entre 75 y 95 US\$/hr-km que es muy similar al beneficio que entregan las políticas de subsidio, tarificación y segregación de flujo. La conveniencia de aumentar la capacidad de los paraderos para un período punta de demanda alta es muy significativa. Para ilustrar mejor este punto se presenta en la figura 6.15 la diferencia de bienestar social que produce cada una de las medidas por separado en relación al escenario base, es decir, cada columna representa cuanto se puede llegar a ganar con cada política. Esto se hace para una situación inicial de paraderos de un sitio (grupo de la izquierda) y para una situación inicial de paraderos de dos sitios (grupo de la derecha).

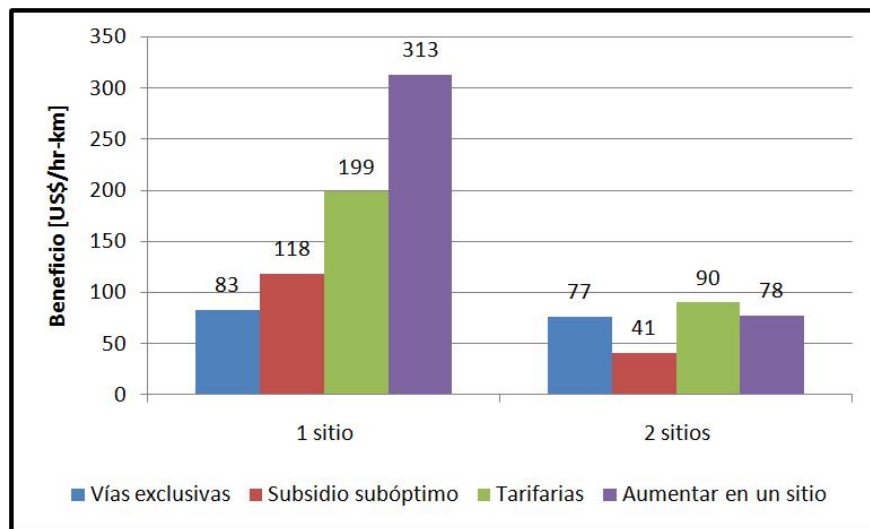


Figura 6.15: Comparación de beneficio de políticas incluyendo aumentar en un sitio los paraderos.

Se ve claramente que si la situación inicial es ausencia de subsidio y tarificación, en condiciones de flujo mixto y paraderos diseñados de un sitio, lo mejor es aumentar la capacidad del paradero en un sitio y por mucho. Ahora en caso de que se tengan paraderos de dos sitios y ausencia de políticas, aumentar a tres sitios el paradero compite seriamente con el resto de las políticas en estudio. Pasar de un sitio a tres genera la suma de los beneficios lo que potencia aún más el aumento de capacidad del paradero. Es importante recalcar que para hacer efectivo este beneficio

de aumentar el número de sitios es necesario un rediseño del sistema de buses; como se ve en la figura 6.14 junto con aumentar la capacidad del paradero con el número de sitios, hay que usar buses mucho más pequeños y frecuencias considerablemente mayores.

## 6.9. Influencia del tiempo de operación en paraderos sobre los automóviles

Como se explica en el capítulo 3, cuando se está en condiciones de flujo mixto la operación de los buses en paraderos afecta el tiempo de viaje de los vehículos livianos. Esta alteración se modela sumando al tiempo de circulación de los autos una fracción  $\epsilon$  del tiempo de operación en paraderos; esta fracción no se considera como una constante sino como una función de la frecuencia (ecuación 3.13). En este análisis de sensibilidad se cambia al supuesto que  $\epsilon$  es constante y se adoptan los siguientes valores: 0, 0,3 y 0,6. En la aplicación central esta función  $\epsilon(f)$  adopta valores entre 0,5 y 0,58 en los diferentes escenarios.

Los cambios que se producen con esta alteración son: de beneficio social que entregan las políticas, de frecuencias, del tamaño de los buses y de la velocidad comercial del automóvil. Las particiones modales, el distanciamiento de paraderos, las implicancias de las políticas, las tarifas y el monto de subsidio permanecen muy similares al caso con  $\epsilon$  como función de la frecuencia.

Debido a que mientras mayor sea el valor de  $\epsilon$ , más demora le induce a los automóviles la operación de los buses en paraderos, las velocidades comerciales del auto disminuyen con el aumento de este valor. En el caso en que se supone igual a 0,6 no hay mucha diferencia con la situación central por la similitud de los valores.

En la siguiente figura se presentan las frecuencias y tamaño de buses que son óptimos para los escenarios de políticas tarifarias. Para el escenario de subsidio subóptimo las variaciones son del mismo tipo pero un poco menores. En ausencia de políticas (escenario BASE), estas variables no presentan cambios significativos por lo que no es de gran utilidad mostrarlas.

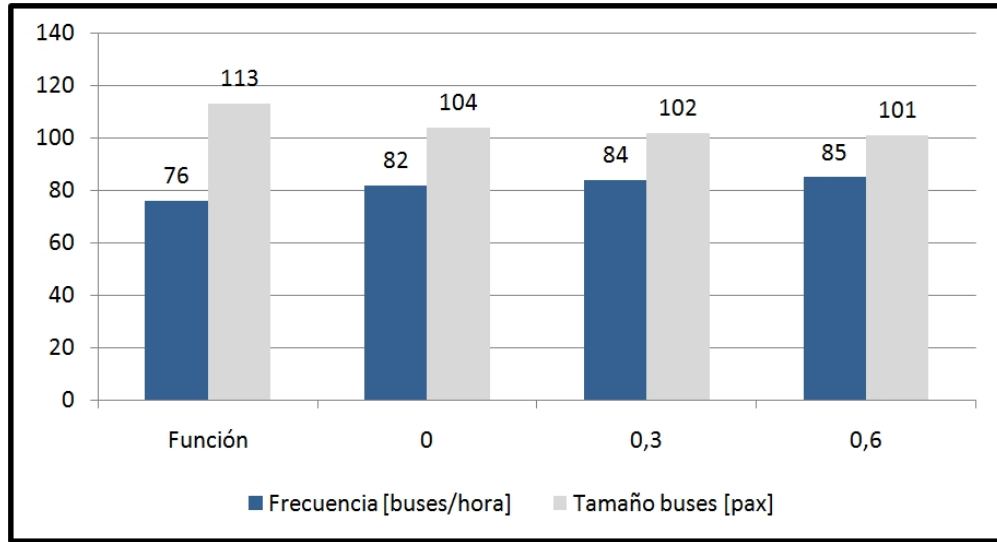


Figura 6.16: Frecuencia y tamaño de buses óptimos según supuesto sobre  $\epsilon$  en escenario de políticas tarifarias.

Hay dos cosas que vale la pena destacar de este resultado: la primera es que el efecto de asumir un valor constante hace que el diseño óptimo sea con frecuencias mayores y buses más chicos que cuando se supone como una función; el otro resultado importante es que si se asume que es constante no importa el valor que se adopte en cuanto a diseño de transporte público, es decir, si se asume igual a 0,3 o igual a 0,6 no importa demasiado en este ámbito. Por este motivo, con respecto al diseño del transporte público, importa más si el valor es constante o es igual a la función de la frecuencia especificada.

Estos cambios en la frecuencia y el tamaño de buses hacen que la flota de buses también cambie. Como al asumir un valor de  $\epsilon$  constante aumentan las frecuencias y el tiempo de viaje en bus se mantiene prácticamente igual, la flota necesariamente aumenta en los escenarios donde ocurren estos cambios, que son los de políticas tarifarias y de subsidio subóptimo.

Con respecto al beneficio de cada política de transporte, se presenta en la siguiente figura el beneficio de implementar una política tarifaria, el de dedicarle una pista exclusiva al transporte público y el de aplicar ambas a la vez.

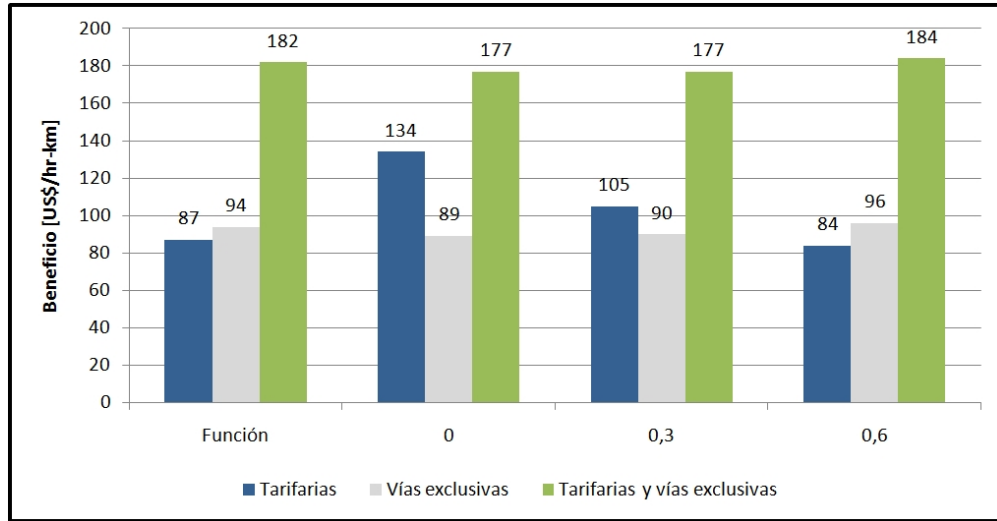


Figura 6.17: Comparación de beneficio de políticas según supuesto sobre  $\epsilon$ .

Donde sí ocurre un cambio, y grande, es en el beneficio de las políticas tarifarias. Resulta que despreciar el efecto de la operación de buses en paraderos sobre los automóviles ( $\epsilon = 0$ ) hace que se sobreestime el beneficio de entregar subsidios o tarifificar por congestión. Además, cuando se ignora este efecto, en presencia de alguna política tarifaria el beneficio de implementar vías exclusivas se ve reducido considerablemente. Mientras mayor sea el valor que se asume para este parámetro menor es el beneficio que genera cualquiera de las políticas tarifarias. Lo mismo ocurre con el beneficio de entregar el subsidio diferente al óptimo ya que este beneficio se mantiene alrededor de un 43 % del beneficio del subsidio óptimo.

De estos resultados se puede concluir que es importante modelar los efectos de congestión cruzada cuando hay tráfico mixto y que es necesario encontrar mejores formas de capturar esto ya que la función  $\epsilon(f)$  es adoptada sin calibraciones de por medio: el resultado de la evaluación de proyectos depende fuertemente de ello.

## 6.10. Distribución de la población según ingreso

La idea de este análisis de sensibilidad es ver qué pasa con las políticas de transporte en estudio cuando la población tiene una distribución según ingreso distinta. En particular se analiza un aumento en el ingreso promedio, que se transmite al modelo con una menor cantidad de personas en los estratos de ingreso bajo y medio-bajo y un aumento en la población que pertenece a los estratos socioeconómicos medio, medio-alto y alto. Esto podría representar una situación futura de crecimiento económico del país.

En las siguientes figuras se pueden comparar las distribuciones de la población para la aplicación central y para la sensibilidad.

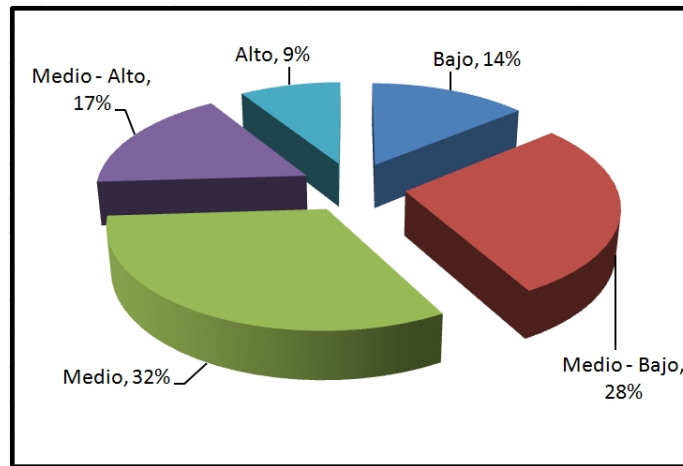


Figura 6.18: Distribución de la población según estrato socioeconómico. Aplicación central.

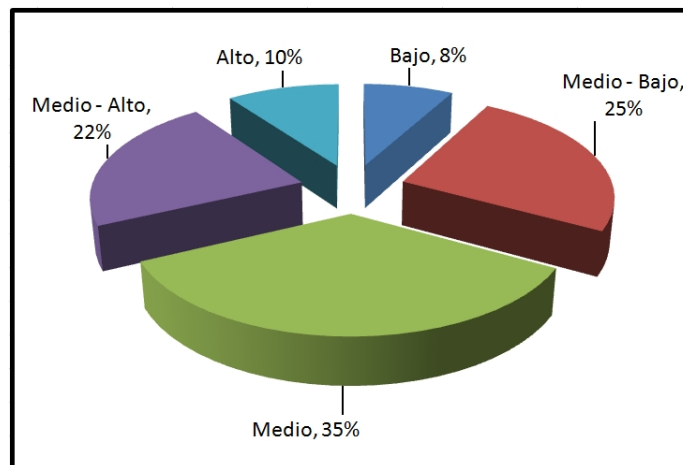


Figura 6.19: Distribución de la población según estrato socioeconómico. Sensibilidad.

El hecho de que haya más población en los estratos de ingreso medio, medio-alto y alto, y menos en los de ingreso medio-bajo y bajo implica, entre otras cosas, que frente a los mismos tiempos y tarifas, en este nuevo caso, la partición modal del auto va a ser mayor que en la aplicación central debido a la preferencia por el automóvil que presentan los diferentes estratos (representada en las constantes modales del modelo logit).

El diseño óptimo del transporte público no cambia significativamente con la variación en la distribución de la población, pero el equilibrio es diferente en cuanto a velocidades y partición

modal. A pesar de esto, la participación del auto sigue siendo minoritaria en todos los escenarios. Las velocidades comerciales del bus sólo presentan una reducción significativa en el escenario de ausencia de políticas mientras que las del auto en todos los escenarios.

Casi todo lo relativo al análisis de bienestar cambia con la distribución de la población. Para ilustrar dicha situación se presenta en la figura 6.20 la diferencia de bienestar de los escenarios de políticas con respecto al escenario en ausencia de ellas tal como ha sido usada en este y el anterior capítulo.

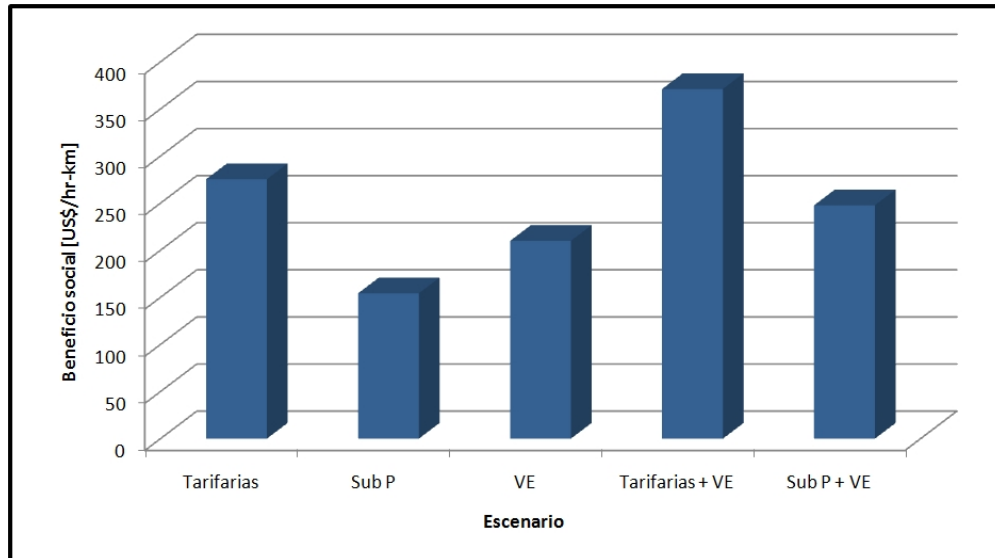


Figura 6.20: Beneficio social de políticas para variación en la distribución de la población.

El beneficio de implementar una política de subsidio, tarificación o ambas a la vez (tarifarias) genera un 31 % más de beneficio por hora por kilómetro que las vías exclusivas. En este caso el subsidio subóptimo, pero más realista, genera un beneficio considerable que alcanza un poco más de la mitad del beneficio del subsidio óptimo. La segregación de flujos en conjunto con un subsidio subóptimo no se complementan tan bien ya que el beneficio de aplicar ambas medidas es levemente superior al de las vías exclusivas por sí sola. El bienestar que se logra con la combinación de alguna medida tarifaria y la de vías exclusivas no es la suma de los bienestar que se alcanza con las medidas por separado.

Se sigue manteniendo la superioridad en cuanto a beneficio social de las vías exclusivas por sobre el subsidio de tarifas no negativas y la tarificación es esencial para lograr los mayores beneficios, considerando las dificultades del subsidio óptimo.

Otro cambio importante que ocurre con esta variación de la distribución de la población dice

relación con el excedente de los consumidores (EC) cuando se tarifica el transporte en automóvil. Los cambios ocurren en el valor total del excedente de los consumidores y en los impactos distribucionales, es decir, la variación de los excedentes de los individuos de cada estrato. En la figura siguiente se presenta la variación de dicho excedente individual para el escenario de tarificación.

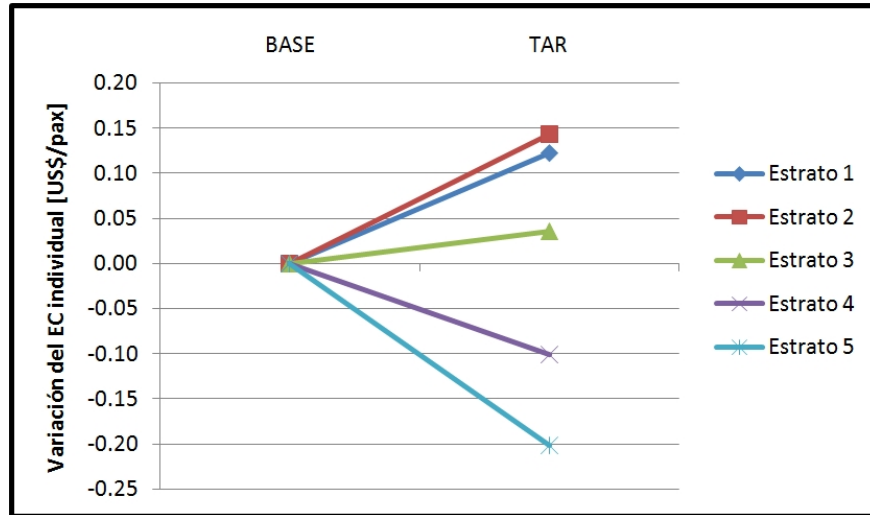


Figura 6.21: Variación del EC individual con la política de tarificación. Distribución de sensibilidad.

En la aplicación central las personas pertenecientes a los estratos 1 y 2 mantenían su excedente casi constante y el resto veía disminuido su excedente. Con esta distribución de la población ocurre algo distinto, los tres primeros estratos se ven directamente beneficiados con esta medida mientras que los dos estratos de mayor ingreso siguen viendo su excedente disminuido. Este cambio implica que el excedente total de los consumidores sea positivo, a diferencia de lo que ocurre en la aplicación central y a diferencia de lo que se encuentra en el análisis básico de tarificación vial (aislado de otros modos) donde se muestra que todos los usuarios pierden. Por este motivo se espera que esta política encuentre menor rechazo por parte de la población en caso de que la distribución sea como la de este análisis de sensibilidad. Es importante mencionar que en este caso la tarifa que se le cobra al automóvil es muy similar a la de la aplicación central y bordea los 0,1 dólares por kilómetro.

### 6.11. Extensión a dos períodos

Como se explica en detalle en la sección 3.8 existen dos casos para la extensión a dos períodos: una con diferenciación intertemporal de tarifas y otra sin. La demanda total en período punta es de 1.200 pasajeros por hora por kilómetro lo que genera una carga de 12.000 pasajeros por hora ya que el largo de viaje es de 10 kilómetros, y para período fuera de punta la demanda es de 400 pax/hr-km que genera una carga de 2.000 pasajeros por hora ya que el largo de viaje en este período es de 5 km.



Cuando se toma en consideración que existe más de un período, necesariamente deben existir cambios en el diseño óptimo del transporte público en relación al que entrega el modelo de un período. De partida, se permite que las frecuencias del período punta sean diferentes a las del período fuera de punta, y además en esta forma de modelar el problema se considera el hecho de que los buses que se utilizan en ambos períodos son los mismos por lo tanto debe haber una variación en el tamaño de la flota, lo que puede repercutir en las frecuencias y las capacidades de los buses.

El análisis más detallado se realiza para el caso en que las tarifas son las mismas en ambos períodos y luego se explica qué ocurre cuando se relaja esta restricción.

### **6.11.1. Sin diferenciación intertemporal de tarifas**

La partición modal en período punta es muy similar a la de la aplicación central, es decir, se mantienen los porcentajes y por lo tanto también se conservan los efectos sobre la partición modal de implementar cada política. La diferencia ocurre en la partición modal del período fuera de punta ya que ésta no se parece a la de la aplicación de un período con demanda baja sino que es similar a la del período punta de este análisis e incluso con un aumento en la participación del modo bus. Esta diferencia era esperable ya que el modelo de partición modal es diferente en cada período mientras que cuando se analizan menores demandas se usa el modelo de partición modal de período punta.

Como se muestra en el capítulo 3 los escenarios de políticas tarifarias dejan de ser equivalentes en esta aplicación, pero la diferencia entre los escenarios de tarificación, subsidio y la combinación de ambas, en términos de frecuencia y tamaño de buses, no es superior al 1 %, por lo tanto se presenta sólo la de uno de los tres en forma representativa y se muestran como si fueran equivalentes bajo el nombre de políticas tarifarias.

En la figura 6.22 se exhiben las frecuencias óptimas por período y el tamaño de los buses para los diferentes escenarios. Al modelar dos períodos se producen dos efectos sobre el diseño del transporte público: el primero es que, como se ve en la sección 6.2, para demandas más bajas se debe disminuir el tamaño de buses para no afectar considerablemente el tiempo de espera (resulta que también disminuyen las frecuencias); por otro lado, cuando hay dos períodos necesariamente habrá buses ociosos en el fuera de punta (considerando lo dispares que son las demandas y las cargas de ambos períodos) por lo que conviene usar buses más grandes, para poder servir la demanda con frecuencias menores y así disminuir el tamaño de flota necesaria para el período punta y entonces reducir estos costos de flota ociosa.

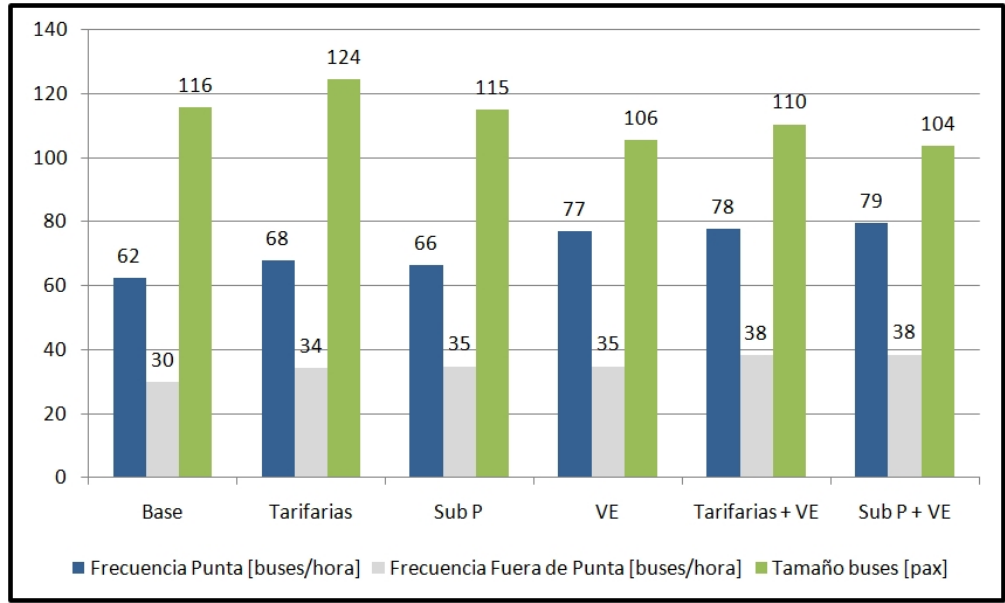


Figura 6.22: Frecuencias y tamaño de buses para modelo de dos períodos.

De una comparación de esta figura con la correspondiente a la aplicación central (figura 5.1) resulta que las frecuencias del período punta son menores y los buses son un poco más grandes que los de la aplicación central. Es decir, el segundo efecto de la modelación de dos períodos es el que prima en relación al tamaño de buses. La ocupación de los buses en período punta es 100 % y las del período fuera de punta varían entre un 35 % y un 40 % según el escenario.

El distanciamiento de los paraderos no sufre grandes variaciones con respecto a la aplicación central. Lo mismo ocurre con las velocidades comerciales en período punta que son iguales o levemente inferiores a las de la aplicación central.

Donde también hay algunas diferencias es en el beneficio social que genera cada una de las políticas en estudio. En la figura 6.23 se presenta el beneficio de cada política, cada una representada por los escenarios correspondientes. Se puede observar que el beneficio de entregar subsidio, aplicar tarificación vial e implementar ambas a la vez es bastante similar tanto en ausencia de vía exclusiva como en presencia de ella. El beneficio de implementar las vías exclusivas es mayor al de cualquier política tarifaria entre un 29 % y un 37 % dependiendo de con cuál se compare, por lo tanto, con la modelación de dos períodos sigue manteniéndose la superioridad, en cuanto a bienestar, de las vías exclusivas por sobre las políticas tarifarias e incluso la brecha aumenta. La utilidad de llevar a cabo una política que incluya una medida tarifaria y vías exclusivas al mismo tiempo es inferior a la suma de la utilidad de ambas por separado, pero el beneficio de aplicar una en presencia de la otra no es despreciable.

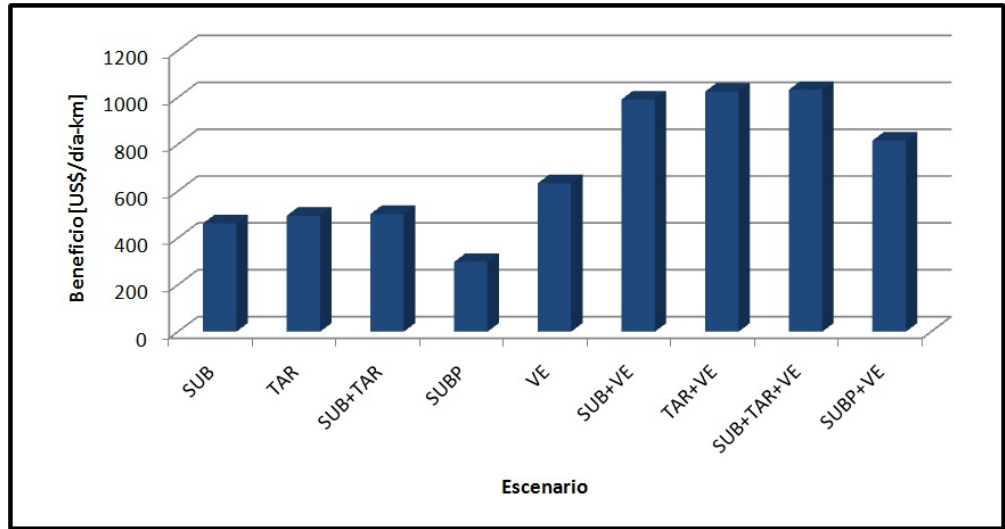


Figura 6.23: Beneficio social de políticas para modelo de dos períodos.

El análisis de beneficio para los agentes que están involucrados es el mismo que en la aplicación central. Los efectos distributivos para el período punta y para el período fuera de punta son muy similares, es decir, los estratos que se ven beneficiados y perjudicados con las políticas no cambian en relación a la aplicación central y a la aplicación con demanda baja. Lógicamente las variaciones de excedente de los usuarios de transporte del período fuera de punta son mucho menores ya que la congestión es bastante menor.

La tarifa de bus de autofinanciamiento es mayor a la de la aplicación central, ya que se incorpora el hecho de que existe un período de menor demanda pero sigue siendo bajo (US\$ 0,17) por los mismos motivos enunciados en el capítulo 5. Como se explica en la sección 6.2, el subsidio óptimo baja cuando las demandas son menores; este hecho hace que el subsidio por pasajero en la modelación de dos períodos disminuya levemente con respecto a lo observado en un modelo de un período punta. El escenario de tarificación y subsidio simultáneos es bastante más realista y posible de implementar ya que se le cobra una cantidad mínima a la gente por viajar en bus en vez de pagarle y la tarifa para el automóvil es menor que en la aplicación central (US\$ 0,07).

### 6.11.2. Diferenciación intertemporal de tarifas

La diferenciación intertemporal de tarifas genera sólo dos cambios significativos con respecto a la situación de tarifas iguales en ambos períodos.

El primer cambio ocurre en las políticas tarifarias. Éstas vuelven a ser equivalentes entre sí como se explica en el capítulo 3, y alcanzan el máximo beneficio posible; este beneficio, en tráfico mixto,

es de 502 US\$/día-km, que corresponde a un 9 % más que la política de subsidio, a un 2 % más que la tarificación y a un 3 % más que la política de tarificación y subsidio a la vez con restricción financiera cuando no hay diferenciación de tarifas. En el mejor de los casos diferenciar las tarifas en presencia de políticas tarifarias genera un 9 % más de bienestar que corresponde casi a 40 US\$/día-km. Cuando se evalúa en presencia de vías exclusivas este beneficio de diferenciar las tarifas es similar en el valor total y por ende es menor en porcentaje. Cuando existe la política de subsidio, la tarifa al bus es negativa en período punta y positiva en el período fuera de punta mostrando consistencia con lo que se observa en el análisis de sensibilidad de la sección 6.2. Cuando se tarifica y se mantiene la condición de autofinanciamiento de los buses, la tarifa al auto es mayor en el período punta que en el fuera de punta y con la tarifa del bus ocurre lo contrario.

El segundo cambio ocurre en ausencia de políticas de subsidio y tarificación, es decir, cuando se impone el autofinanciamiento del sistema de buses mediante las tarifas cobradas al bus y no hay cobro por congestión al automóvil tanto en presencia como en ausencia de vías exclusivas. En este caso ocurre que lo óptimo es cobrarle una tarifa muy alta al bus en período fuera de punta, que genere una recaudación mayor al costo de operar los buses, y el excedente entregárselo a los usuarios de bus del período punta cobrándoles una tarifa negativa. Es un subsidio cruzado entre períodos sin necesidad de que se le inyecte dinero al sistema. Si bien esto puede llegar a ocurrir, el caso más realista sería con una tarifa nula en período punta. Esta situación, en todo caso, no merece mucho análisis ya que en este modelo la demanda total de viajes de cada período es inelástica y por ende no modela bien el comportamiento de las personas frente a una diferencia tan grande de tarifas en ambos períodos. Es cosa de imaginar que ocurriría si se aplicara el óptimo del modelo y por viajar en bus en hora punta se entregara dinero (o en un caso subóptimo fuera gratis) y por viajar en hora fuera de punta se cobrara una tarifa muy elevada, probablemente los viajes en período fuera de punta disminuirían drásticamente y los del período punta aumentarían, cosa que no se incorpora en esta modelación.

## 6.12. Síntesis y comentarios

En este capítulo se realiza un análisis de sensibilidad a varios parámetros y supuestos, se logra evaluar y presentar qué es lo que sucede con el diseño óptimo de transporte público, con los beneficios e implicancias de políticas y con el equilibrio cuando hay modificaciones en los valores de algunos parámetros y cuando se hacen supuestos distintos.

Con la variación de la demanda total de viajes se puede observar que si éstas disminuyen a valores medianos y bajos, las políticas denominadas tarifarias no son de gran beneficio y las vías exclusivas se mantienen como una buena opción para mejorar el bienestar de la sociedad. Con demandas muy altas se hace más necesario implementar políticas de transporte para combatir la

congestión y hay un cambio en el diseño óptimo en relación a la demanda de referencia: la respuesta frente a una mayor demanda es a través de un aumento considerable de la capacidad de los buses y en mucho menor escala mediante un aumento de frecuencia.

Un cambio en el largo de viaje es un cambio en la carga que genera la demanda y por ende en la congestión. Si el largo de viaje disminuye ocurre algo similar en cuanto a beneficio que cuando la demanda baja: las políticas tarifarias son de muy poca utilidad y las vías exclusivas son ampliamente superiores. Con el aumento del largo de viaje se confirma que con cargas altas lo óptimo es aumentar las frecuencias, pero por sobretodo aumentar el tamaño de los buses. En relación a los beneficios de las políticas se da que las vías exclusivas aumentan su superioridad en beneficio social sobre las políticas tarifarias si la carga asciende por crecimiento del largo de viaje.

Para cargas más altas a 12.000 pasajeros por hora, tanto porque la demanda es mayor o porque aumenta el largo de viaje, ocurre que el monto de subsidio óptimo es muy elevado por lo tanto la política de tarificación juega un rol muy importante, ya que es capaz de generar el mismo beneficio por sí sola y en caso de que se apliquen en conjunto disminuye considerablemente el subsidio óptimo.

La sensibilidad relacionada con el tiempo de espera produce cambios en el diseño del transporte público donde mientras mayor importancia tenga, mayor es la frecuencia y menor el tamaño de los buses. Además hay un cambio importante en políticas ya que se ve que las políticas tarifarias pueden llegar a generar más beneficio que las vías exclusivas.

Con el tiempo marginal de subida ocurre algo similar ya que no hay grandes alteraciones salvo en el diseño del sistema de buses. Las frecuencias y el tamaño de los buses son sensibles a este parámetro: si aumenta al doble, las frecuencias suben al menos un 20% y los buses se achican al menos en ese mismo porcentaje. Las conclusiones sobre políticas no cambian, entre otras cosas, las vías exclusivas generan poco más beneficio que el subsidio y la tarificación vial. Algo relevante es que el sistema de pago que se adopte trae consigo implicancias políticas, es decir, cambiarlo puede generar grandes beneficios.

Lo mismo sucede cuando se cambia el supuesto de que las demoras en los paraderos por cola e interna son una función de la frecuencia por el supuesto de que son constantes: sólo cambia lo relacionado con el diseño del transporte público. Si las demoras se piensan constantes, las frecuencias óptimas resultan ser mucho más grandes y los buses mucho más pequeños.

Los efectos del diseño del paradero son bastante significativos en varios aspectos. Lo primero, y muy relevante por cierto, es que cambios en el diseño pueden generar grandes cambios en el bienestar social: pasar de paraderos de un sitio a paraderos de tres sitios, necesariamente acompañado de una optimización del transporte público, genera beneficios sociales muy importantes y muy superiores a cualquier otra política. Por otro lado, mientras menos espacio se le dedique al paradero, es decir, mientras menos sitios tenga, más beneficiosas se vuelven las políticas tarifarias al mismo tiempo que

el beneficio de las vías exclusivas se mantiene y por ende las primeras se vuelven superiores en este sentido. También ocurre que mientras más sitios compongan el paradero mayores son las frecuencias óptimas y menor el tamaño de los buses, si se limita el paradero a un sitio se pueden obtener buses de capacidades muy elevadas. Lo relevante en este análisis es que con mayor número de sitios aumenta la capacidad y por ende disminuyen las demoras por lo que esto se puede generalizar a la capacidad de los paraderos; este aumento de capacidad se puede lograr, en cierta medida, con otras disposiciones como paradas diferidas o disminución del tiempo de detención del bus.

Los efectos de cambiar el supuesto asociado a la fracción  $\epsilon$  son moderados para las frecuencias y tamaño de buses y variados para el beneficio social que entregan las políticas tarifarias. Ignorar el efecto de la operación de paraderos de los buses sobre el tiempo de viaje de los autos hace que el beneficio de entregar subsidio y tarifcar sea sobreestimado. Por lo mismo es muy importante estudiar más la congestión por tráfico mixto de manera de poder modelar bien los efectos que se producen.

El cambio en la distribución de las personas según ingreso que se analiza en este capítulo es bastante moderado como se puede ver de la comparación de las figuras 6.18 y 6.19. Con una distribución con menos individuos en los estratos bajos, y más cargada a los estratos medio y medio-alto hay un cambio en relación a las políticas. Las políticas llamadas tarifarias son un 30 % más beneficiosas que las vías exclusivas. Un cambio en las implicancias de tarifcar a los automóviles es que, en este caso, la mayoría de la población se ve directamente beneficiada por un aumento de su excedente del consumidor. Si se considera, además, que si se aplica tarifcación en conjunto con subsidio ésta hace que el monto que se le debe inyectar al sistema sea mucho menor, se puede afirmar que la política de tarifcación se alza como una muy buena alternativa en cuanto a beneficios sociales se refiere.

Cuando se acerca la modelación a la realidad mediante la inclusión de dos períodos ocurren cambios tanto en lo relacionado con las políticas como en el diseño óptimo del transporte público. Como se toma en cuenta que existe un período donde la demanda es más baja, se produce un efecto que, a pesar del cambio del modelo de demanda, sigue la línea de los resultados sobre los beneficios de las políticas tarifarias en presencia de demandas bajas y menor largo de viaje: las vías exclusivas aumentan su distancia en beneficio social por sobre la tarifcación, el subsidio y ambas a la vez. En esta extensión la política de implementar tarifcación y subsidiar el transporte público, es muy razonable ya que se obtiene cobrándole una cantidad muy chica a los usuarios de bus y una cantidad no muy elevada al modo auto (inferior a la tarifa por kilómetro que cobra Costanera Norte, Autopista Central, Vespucio norte y Vespucio Sur, todas en el horario más barato de cobro).

En relación al diseño óptimo del transporte público las frecuencias en período punta son menores que cuando se modela un período con la misma demanda y carga de pasajeros por hora. Lo contrario ocurre con el tamaño de los buses, ya que al incorporar dos períodos resulta que el tamaño óptimo

es mayor al que se obtiene modelando sólo un período.

La diferenciación intertemporal de tarifas, cuando tiene sentido en el modelo, genera un aumento de bienestar moderado.

Los resultados del análisis de dos períodos tienen una gran falencia detrás que los hace menos importantes: las demandas por período son inelásticas, es decir, hay una ausencia relevante de elasticidad intertemporal de la demanda.

Uno de los objetivos de esta tesis es obtener conclusiones acerca de políticas de transporte y en ningún caso es recomendar valores de variables de diseño del transporte público o de tarifas a cobrar en la práctica. Por esto tiene mucho más significado entender qué ocurre con las variables con el análisis de sensibilidad más que a cuánto cambian; todavía es más relevante ver cómo cambia el beneficio y los impactos de las políticas. Un buen ejemplo es el tiempo marginal de subida de pasajeros al bus: si éste aumenta, las frecuencias deben ser mayores y las conclusiones de políticas no cambian. Se identifica lo central, que es que el diseño del sistema de buses es sensible a este parámetro y las conclusiones de políticas no.

Por este motivo es importante el trabajo realizado en este capítulo ya que se identifica una serie de parámetros que no alteran las conclusiones acerca de políticas. También se identifica el efecto de otros elementos en las políticas y en el diseño óptimo del transporte público junto con qué ocurre cuando se consideran dos períodos en el análisis.

Por último, también en este apartado se cuantifica el beneficio de adoptar ciertas cosas que define el planificador central. Una de ellas es el sistema de pago en el bus, que se ve reflejado en el tiempo marginal de subida, y la otra es el espacio que se le asigna a un paradero, representado por el número de sitios de éste. Pasar de un sistema en el cual cada pasajero tarda 5 segundos en subir a uno en el que se tarda 2,5 segundos genera un beneficio que es comparable con el del resto de las medidas. Con respecto al número de sitios que componen los paraderos, pasar de paraderos de un sitio a paraderos de 2 sitios genera un beneficio muy alto, mayor al que produce entregar subsidio, tarifificar o segregar el flujo de autos y buses. Pasar de 2 a 3 sitios por paradero genera un beneficio menor pero de todas formas similar al de las políticas recién mencionadas. Se cuantifica la conveniencia de mejorar el sistema de pago en buses y el de dedicarle más sitios a los paraderos, lo que revela la importancia que juega en el sistema la operación en paraderos.

Este análisis de sensibilidad entrega resultados importantes que se complementan con los de la aplicación central. Con ambos en consideración, es posible sacar las conclusiones finales de la tesis.

## Capítulo 7

# Conclusiones y líneas futuras de investigación

### 7.1. Síntesis y conclusiones

En esta tesis se ha propuesto un modelo microeconómico que permite concluir acerca de políticas de transporte y entender las implicancias de implementar cada una de ellas. Las políticas en análisis son tarificación vial, subsidio al transporte público y vías exclusivas. Para poder plantear el modelo, lo primero que se hace es una revisión de la literatura relacionada con el análisis de las diferentes políticas con especial énfasis en las características de los modelos utilizados y sus principales componentes. De esta revisión se concluye que es necesario salir del análisis de mercados aislados e incorporar la interacción entre los modos de transporte; el modelo debe incluir los siguientes elementos que se identifican como fundamentales:

- Los usuarios eligen maximizando su utilidad el modo de transporte en el que realizan el viaje de acuerdo a sus preferencias y son sensibles frente a cambios en los atributos como el tiempo y las tarifas.
- La población es heterogénea, por lo tanto existen individuos con diferentes valoraciones de los atributos de los modos de transporte.
- Los operadores del sistema de transporte público se ven enfrentados a distintos tipos de gasto, los cuales dependen, entre otras cosas, del personal que sea necesario para la operación y administración, el tamaño de los buses que se utilicen y la flota que sea necesaria para transportar a la gente. Si se hace un análisis de múltiples períodos, se debe tomar en cuenta



que en la operación existen algunos en los cuales se utiliza toda la flota y otros donde una parte importante de ella está ociosa.

- En la realidad, sobre un corredor de transporte, no sólo se transporta gente de un terminal hasta el otro, sino que los orígenes y destinos de los viajes están distribuidos en el espacio.
- La congestión es un fenómeno que tiene diferentes componentes. Como los vehículos ocupan espacio en la vía, mientras más estén circulando menor es la velocidad de todos. Además, los buses no sólo circulan por la vía sino que deben transferir pasajeros, por lo tanto en las estaciones de transferencia (paraderos) hay un fenómeno de congestión entre los buses. Junto con esto la operación en los paraderos bloquea transitoriamente un sector de la vía y por ende esta operación causa demoras en el resto de los vehículos. Con la segregación de flujos sólo se mantiene la congestión entre los vehículos del mismo tipo y no hay congestión cruzada.
- Al momento de evaluar el beneficio de una política se debe elegir el diseño del sistema de transporte público de forma óptima para la política en estudio, se deben utilizar las tarifas que generan el mayor beneficio social y cuando se estudie dedicarle pistas exclusivas a los buses también debe tomarse la decisión correcta sobre la disposición de la infraestructura.

Todos estos aspectos fueron considerados en el modelo: para modelar la elección de modo se optó por utilizar versiones agregadas de los modelos logit de partición modal oficiales para la ciudad de Santiago, que incorporan heterogeneidad en el ingreso y preferencias a través de la definición de 5 estratos socioeconómicos. La componente observable de la utilidad de cada alternativa de viaje depende del costo monetario que debe incurrir el usuario más una suma ponderada de los tiempos de transporte (viaje, acceso y espera).

La función de gasto de los operadores se planteó de forma de modelar todos los gastos asociados y permitir evaluar de manera rigurosa los costos operacionales cuando se tratan múltiples períodos con distintos niveles de frecuencia y por lo tanto de flota activa. El tamaño de buses es el mismo para todos los períodos.

Se asumió en el modelo que las personas están distribuidas uniformemente sobre todo el corredor de transporte y además cada una de ellas viaja la misma cantidad de kilómetros, por lo tanto la carga (en cada período) siempre será constante y los paraderos atenderán la misma cantidad de personas. Es un modelo “steady-state”.

En el modelo se consideró que el tiempo de viaje tiene dos componentes principales: el tiempo en movimiento y el tiempo que ocasiona la operación de los paraderos. El tiempo en movimiento de los buses sigue una función de la razón flujo/capacidad de la vía. El tiempo de operación en paraderos tiene varias componentes y se modela la congestión a través de la incorporación de funciones para la demora en cola y la demora interna de los buses en los paraderos. Finalmente el tiempo de viaje

de los autos es el tiempo que depende de la razón flujo/capacidad más una fracción del tiempo que ocupan los buses en el paradero si es que se está en condiciones de flujo mixto.

Para hacer el análisis de políticas y estimar el beneficio de implementarlas, se planteó el problema de maximización del bienestar social. De resolverlo bajo varias condiciones diferentes, representadas por escenarios asociados a las políticas de transporte, se obtuvieron resultados que permitieron llevar a cabo el análisis y comparaciones relevantes para entender las implicancias de las medidas en estudio. Debido a que es un problema cuya función objetivo y restricciones son no lineales y es de varias variables, entre las cuales hay algunas continuas y otras discretas, no se puede resolver analíticamente. Por este motivo se implementó en un software de optimización para resolverlo numéricamente y poder así obtener los resultados. Este proceso implicó una tarea no menor de codificación.

Siguiendo los pasos enunciados anteriormente fue posible generar la herramienta compuesta por el modelo y su implementación computacional, que permite concluir acerca de políticas de transporte.

Del análisis del modelo resaltan dos particularidades importantes: la primera es que se produce un problema de punto fijo para la demanda debido a que ésta depende de los tiempos de viaje, que a su vez dependen de la demanda de ambos modos producto del modelamiento de la congestión. La segunda es que por la existencia de dos modos de transporte y el hecho de que la demanda total de viajes es inelástica, las políticas de tarificación, subsidio y alguna combinación de ambas (llamadas tarifarias) son completamente equivalentes en cuanto a beneficio social, diseño óptimo del transporte público, partición modal de equilibrio y los resultados como velocidad, flota necesaria, tiempos de transporte y otros; difieren solamente en los excedentes de los agentes involucrados.

Una vez planteado el modelo completo y preparada su implementación, se procede a aplicarlo, proceso que consiste en resolver el problema de optimización bajo distintas condiciones, que en su conjunto representen las combinaciones de políticas relevantes. La aplicación central se sustenta en el modelo de un período y en una estimación de todos los parámetros a partir de datos reales provenientes de diferentes estudios, principalmente de la ciudad de Santiago para tener consistencia con el modelo de partición modal. Junto con esto se hace un completo análisis de sensibilidad aplicando el modelo con variaciones en parámetros y supuestos.

Uno de los objetivos de esta tesis es obtener conclusiones acerca de políticas de transporte y en ningún caso es recomendar valores de variables de diseño del transporte público o de tarifas a cobrar en la práctica. Por esto tiene mucho más significado entender qué ocurre con las variables más que a cuánto cambian; todavía es más relevante ver cómo cambia el beneficio y los impactos de las políticas.

Del resultado de las aplicaciones se pueden sacar conclusiones relacionadas con variados aspectos. (1) La primera, es que al implementar cualquiera de las políticas en estudio, se genera un aumento de bienestar social junto con un movimiento de la partición modal hacia la mayor participación del bus.

(2) En la mayoría de los casos las vías exclusivas son la política que, por sí sola, más beneficio social genera, es decir, es más beneficiosa que las políticas tarifarias. Existen pocos casos donde son prácticamente equivalentes, por ejemplo, cuando el tiempo de espera es dos veces el intervalo teórico de tiempo entre dos buses. En presencia de congestión en la circulación, las vías exclusivas son más beneficiosas ya que logran eliminar la externalidad que generan los autos sobre los buses y lograr así ventajas comparativas del bus sobre el auto en tiempos de viaje, que aumentan la partición modal del bus y el bienestar social sin generar costo para el planificador central ni para los operadores (pese al aumento de frecuencias). El excedente de la gran mayoría de los usuarios crece salvo para aquellos de mayor ingreso que se ven perjudicados en este sentido. Esta política ve disminuido su beneficio cuando no se pueden generar las ventajas de tiempo de viaje para los usuarios de bus, lo que ocurre cuando la demora en los paraderos es muy alta. Esto puede suceder por un diseño del paradero que entrega baja capacidad (donde el número de sitios juega un rol importante) y puede ocurrir también cuando la demanda en los paraderos es muy elevada. En ausencia de congestión todos los usuarios ven aumentado su excedente ya que la disminución de capacidad para los autos no genera reducciones de tiempo (como sí lo hace fuertemente cuando las demandas son altas) y ahora las ventajas de segregar el flujo en tiempos son para ambos modos ya que se elimina la congestión cruzada.

(3) Las políticas tarifarias también generan un beneficio social de importancia, pero las implicancias de cada una de ellas difieren considerablemente. Con estas políticas es donde mayor movimiento hay de usuarios del auto hacia el transporte público y la única manera de lograr este movimiento es con importantes diferencias de tarifas de ambos modos. Esto porque el tiempo de viaje en bus siempre es mayor que el del auto producto de las condiciones de flujo mixto; para disminuir el tiempo de acceso se deben acercar los paraderos y el bus emplearía más tiempo en un tramo ya que se detiene más veces; y para reducir los tiempos de espera hay que aumentar las frecuencias pero la medida no es muy fructífera debido a la congestión vehicular. Además en la situación de ausencia de políticas, las frecuencias son relativamente altas por lo que el punto donde deja de ser beneficioso aumentar la frecuencia está relativamente cerca.

(4) El subsidio óptimo es una política que tiene como resultado entregarle dinero a la gente por viajar en bus, lo que indica que la mayor parte de este subsidio no es por cubrir costos operacionales del sistema de buses. Como se explicó anteriormente, se debe imponer una diferencia de tarifas y como el modo auto no está tarifado, la única forma es entregándole dinero a los usuarios de bus. La cantidad de dinero que se debe entregar en total es varias veces el monto del costo de operación del sistema de buses, lo que hace que el dinero que debe gastar el planificador central sea excesivo.

Todos los usuarios ven aumentado su excedente debido a mejoras en tiempos para los dos modos y que se le está entregando dinero por viajar. Esta política, si bien genera beneficios, es impracticable en la realidad.

Por estos motivos se analiza la política de subsidiar sin entregar dinero por viaje, es decir, permitir subsidiar sólo el costo de operación de los buses. Resulta óptimo, bajo esta restricción, subsidiar el 100 % del costo operacional, pero esta política se muestra muy inferior en cuanto a beneficio (cerca del 40 % del beneficio de cualquiera de las tarifarias) y no genera grandes cambios en los tiempos de viaje y por ende tampoco grandes cambios en la partición modal. Esto muestra que entregar subsidios a la operación genera beneficio social, pero los beneficios no son tan altos como los de las políticas tarifarias óptimas. Lo que sí hace es aumentar las frecuencias a los mismos niveles que el resto de las políticas en flujo mixto.

(5) El análisis muestra la importancia de la política de tarificación vial. Sin ella no es factible aprovechar todo el potencial de las políticas tarifarias. La tarificación vial por sí sola, es una política que disminuye el excedente total de los consumidores afectando más severamente a los estratos de ingreso alto y generando un beneficio prácticamente despreciable sobre los usuarios pertenecientes a los estratos de ingreso bajo. En este caso la tarificación no es regresiva, a diferencia de lo que se obtiene cuando se ve aisladamente el problema, es decir, no son los individuos de menor ingreso los que se ven más perjudicados. La tarifa que permite generar esta diferencia que mueve a los usuarios de un modo a otro depende de varios factores y, en general, no es mayor que \$55 por kilómetro. Por estas razones, el ente que recibe la recaudación es el que se ve beneficiado y se lleva el aumento de bienestar social. Otro punto interesante de la tarificación, es que si se hace en conjunto con los subsidios, los disminuye considerablemente ya que la diferencia que es necesaria producir se puede hacer, en parte, a través de cobro a los autos.

(6) Del análisis de sensibilidad hecho en esta tesis resulta que existen políticas que generan beneficios comparables con los de las vías exclusivas y las políticas tarifarias, e incluso en algunos casos pueden ser superiores, en una situación de congestión (12.000 pasajeros por hora entre ambos modos). El cambio desde un ineficiente pago en el bus al conductor, a un sistema automático con tarjeta tiene el potencial de generar un beneficio similar al resto de las políticas. Por otro lado, aumentar la capacidad de los paraderos pasando de un sitio a dos o tres, genera un beneficio social muchísimo mayor al de tarificar, subsidiar o implementar vías exclusivas. Ambas medidas requieren un rediseño del transporte público, especialmente un cambio importante en frecuencias y tamaños de buses. Junto con esto se observa que el diseño del transporte público es sensible a varios parámetros.

(7) Finalmente se concluye que existe una complementariedad de las políticas de transporte analizadas: tarificación vial, entrega de subsidios, implementación de vías exclusivas, diseño de paraderos con 3 sitios y forma de pago del bus con tarjeta. Lo central es que en la enorme mayoría

de los casos, las políticas no son sustitutos sino que complementos: el mayor bienestar social se obtiene con la combinación de todas las medidas. Por estos motivos lo más conveniente es adoptar una política que integre todas las medidas posibles.

## 7.2. Líneas futuras de investigación

Las líneas futuras de investigación tienen relación con levantar supuestos simplificadorios que se hacen en este modelo. Uno de ellos es que la demanda está distribuida uniformemente sobre el corredor, por lo tanto, estudiar efectos del desbalance espacial de la demanda acercaría el modelo a la realidad. Para esto no es necesario estudiar todos los casos de desbalance sino que se pueden fijar casos representativos y hacer el mismo análisis de políticas. Un buen punto de referencia es lo ilustrado en este sentido por Fernández et al. (2005).

Otro punto importante es incorporar efectos de red al modelo para lo cual es necesario, al menos, considerar dos ejes que se intersectan y en este caso la distribución de los orígenes y destinos no puede ser únicamente sobre el corredor. Se debe incorporar la estructura de rutas como variable de decisión del planificador central y no se pueden ignorar los efectos de transbordos.

La incorporación de un “outside option” generaría conclusiones más sólidas sobre políticas ya que se podrían diferenciar el subsidio y la tarificación por congestión, y se levantaría el supuesto de que todos los individuos realizan el viaje de todas maneras. La inclusión de la caminata, la bicicleta o el simple hecho de no viajar aportaría en este sentido.

En la realidad de los países donde se aplica tarificación vial, no se lleva a cabo una tarificación de primer mejor en el sentido de que no se puede cobrar una tarifa por kilómetro en todos los arcos. Por estos motivos adquiere importancia estudiar una tarificación de segundo mejor, ya sea por tramos, por cordón o mediante otro sistema. Si se complementa con redes simples se puede analizar cobrar sólo en algunos arcos de la red.

La demanda por viajes es diferente en los distintos períodos del día, por lo tanto un análisis de más de un período es un acercamiento a lo que ocurre en la práctica. Para poder hacer este análisis completo es necesario que exista elasticidad de la demanda intertemporal por lo que se debe modelar de alguna manera la decisión de los individuos sobre en cuál período viajan.

Un análisis importante que se puede realizar es qué ocurre cuando el modelo de partición modal es diferente o cuando la partición modal observada es distinta. Esto permitiría entender cuán relacionadas están las conclusiones con los modelos logit agregados particulares de Santiago.

Finalmente se puede incluir en la modelación un sistema de paradas diferidas que puede aumen-

tar la capacidad de los paraderos, reducir las demoras y probablemente aumentar los tiempos de espera. Este sistema requiere de un cuidado especial ya que en vías exclusivas de una pista no tiene sentido y en flujo mixto con congestión no son muy efectivas. Por estos motivos se debe modelar de mejor manera el caso de dedicación de dos pistas a las vías exclusivas ya que el potencial de ellas está siendo subestimado.

# Referencias Bibliográficas

- [1] Basso, L. Gschwender, A. Guevara, C.A. Fuster, M. (2010) Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: efficient and practical solutions to congestion. Working paper.
- [2] Chang, S. K. y Schonfeld, P. M. (1991) Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research* 25B. 453-478.
- [3] Downs, A. (1962) The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quarterly*, 16, 393-409.
- [4] Evans, A. W. y Morrison, A. D. (1997) Incorporating accident risk and disruption in economic models of public transport. *Journal of Transport Economics and Policy* 31. 117-146.
- [5] Fernández, J.E. de Cea, J. de Grange, L. (2005) Production costs, congestion, scope and scale economies in urban bus transportation corridors. *Transportation Research Part A* 39. 383-403.
- [6] Fernández R. y Planzer R. (2002). On the capacity of bus transit systems. *Transport Reviews*, 22(3), 267-293.
- [7] Fernández R. y Tyler N. (2005). Effect of Passenger-Bus-Traffic Interactions on Bus Stops Operations. *Transportation Planning and Technology*, 28(4), 273-292.
- [8] Fernández R., Del Campo M., Swett C. (2008) Recolección de Datos y Calibración de Modelos de Tiempo de Servicio de Pasajeros en Buses y Metro de Santiago. *Actas del XV Congreso Panamericano de Tránsito y Transporte*.
- [9] Fernández R., Valenzuela E., Gálvez T. (2000). Incorporación de la capacidad y rendimiento de paraderos en el programa TRANSYT. *Actas del XI Congreso Panamericano de Tránsito y Transporte*, 221-233.
- [10] Fuster, M. (2008) *Tarificación Óptima y Vías Exclusivas en Sistemas de Transporte de Flujo Mixto*, Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.

- [11] Gibson, J., Fernández, R. y Albert, A. (1997) Operación de paraderos formales en Santiago. Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago, 11-14 Noviembre 1997, 397-408.
- [12] Huang, H-J. (2000) Fares and Tolls in a Competitive System with Transit and Highway: the case with two groups of commuters. *Transportation Research Part E* 36. 267-284.
- [13] Jansson, J.O. (1980) A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy* 14. 53-80.
- [14] Jansson, J.O. (1984) *Transport System Optimization and Pricing*. Wiley.
- [15] Jara-Díaz, S.R. (2007) *Transport Economic Theory*. Elsevier.
- [16] Jara-Díaz, S.R. y Gschwender, A. (2003a) Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews* 23. 453-469.
- [17] Jara-Díaz, S. R. y A.Gschwender (2003b). From the Single Line Model to the Spatial Structure of Transit Services: Corridors o Direct? *Journal of Transport Economics and Policy* 37(2), 261-277.
- [18] Jara-Díaz, S. R. y A. Gschwender (2009). The Effect of Financial Constraints on the Optimal Design of Public Transport Services. *Transportation* 36 (1), 65-75.
- [19] Keeler, T.E., Small, K.A. (1977) Optimal Peak Load Pricing, Investment and Service Levels on Urban Expressways. *Journal of Political Economy* 85. 1-26.
- [20] Kocur, G. and Hendrickson, C. (1982) Design of local bus service with demand equilibration. *Transportation Science* 16. 149-170.
- [21] Kraus, M. (1991) Discomfort externalities and marginal cost transit fares. *Journal of Urban Economics* 29. 249-259.
- [22] Larsen, O. (2009) An exercise in numerical optimization of urban transport policy in small equilibrium models. Working paper.
- [23] Marshall A. 1920. *Principles of Economics* Macmillan: London.
- [24] Mogridge. M. (1997) The self-defeated nature of urban road capacity policy. *Transport Policy*, Vol. 4, No. I, pp. 5-23.
- [25] Mohring. H. (1972) Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation. *American Economic Review* 62. 591-604.
- [26] Mohring. H. (1976) *Transportation Economics*. Cambridge, MA: Ballinger.



- [27] Mohring. H. (1979) The Benefits of Reserved Bus Lanes, Mass Transit Subsidies, and Marginal Cost Pricing in Alleviating Traffic Congestion. *Current Issues in Urban Economics*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore. 165-195.
- [28] MTT (1998), Estudio de Demanda del Sistema de Transporte Público de Superficie de Santiago 1997, Informe Final. Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Chile.
- [29] MTT (2004) “Actualización de las Programaciones de Semáforos como Parte del PTUS en el Marco de Transantiago, II Etapa”, Orden de Trabajo N°8-Factor de Equivalencia de Buses Articulados. Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Chile.
- [30] Oldfield, R. H. y Bly, P.H. (1988) An analytic investigation of optimal bus size. *Transportation Research* 22B. 319-337.
- [31] Ortega, M. (2008) Efectos de la Omisión del Costo de los Usuarios en el Diseño de Servicios de Transporte Público Urbano, Tesis de magíster, Departamento de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile.
- [32] Parry, I. y Small, K.A. (2009) Should Urban Transit be Reduced? *The American Economic Review* 99 (3), 700-724.
- [33] SECTRA (1988) “Manual de Diseño y Evaluación social de proyectos de Vialidad Urbana”. Estudio de la Secretaría de Planificación de Transporte, Chile.
- [34] SECTRA (2003a). Actualización de Encuestas Origen Destino de Viajes, V Etapa, Encuesta Origen-Destino de Viajes 2001 de Santiago. Estudio de la Secretaría de Planificación de Transporte, Chile.
- [35] SECTRA (2003b) Análisis modernización de Transporte Público, VI Etapa. Estructura de costos Transporte Público. Estudio de la Secretaria de Planificación de Transporte, Chile.
- [36] SECTRA (2005) Análisis y Actualización del Modelo Etraus. Estudio de la Secretaria de Planificación de Transporte, Chile.
- [37] Small. K.A. (1983) Bus Priority and Congestion Pricing on Urban Expressways. In *Research in Transportation Economics*. Keeler. T. Ed. JAI.
- [38] Small. K.A. y Rosen. H. (1981) Applied welfare economics with discrete choice models. *Econometrica*, Vol 49, N°1. 105-130.
- [39] Small. K.A. y Verhoef. ET. (2007) *The Economics of Urban Transportation*. London. Routledge.
- [40] Thomson, J. M. (1977) *Great Cities and their Traffic*. Gollanez, London.

- [41] TRB (1985) Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Special Report 209, National Research Council, Washington DC.
- [42] Tsekeris. T. y Voß. S. (2008) Design and Evaluation of Road Pricing: state-of-the-art and methodological advances. Netnomics.
- [43] Viton. P.. (1983) Pareto Optimal Urban Transportation Equilibria. In Research in Transportation Economics. Keeler. T. Ed. JAI.
- [44] Verhoef. ET. and Small. KA. (2004) Product Differentiation on Roads: Constrained Congestion Pricing with Heterogeneous Users. Journal of Transport Economics and Policy 38. 127-156.
- [45] York, I.O. (1993) Factors affecting bus-stop times. Transport Research Laboratory, Project Report 2, Crowthorne.

## Apéndice A

# Caracterización de los estratos

Tabla A.1: Rango de ingreso e ingreso medio de cada estrato

<b>Estrato</b>	<b>Rango de ingreso del hogar [\$(*)</b>	<b>Ingreso medio del hogar [\$(*)</b>
Bajo	0 - 148.226	96.192
Medio - Bajo	148.226 - 296.452	213.005
Medio	296.452 - 592.904	406.541
Medio - Alto	592.904 - 1.185.808	807.667
Alto	1.185.808 ó más	2.112.192

Fuente: SECTRA (2005)

(\*) Pesos del año 2001

Tabla A.2: Valores del tiempo por estrato y modo. Período punta.

<b>Estrato</b>	<b>VST [\$/hr] Modo bus</b>	<b>VST [\$/hr] Modo auto</b>
Bajo	279	162
Medio - Bajo	446	259
Medio	507	295
Medio - Alto	656	381
Alto	1.116	648

Tabla A.3: Valores del tiempo por estrato y modo. Período fuera de punta.

<b>Estrato</b>	<b>VST [\$/hr] Modo bus</b>	<b>VST [\$/hr] Modo auto</b>
Bajo	423	400
Medio - Bajo	423	400
Medio	634	600
Medio - Alto	807	764
Alto	807	764

## Apéndice B

# Comparación de funciones tipo BPR y raíz

En la siguiente figura se muestra cómo varía la velocidad según el flujo considerando una velocidad de flujo libre de 60 km/hr. La función raíz es la que se usa en las aplicaciones de la tesis (con los parámetros descritos en el capítulo 4), mientras que las funciones tipo BPR son las calibradas para la ciudad de Santiago en el estudio SECTRA(2005). También se grafica una función lineal a modo de referencia.

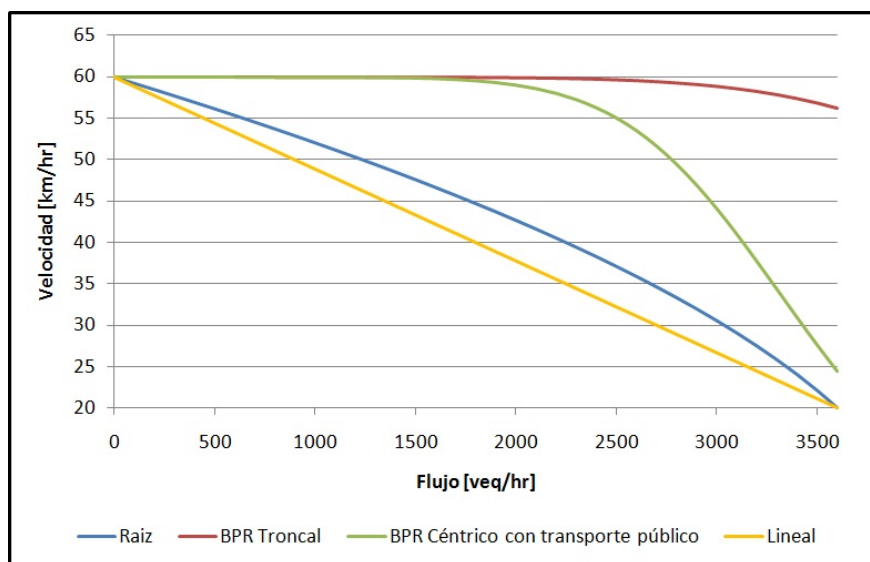


Figura B.1: Comparación de velocidades para funciones tipo BRP y raíz.

Para las funciones tipo BPR en el rango de flujo entre 0 y 2000 vehículos equivalentes por

hora la velocidad prácticamente no presenta variaciones. La calibración para un arco troncal (por ejemplo, la Alameda) estima que la velocidad disminuye de 60 km/hr a 56 km/hr cuando el grado de saturación es 100 %. Por otro lado la función lineal es muy severa para flujos bajos.

## Apéndice C

# Condiciones de primer orden para las tarifas

La función objetivo es la siguiente:

$$BS = EC + \pi = \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \ln[\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)] \right) + E + Y_b \cdot P_b + Y_a \cdot P_a \cdot \frac{l}{a} - G \quad (C.1)$$

Donde G representa los costos operacionales del sistema de buses y es una función de la frecuencia, distanciamiento de paraderos y de las demandas. Por lo tanto su derivada con respecto a  $P_a$  y con respecto a  $P_b$  es cero.

Como se quiere obtener la condición de primer orden para  $P_a$  y  $P_b$  sólo se muestran en el lagrangeano las restricciones que involucran dichas variables, que son las dos siguientes:

$$Y_a = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_a^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (C.2)$$

$$Y_b = \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_b^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \quad (C.3)$$

Con esto, el lagrangeano (sin las restricciones sobre el resto de las variables) es el que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
L &= \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \ln[\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)] \right) + E + Y_b \cdot P_b + Y_a \cdot P_a \cdot \frac{l}{a} - G \\
&+ \lambda_{ya} \cdot \left( Y_a - \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_a^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \right) \\
&+ \lambda_{yb} \cdot \left( Y_b - \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \frac{\exp(U_b^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \right)
\end{aligned} \tag{C.4}$$

Derivando con respecto a  $P_a$  se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial P_a} &= \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \frac{1}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} \cdot \exp(U_a^i) \cdot \frac{\partial U_a^i}{\partial P_a} \right) + Y_a \cdot \frac{l}{a} \\
&- \lambda_{ya} \cdot \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \left[ \frac{\exp(U_a^i) \cdot \frac{\partial U_a^i}{\partial P_a} \cdot (\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)) - \exp(U_a^i) \cdot \left( \exp(U_a^i) \cdot \frac{\partial U_a^i}{\partial P_a} \right)}{(\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i))^2} \right]
\end{aligned} \tag{C.5}$$

Pero

$$\frac{\partial U_a^i}{\partial P_a} = -\lambda_i \cdot \frac{l}{a} \tag{C.6}$$

Además usando las siguientes definiciones:

$$\frac{\exp(U_a^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} = \Gamma_a^i \tag{C.7}$$

$$\frac{\exp(U_b^i)}{\exp(U_a^i) + \exp(U_b^i)} = \Gamma_b^i \tag{C.8}$$

Se puede reescribir la derivada del lagrangeano de la forma:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial P_a} &= \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \Gamma_a^i \cdot (-\lambda_i) \cdot \frac{l}{a} \right) + Y_a \cdot \frac{l}{a} \\
&+ \lambda_{ya} \cdot \left( - \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \left[ \Gamma_a^i \cdot (-\lambda_i) \cdot \frac{l}{a} - \Gamma_a^i \cdot \Gamma_a^i \cdot (-\lambda_i) \cdot \frac{l}{a} \right] \right)
\end{aligned} \tag{C.9}$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_a} = -\frac{l}{a} \cdot \sum_i (Y^i \cdot \Gamma_a^i) + Y_a \cdot \frac{l}{a} + \lambda_{ya} \cdot \left( \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \Gamma_a^i \cdot \lambda_i \cdot \frac{l}{a} \cdot [1 - \Gamma_a^i] \right) \tag{C.10}$$



Usando la ecuación C.2 se pueden cancelar los dos primeros términos y de las definiciones de  $\Gamma$  se puede ver que  $1 - \Gamma_a^i = \Gamma_b^i$  por lo que finalmente la condición de primer orden queda de la siguiente manera:

$$\frac{l}{a} \cdot \lambda_{ya} \cdot \left( \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \Gamma_a^i \cdot \Gamma_b^i \cdot \lambda_i \right) = 0 \quad (\text{C.11})$$

Ahora, para obtener la condición de primer orden para  $P_b$  se debe hacer el mismo procedimiento. Lo que cambia es la derivada de la utilidad del modo bus con respecto a la tarifa. La derivada es la siguiente:

$$\frac{\partial U_a^i}{\partial P_a} = -\lambda_i \quad (\text{C.12})$$

Así, la derivada del lagrangeano con respecto a la tarifa del bus es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_b} &= \sum_i \left( \frac{Y^i}{\lambda_i} \cdot \Gamma_b^i \cdot (-\lambda_i) \right) + Y_b \\ &\quad + \lambda_{yb} \cdot \left( - \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot [\Gamma_b^i \cdot (-\lambda_i) - \Gamma_b^i \cdot \Gamma_b^i \cdot (-\lambda_i)] \right) \end{aligned} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_b} = \sum_i (Y^i \cdot \Gamma_b^i) + Y_b + \lambda_{yb} \cdot \left( \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \Gamma_b^i \cdot \lambda_i \cdot [1 - \Gamma_b^i] \right) \quad (\text{C.14})$$

Usando la ecuación C.3 y la relación entre  $\Gamma_a^i$  y  $\Gamma_b^i$  se obtiene que la condición de primer orden para  $P_b$  es:

$$\lambda_{yb} \cdot \left( \sum_{i=1}^5 Y^i \cdot \Gamma_a^i \cdot \Gamma_b^i \cdot \lambda_i \right) = 0 \quad (\text{C.15})$$

Comparando C.11 y C.15 se puede observar que claramente las condiciones de primer orden son linealmente dependientes. Si además se considera que en las otras condiciones de primer orden sólo aparecen las tarifas cuando se derivan las utilidades, se puede ver que las tarifas aparecen en las otras condiciones de primer orden a través de  $\Gamma_a^i$  y  $\Gamma_b^i$ . Estos dos términos se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$\Gamma_a^i = \frac{1}{1 + \exp(U_b^i - U_a^i)} \quad (\text{C.16})$$

$$\Gamma_b^i = \frac{1}{\exp(U_a^i - U_b^i) + 1} \quad (\text{C.17})$$

De donde se puede deducir que son funciones de  $f$ ,  $p$ ,  $Y_a$ ,  $Y_b$  y  $(P_a \cdot \frac{l}{a} - P_b)$ . Como todas las condiciones de primer orden quedan en función de  $(P_a \cdot \frac{l}{a} - P_b)$  entregarán una relación para  $P_a$  y  $P_b$  que definirá el conjunto de ellas que es óptimo y no un  $P_a$  y  $P_b$  óptimo. Agregando una restricción adicional existe sólo una tarifa de bus y cobro al automóvil que son óptimos.

## Apéndice D

# Códigos

## Códigos Escenarios Flujo Mixto

```
Clear["Global`*"]
```

### Parámetros

#### Costo Operación Buses

```
CC0 = 114.621 / 16;  
CC1 = 0.4766 / 16;  
CV0 = 0.1317;  
CV1 = 0.0033;
```

#### Parámetros Generales

```
a = 1.5; (* Tasa de ocupación de los autos *)  
L = 10; (* Distancia de viaje de los pasajeros [km] *)  
Vcam = 3.6; (* Velocidad de caminata [km/hr] *)  
Dolar = 550.64; (* Valor dolar 31 Agosto 2009 *)
```

#### Capacidad

```
np = 3; (* numero de pistas *)  
ve = 0.6; (* % verde efectivo *)  
Q = 2000 * np * ve; (* Capacidad de la vía *)
```

#### Tiempos

```
tp = 15 / 3600; (* Tiempo que pierde un vehículo por detenerse en un paradero *)  
tsb = 2.5 / 3600; (* Tiempo que demora un pasajero en subir al vehículo *)
```

#### Costo auto

```
coa = 0.3566; (* Constante de costo de operación de un auto por km. [US$ 2009] *)
```

#### Distribución de la Población

```
(* 5 Estratos *)  
Distr = {0.14, 0.28, 0.32, 0.17, 0.09};
```

#### Demanda

```
Ytot = 1200; (* Demanda total [pax/hr-km] *)  
Y = Table[Distr[[i]] * Ytot, {i, 1, 5}];
```

#### Partición Modal MNL

```
theta = {1.28706, 0.48159, 1.0905, 1.531, 2.3653};  
thetaG = -0.648; (* [hr] *)  
thetaGb = -1.116; (* [hr] *)  
thetaCosto = {-1.6891, -1.0557, -0.929, -0.71786, -0.42227};  
(* Theta costo por estrato [US$2009] *)
```

## Funciones

```

K[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\frac{YB \times L}{f}$ ;
(* Capacidad de un vehículo de transporte público *)
QP[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
   $\left( 2.6582 * \frac{YB}{f * p} - 88.899 \right) * \text{Log} \left[ \frac{YB}{f * p} \right] + \left( -7.6714 * \frac{YB}{f * p} \right) + 317.43$ ; (* capacidad paradero *)
de[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\left( \left( 0.060447 + 1.3824 * \frac{f}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right) * \frac{YB}{f * p} + \left( 0.20961 + 0.38217 * \frac{f}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right) * \frac{YB}{f * p} - 0.013926 * \left( \frac{YB}{f * p} \right)^2 \right) / 3600$ ; (* Demora Interna*)
dq[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\left( \left( 0.34807 + 0.0081985 * \left( \frac{YB}{f * p} \right)^2 \right) * \text{Exp} \left[ \frac{f * \left( 6.2213 - 0.11353 * \frac{YB}{f * p} \right)}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right] \right) / 3600$ ; (* Demora por Cola*)
b[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := 0.0114 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + 1.15;
(* Autos equivalentes de un bus *)
e[f_] := 1 - 1 / (1.01^f);
ta[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
   $1 / \sqrt{\text{Max} \left[ 3600 - 3200 * \frac{(L * YA / a) + b[f, p, Pa, Pb, YA, YB] * f}{Q}, 1 \right] + e[f] * (YB * tsb / f + (tp + de[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + dq[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * p)}$ ;
tb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
   $1 / \sqrt{\text{Max} \left[ 3600 - 3200 * \frac{(L * YA / a) + b[f, p, Pa, Pb, YA, YB] * f}{Q}, 1 \right] + (YB * tsb / f + (tp + de[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + dq[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * p)}$ ;
tva[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := ta[f, p, Pa, Pb, YA, YB] * L;
tvb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := tb[f, p, Pa, Pb, YA, YB] * L;
tea = 0;
taa = 0;
teb[f_] := 1 / (2 * f);
tab[p_] := 1 / (2 * p * Vcam);
TGa[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := tva[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + 1.93 * tea + 3.63 * taa;

```

```

TGb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := tvb[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + 1.93 * teb[f] + 3.63 * tab[p];
ca[Pa_] := (L * (Pa + coa)) / a;
cb[Pb_] := Pb;
Ua[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
  Table[θ0a[[i]] + θTGa * TGa[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + θcosto[[i]] * ca[Pa], {i, 1, 5}];
Ub[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
  Table[θTGb * TGb[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + θcosto[[i]] * cb[Pb], {i, 1, 5}];
Pra[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := Table[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] /
  (Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]]), {i, 1, 5}];
Prb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := Table[Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] /
  (Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]]), {i, 1, 5}];

CostF[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
  (CC0 + CC1 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * f * tb[f, p, Pa, Pb, YA, YB] +
  (CV0 + CV1 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * f;
CS[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := Sum[Y[[i]] / (-θcosto[[i]]) *
  Log[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]]], {i, 1, 5}];
CSE[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := Table[Y[[i]] / (-θcosto[[i]]) *
  Log[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB][[i]]]], {i, 1, 5}];
SW[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := CS[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + Pb * YB -
  CostF[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + Pa * YA * L / a;

```

## Escenario ÓÖÛÒ: (Sin Tarifacion vial, sin subsidio)

```

(* Escenario SIN TARIFICACION VIAL SIN SUBSIDIO *)
tiempol = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = 0; Pb = .; YA = .; YB = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)],
  1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] && 0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) &&
  0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 && Pb * (Ytot - YA) ≥ CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, {Pb, 0, 1}, {YA, 300, 580}}]
f1 = f /. Last[%];
p1 = p /. Last[%];
Pb1 = Pb /. Last[%];
YA1 = YA /. Last[%];
YB1 = Ytot - YA1;
Pa1 = 0;
Error1 = Abs[YA1 - Sum[Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB1 - Sum[Prb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempol = (AbsoluteTime[] - tiempol) / 60

```

## Escenario ÚWÓ: (Sin Tarificacion vial con subsidio)

```

tiempo2a = AbsoluteTime[];
f =.; p =.; Pa = 0; Pb =.; YA =.; YB =.;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pb, {YA, 300, 580}}]
f2a = f /. Last[%];
p2a = p /. Last[%];
Pb2a = Pb /. Last[%];
YA2a = YA /. Last[%];
YB2a = (Ytot - YA2a);
Pa2a = 0;
Error2a = Abs[YA2a - Sum[Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2a - Sum[Prb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2a = (AbsoluteTime[] - tiempo2a) / 60

```

## Escenario VOË: (Tarificacion vial, sin subsidio (autofinanciamiento buses))

```

tiempo2b = AbsoluteTime[];
f =.; p =.; Pa =.; Pb =.; YA =.; YB =.;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)],
  1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] && 0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) &&
  0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 && Pb * (Ytot - YA) == CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pa, {Pb, 0, 1}, {YA, 300, 580}}]
f2b = f /. Last[%];
p2b = p /. Last[%];
Pa2b = Pa /. Last[%];
Pb2b = Pb /. Last[%];
YA2b = YA /. Last[%];
YB2b = (Ytot - YA2b);
Error2b = Abs[YA2b - Sum[Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2b - Sum[Prb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2b = (AbsoluteTime[] - tiempo2b) / 60

```

## Escenario ÚWÓÁ/ŒÛ: (Bus cubre costos y tarificación vial)

```

tiempo2c = AbsoluteTime[];
f =.; p =.; Pa =.; Pb =.; YA =.; YB =.;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 &&
  Pb * (Ytot - YA) + Pa * YA * L / a == CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pa, Pb, {YA, 300, 580}}]
f2c = f /. Last[%];
p2c = p /. Last[%];
Pa2c = Pa /. Last[%%];
Pb2c = Pb /. Last[%%];
YA2c = YA /. Last[%%];
YB2c = (Ytot - YA2c);
Error2c = Abs[YA2c - Sum[Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2c - Sum[Prb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2c = (AbsoluteTime[] - tiempo2c) / 60

```

## Escenario ÚWÓÚ: (Sin tarificación vial, tarifa bus no negativa)

```

tiempo3 = AbsoluteTime[];
f =.; p =.; Pa = 0; Pb =.; YA =.; YB =.;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)], 1 ≤ f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 ≤ p ≤ 5 && 0 ≤ YA ≤ (Ytot - 1) && Pb ≥ 0 && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pb, {YA, 300, 580}}]
f3 = f /. Last[%];
p3 = p /. Last[%];
Pb3 = Pb /. Last[%%];
YA3 = YA /. Last[%%];
YB3 = (Ytot - YA3);
Pa3 = 0;
Error3 = Abs[YA3 - Sum[Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB3 - Sum[Prb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo3 = (AbsoluteTime[] - tiempo3) / 60

```



## Tabla Resultados

```

results = {
  {"", "Escenario 1", "", "Escenario 2a",
   "", "Escenario 2b", "", "Escenario 2c", "", "Escenario 3"},
  {"Social Welfare", SW[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   SW[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", SW[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", SW[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", SW[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Frecuencia Buses PUNTA por hora", f1, "", f2a, "", f2b, "", f2c, "", f3},
  {"Paraderos por km", p1, "", p2a, "", p2b, "", p2c, "", p3},
  {"Tamaño buses", K[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   K[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", K[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", K[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", K[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Tamaño flota (buses por hora por km)", f1 * tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   f2a * tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", f2b * tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", f2c * tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", f3 * tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Demanda Auto", YA1, "", YA2a, "", YA2b, "", YA2c, "", YA3},
  {"Demanda Bus", YB1, "", YB2a, "", YB2b, "", YB2c, "", YB3},
  {"Partición modal Auto", YA1 * 100 / Ytot, "[%]", YA2a * 100 / Ytot, "[%]",
   YA2b * 100 / Ytot, "[%]", YA2c * 100 / Ytot, "[%]", YA3 * 100 / Ytot, "[%]"},
  {"Partición modal Auto", YB1 * 100 / Ytot, "[%]", YB2a * 100 / Ytot, "[%]",
   YB2b * 100 / Ytot, "[%]", YB2c * 100 / Ytot, "[%]", YB3 * 100 / Ytot, "[%]"},
  {"Tarifa por congestion [US$] Dolares", Pa1, "", Pa2a, "", Pa2b, "", Pa2c, "", Pa3},
  {"Tarifa por congestion [$] Pesos", Pa1 * Dolar,
   "", Pa2a * Dolar, "", Pa2b * Dolar, "", Pa2c * Dolar, "", Pa3 * Dolar },
  {"Tarifa bus [US$] Dolares", Pb1, "", Pb2a, "", Pb2b, "", Pb2c, "", Pb3},
  {"Tarifa bus [$] Pesos", Pb1 * Dolar, "",
   Pb2a * Dolar, "", Pb2b * Dolar, "", Pb2c * Dolar, "", Pb3 * Dolar },
  {"Consumer Surplus", CS[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   CS[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", CS[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", CS[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", CS[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Costo Operacion Bus", CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   CostF[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Recaudacion buses", Pb1 * YB1, "", Pb2a * YB2a, "",
   Pb2b * YB2b, "", Pb2c * YB2c, "", Pb3 * YB3},
  {"Resultado financiero Bus", Pb1 * YB1 - CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1],
   "", Pb2a * YB2a - CostF[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a],
   "", Pb2b * YB2b - CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", Pb2c * YB2c - CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c],
   "", Pb3 * YB3 - CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Recaudacion tarificacion por congestion", Pa1 * YA1 * L / a, "", Pa2a * YA2a * L / a,
   "", Pa2b * YA2b * L / a, "", Pa2c * YA2c * L / a, "", Pa3 * YA3 * L / a},
  {"Resultado Financiero sector publico",

```

```

Pa1 * YA1 * L / a + Pb1 * YB1 - CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
Pa2a * YA2a * L / a + Pb2a * YB2a - CostF[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a],
"", Pa2b * YA2b * L / a + Pb2b * YB2b - CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
"", Pa2c * YA2c * L / a + Pb2c * YB2c - CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c],
"", Pa3 * YA3 * L / a + Pb3 * YB3 - CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
{"Suma Error Restriccion Demanda", Error1, "", Error2a,
"", Error2b, "", Error2c, "", Error3},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/km]", ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * 60, "",
ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * 60, "", ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * 60,
"", ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * 60, "", ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * 60},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/viaje]", ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * 60 * L,
"", ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * 60 * L,
"", ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * 60 * L, "",
ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * 60 * L, "", ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * 60 * L},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/km]", tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * 60, "",
tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * 60, "", tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * 60,
"", tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * 60, "", tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * 60},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/viaje]", tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * 60 * L,
"", tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * 60 * L,
"", tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * 60 * L, "",
tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * 60 * L, "", tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * 60 * L},
{"Velocidad auto", 1 / ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "[km/hr]",
1 / ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "[km/hr]",
1 / ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b], "[km/hr]",
1 / ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "[km/hr]",
1 / ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3], "[km/hr]"},
{"Velocidad bus", 1 / tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "[km/hr]",
1 / tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "[km/hr]",
1 / tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b], "[km/hr]",
1 / tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "[km/hr]",
1 / tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3], "[km/hr]"},
{"tpo acceso", tab[p1] * 60, "[min]", tab[p2a] * 60, "[min]", tab[p2b] * 60,
"[min]", tab[p2c] * 60, "[min]", tab[p3] * 60, "[min]"},
{"Tiempo espera PUNTA", teb[f1] * 60, "[min]", teb[f2a] * 60, "[min]",
teb[f2b] * 60, "[min]", teb[f2c] * 60, "[min]", teb[f3] * 60, "[min]"},
{"Flujo", N[(L * YA1 / a) + b[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * f1], "",
N[(L * YA2a / a) + b[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * f2a], "",
N[(L * YA2b / a) + b[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * f2b], "",
N[(L * YA2c / a) + b[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * f2c],
"", N[(L * YA3 / a) + b[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * f3]},
{"Capacidad", Q, "", Q, "", Q, "", Q, "", Q},
{"Tiempo", Tiempo1, "", Tiempo2a, "", Tiempo2b, "", Tiempo2c, "", Tiempo3},
{"Equivalencia auto-bus", b[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
b[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", b[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
"", b[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", b[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},

```

```

{"Funcion e", e[f1], "", e[f2a], "", e[f2b], "", e[f2c], "", e[f3]},
{"CS Estrato 1", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[1]],
  CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[1]] / Y[[1]], CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[1]],
  CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[1]] / Y[[1]],
  CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[1]], CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[1]] /
  Y[[1]], CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[1]],
  CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[1]] / Y[[1]], CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[1]],
  CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[1]] / Y[[1]]},
{"CS Estrato 2", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[2]],
  CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[2]] / Y[[2]], CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[2]],
  CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[2]] / Y[[2]],
  CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[2]], CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[2]] /
  Y[[2]], CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[2]],
  CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[2]] / Y[[2]], CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[2]],
  CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[2]] / Y[[2]]},
{"CS Estrato 3", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[3]],
  CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[3]] / Y[[3]], CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[3]],
  CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[3]] / Y[[3]],
  CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[3]], CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[3]] /
  Y[[3]], CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[3]],
  CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[3]] / Y[[3]], CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[3]],
  CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[3]] / Y[[3]]},
{"CS Estrato 4", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[4]],
  CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[4]] / Y[[4]], CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[4]],
  CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[4]] / Y[[4]],
  CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[4]], CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[4]] /
  Y[[4]], CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[4]],
  CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[4]] / Y[[4]], CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[4]],
  CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[4]] / Y[[4]]},
{"CS Estrato 5", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[5]],
  CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[5]] / Y[[5]], CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[5]],
  CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[5]] / Y[[5]],
  CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[5]], CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[5]] /
  Y[[5]], CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[5]],
  CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[5]] / Y[[5]], CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[5]],
  CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[5]] / Y[[5]]},
{"Particion Auto Estrato 1", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[1]] * 100,
  "[%]", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[1]] * 100,
  "[%]", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[1]] * 100,
  "[%]", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[1]] * 100,
  "[%]", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[1]] * 100, "[%]"},
{"Particion Auto Estrato 2", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[2]] * 100,
  "[%]", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[2]] * 100,
  "[%]", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[2]] * 100,
  "[%]", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[2]] * 100,

```

```

    "[%]", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[2]] * 100, "[%]"},
{"Particion Auto Estrato 3", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[3]] * 100,
 "[%]", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[3]] * 100,
 "[%]", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[3]] * 100,
 "[%]", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[3]] * 100,
 "[%]", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[3]] * 100, "[%]"},
{"Particion Auto Estrato 4", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[4]] * 100,
 "[%]", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[4]] * 100,
 "[%]", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[4]] * 100,
 "[%]", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[4]] * 100,
 "[%]", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[4]] * 100, "[%]"},
{"Particion Auto Estrato 5", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1][[5]] * 100,
 "[%]", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a][[5]] * 100,
 "[%]", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b][[5]] * 100,
 "[%]", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c][[5]] * 100,
 "[%]", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3][[5]] * 100, "[%]"},
{"Capacidad Paradero", QP[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
 QP[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", QP[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
 "", QP[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", QP[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
{"Grado de Saturacion Paradero", f1 / QP[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
 f2a / QP[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", f2b / QP[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
 "", f2c / QP[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", f3 / QP[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]}
};

TableForm[results]

```

# Códigos Escenarios Flujo Segregado

```
Clear["Global`*"]
```

## Parámetros

### Costo Operación Buses

```
CC0 = 114.621 / 16;  
CC1 = 0.4766 / 16;  
CV0 = 0.1317;  
CV1 = 0.0033;
```

### Parámetros Generales

```
a = 1.5; (* Tasa de ocupación de los autos *)  
L = 10; (* Distancia de viaje de los pasajeros *)  
Vcam = 3.6; (* Velocidad de caminata [km/hr] *)  
Dolar = 550.64; (* Valor dolar 31 Agosto 2009 *)
```

### Capacidad

```
np = 3; (* numero de pistas *)  
ve = 0.6; (* % verde efectivo *)  
Q = 2000 * np * ve; (* Capacidad de la vía*)
```

### Tiempos

```
tp = 15 / 3600; (* Tiempo que pierde un vehículo por detenerse en un paradero *)  
tsb = 2.5 / 3600; (* Tiempo que demora un pasajero en subir al vehículo *)
```

### Costo auto

```
coa = 0.3566; (* Constante de costo de operación de un auto por km. [US$ 2009] *)
```

### Distribución de la Población

```
(* 5 Estratos *)  
Distr = {0.14, 0.28, 0.32, 0.17, 0.09};
```

### Demanda

```
Ytot = 1200; (* Demanda total [pax/hr-km] *)  
Y = Table[Distr[[i]] * Ytot, {i, 1, 5}];
```

### Partición Modal MNL

```
theta = {1.28706, 0.48159, 1.0905, 1.531, 2.3653};  
thetaG = -0.648; (* [hr] *)  
thetaGb = -1.116; (* [hr] *)  
thetaCosto = {-1.6891, -1.0557, -0.929, -0.71786, -0.42227};  
(* Theta costo por estrato [US$2009] *)
```

## Funciones

```

K[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\frac{YB \times L}{f}$ ;
(* Capacidad de un vehículo de transporte público *)
QP[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=
   $\left( 2.6582 * \frac{YB}{f * p} - 88.899 \right) * \text{Log}\left[ \frac{YB}{f * p} \right] + \left( -7.6714 * \frac{YB}{f * p} \right) + 317.43$ ; (* capacidad paradero *)
de[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\left( \left( 0.060447 + 1.3824 * \frac{f}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right) * \frac{YB}{f * p} + \left( 0.20961 + 0.38217 * \frac{f}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right) * \frac{YB}{f * p} - 0.013926 * \left( \frac{YB}{f * p} \right)^2 \right) / 3600$ ; (* Demora Interna*)
dq[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] :=  $\left( \left( 0.34807 + 0.0081985 * \left( \frac{YB}{f * p} \right)^2 \right) * \text{Exp}\left[ \frac{f * \left( 6.2213 - 0.11353 * \frac{YB}{f * p} \right)}{QP[f, p, Pa, Pb, YA, YB]} \right] \right) / 3600$ ; (* Demora por Cola*)
b[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_] := 0.0114 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + 1.15;
(* Autos equivalentes de un bus *)
e[f_] := 1 - 1 / (1.01^f);
ta[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=  $1 / \sqrt{\text{Max}\left[ 3600 - 3200 * \frac{(L * YA / a)}{((1 - \eta) * Q)}, 1 \right]}$ ;
tb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=  $1 / \sqrt{\text{Max}\left[ 3600 - 3200 * \frac{b[f, p, Pa, Pb, YA, YB] * f}{\eta * Q}, 1 \right]}$  +
  (YB * tsb / f + (tp + de[f, p, Pa, Pb, YA, YB] + dq[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * p);
tva[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := ta[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] * L;
tvb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := tb[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] * L;
tea = 0;
taa = 0;
teb[f_] := 1 / (2 * f);
tab[p_] := 1 / (2 * p * Vcam);
TGa[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := tva[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] + 1.93 * tea + 3.63 * taa;
TGb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=
  tvb[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] + 1.93 * teb[f] + 3.63 * tab[p];
ca[Pa_] := (L * (Pa + coa)) / a;

```

```

cb[Pb_] := Pb;
Ua[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=
  Table[θ0a[[i]] + θTGa * TGa[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] + θcosto[[i]] * ca[Pa], {i, 1, 5}];
Ub[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=
  Table[θTGB * TGB[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] + θcosto[[i]] * cb[Pb], {i, 1, 5}];
Pra[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := Table[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] /
  (Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]]), {i, 1, 5}];
Prb[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := Table[Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] /
  (Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]]), {i, 1, 5}];

CostF[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=
  (CC0 + CC1 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * f * tb[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] +
  (CV0 + CV1 * K[f, p, Pa, Pb, YA, YB]) * f;
CS[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] :=
  Sum[ Y[[i]] / (-θcosto[[i]]) * Log[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] +
  Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]]], {i, 1, 5}];
CSE[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := Table[ Y[[i]] / (-θcosto[[i]]) *
  Log[Exp[Ua[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]] + Exp[Ub[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η][[i]]]], {i,
  1, 5}];
SW[f_, p_, Pa_, Pb_, YA_, YB_, η_] := CS[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] +
  Pb * YB - CostF[f, p, Pa, Pb, YA, YB, η] + Pa * YA * L / a;

```

## Escenario VE: (Sin Tarificacion vial, sin subsidio)

```

tiempol = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = 0; Pb = .; YA = .; n = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 &&
  (n == 1 / 3 || n == 2 / 3) && Pb * (Ytot - YA) == CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, {Pb, 0, 1}, {YA, 100, 500}, n}]
f1 = f /. Last[%];
p1 = p /. Last[%];
Pb1 = Pb /. Last[%];
YA1 = YA /. Last[%];
n1 = n /. Last[%];
YB1 = Ytot - YA1;
Pa1 = 0;
Error1 = Abs[YA1 - Sum[Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB1 - Sum[Prb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempol = (AbsoluteTime[] - tiempol) / 60

```

## Escenario SUB + VE: (Sin Tarificacion vial con subsidio)

```
tiempo2a = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = 0; Pb = .; YA = .; n = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 && (n == 1 / 3 || n == 2 / 3) &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pb, {YA, 100, 500}, n}]
f2a = f /. Last[%];
p2a = p /. Last[%];
Pb2a = Pb /. Last[%];
YA2a = YA /. Last[%];
n2a = n /. Last[%];
YB2a = (Ytot - YA2a);
Pa2a = 0;
Error2a = Abs[YA2a - Sum[Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2a - Sum[Prb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2a = (AbsoluteTime[] - tiempo2a) / 60
```

## Escenario TAR + VE: (Tarificacion vial, sin subsidio (autofinanciamiento buses))

```
tiempo2b = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = .; Pb = .; YA = .; YB = .; n = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 &&
  (n == 1 / 3 || n == 2 / 3) && Pb * (Ytot - YA) == CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pa, {Pb, 0, 1}, {YA, 100, 500}, n}]
f2b = f /. Last[%];
p2b = p /. Last[%];
Pa2b = Pa /. Last[%];
Pb2b = Pb /. Last[%];
YA2b = YA /. Last[%];
n2b = n /. Last[%];
YB2b = (Ytot - YA2b);
Error2b = Abs[YA2b - Sum[Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2b - Sum[Prb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2b = (AbsoluteTime[] - tiempo2b) / 60
```



## Escenario SUB + TAR + VE (Bus cubre costos y tarificación vial)

```

tiempo2c = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = .; Pb = .; YA = .; YB = .; n = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n], 1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] &&
  0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) && 0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 && (n == 1 / 3 || n == 2 / 3) &&
  Pb * (Ytot - YA) + Pa * YA * L / a == CostF[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n] &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pa, Pb, {YA, 100, 500}, n]}
f2c = f /. Last[%];
p2c = p /. Last[%];
Pa2c = Pa /. Last[%];
Pb2c = Pb /. Last[%];
YA2c = YA /. Last[%];
n2c = n /. Last[%];
YB2c = (Ytot - YA2c);
Error2c = Abs[YA2c - Sum[Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB2c - Sum[Prb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo2c = (AbsoluteTime[] - tiempo2c) / 60

```

## Escenario SUBP + VE: (Sin tarificación vial, tarifa bus no negativa)

```

tiempo3 = AbsoluteTime[];
f = .; p = .; Pa = 0; Pb = .; YA = .; YB = .; n = .;
NMaximize[{SW[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n],
  1 < f < QP[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA)] && 0.1 < p ≤ 5 && 0 < YA < (Ytot - 1) &&
  0 < ((Ytot - YA) * L) / f < 300 && (n == 1 / 3 || n == 2 / 3) && Pb ≥ 0 &&
  YA == Sum[Pra[f, p, Pa, Pb, YA, (Ytot - YA), n][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}],
  {{f, 35, 150}, p, Pb, {YA, 100, 500}, n]}
f3 = f /. Last[%];
p3 = p /. Last[%];
Pb3 = Pb /. Last[%];
YA3 = YA /. Last[%];
n3 = n /. Last[%];
YB3 = (Ytot - YA3);
Pa3 = 0;
Error3 = Abs[YA3 - Sum[Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]] +
  Abs[YB3 - Sum[Prb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[i]] * Y[[i]], {i, 1, 5}]]
Tiempo3 = (AbsoluteTime[] - tiempo3) / 60

```

## Tabla Resultados

```

results = {
  {"", "Escenario 6", "", "Escenario 7a",
   "", "Escenario 7b", "", "Escenario 7c", "", "Escenario 8"},
  {"Social Welfare", SW[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "",
   SW[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "", SW[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b],
   "", SW[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", SW[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
  {"Frecuencia Buses PUNTA por hora", f1, "", f2a, "", f2b, "", f2c, "", f3},
  {"Paraderos por km", p1, "", p2a, "", p2b, "", p2c, "", p3},
  {"Numero de pistas solo BUS", n1 * 3, "", n2a * 3, "", n2b * 3, "", n2c * 3, "", n3 * 3},
  {"Tamaño buses", K[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
   K[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", K[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
   "", K[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", K[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
  {"Tamaño flota (buses por hora por km)", f1 * tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1],
   "", f2a * tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "",
   f2b * tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b], "", f2c *
   tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", f3 * tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
  {"Demanda Auto", YA1, "", YA2a, "", YA2b, "", YA2c, "", YA3},
  {"Demanda Bus", YB1, "", YB2a, "", YB2b, "", YB2c, "", YB3},
  {"Partición modal Auto", YA1 * 100 / Ytot, "[%]", YA2a * 100 / Ytot, "[%]",
   YA2b * 100 / Ytot, "[%]", YA2c * 100 / Ytot, "[%]", YA3 * 100 / Ytot, "[%]"},
  {"Partición modal Auto", YB1 * 100 / Ytot, "[%]", YB2a * 100 / Ytot, "[%]",
   YB2b * 100 / Ytot, "[%]", YB2c * 100 / Ytot, "[%]", YB3 * 100 / Ytot, "[%]"},
  {"Tarifa por congestion [US$] Dolares", Pa1, "", Pa2a, "", Pa2b, "", Pa2c, "", Pa3},
  {"Tarifa por congestion [$] Pesos", Pa1 * Dolar,
   "", Pa2a * Dolar, "", Pa2b * Dolar, "", Pa2c * Dolar, "", Pa3 * Dolar },
  {"Tarifa bus [US$] Dolares", Pb1, "", Pb2a, "", Pb2b, "", Pb2c, "", Pb3},
  {"Tarifa bus [$] Pesos", Pb1 * Dolar, "",
   Pb2a * Dolar, "", Pb2b * Dolar, "", Pb2c * Dolar, "", Pb3 * Dolar },
  {"Consumer Surplus", CS[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "",
   CS[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "", CS[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b],
   "", CS[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", CS[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
  {"Costo Operacion Bus", CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "", CostF[f2a, p2a,
   Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "", CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b], "",
   CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
  {"Recaudacion buses", Pb1 * YB1, "", Pb2a * YB2a, "",
   Pb2b * YB2b, "", Pb2c * YB2c, "", Pb3 * YB3},
  {"Resultado financiero Bus", Pb1 * YB1 - CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1],
   "", Pb2a * YB2a - CostF[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a],
   "", Pb2b * YB2b - CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b],
   "", Pb2c * YB2c - CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c],
   "", Pb3 * YB3 - CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
  {"Recaudacion tarifacion por congestion", Pa1 * YA1 * L / a, "", Pa2a * YA2a * L / a,

```

```

    "", Pa2b * YA2b * L / a, "", Pa2c * YA2c * L / a, "", Pa3 * YA3 * L / a},
{"Resultado Financiero sector publico",
 Pa1 * YA1 * L / a + Pb1 * YB1 - CostF[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "",
 Pa2a * YA2a * L / a + Pb2a * YB2a - CostF[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "",
 Pa2b * YA2b * L / a + Pb2b * YB2b - CostF[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b], "",
 Pa2c * YA2c * L / a + Pb2c * YB2c - CostF[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c],
 "", Pa3 * YA3 * L / a + Pb3 * YB3 - CostF[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
{"Suma Error Restriccion Demanda", Error1, "", Error2a,
 "", Error2b, "", Error2c, "", Error3},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/km]", ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1] * 60,
 "", ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a] * 60,
 "", ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b] * 60,
 "", ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c] * 60,
 "", ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3] * 60},
{"Tiempo de viaje auto [minutos/viaje]", ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1] * 60 * L,
 "", ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a] * 60 * L,
 "", ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b] * 60 * L,
 "", ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c] * 60 * L,
 "", ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3] * 60 * L},
{"Tiempo de viaje bus [minutos/km]", tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1] * 60,
 "", tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a] * 60,
 "", tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b] * 60,
 "", tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c] * 60,
 "", tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3] * 60},
{"Tiempo de viaje bus [minutos/viaje]", tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1] * 60 * L,
 "", tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a] * 60 * L,
 "", tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b] * 60 * L,
 "", tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c] * 60 * L,
 "", tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3] * 60 * L},
{"Velocidad auto", 1 / ta[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "[km/hr]",
 1 / ta[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "[km/hr]",
 1 / ta[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b], "[km/hr]",
 1 / ta[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "[km/hr]",
 1 / ta[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3], "[km/hr]"},
{"Velocidad bus", 1 / tb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "[km/hr]",
 1 / tb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "[km/hr]",
 1 / tb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b], "[km/hr]",
 1 / tb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "[km/hr]",
 1 / tb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3], "[km/hr]"},
{"tpo acceso", tab[p1] * 60, "[min]", tab[p2a] * 60, "[min]", tab[p2b] * 60,
 "[min]", tab[p2c] * 60, "[min]", tab[p3] * 60, "[min]"},
{"Tiempo espera", teb[f1] * 60, "[min]", teb[f2a] * 60, "[min]",
 teb[f2b] * 60, "[min]", teb[f2c] * 60, "[min]", teb[f3] * 60, "[min]"},
{"Flujo", N[(L * YA1 / a) + b[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1] * f1], "",
 N[(L * YA2a / a) + b[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a] * f2a], ""},

```

```

N[(L * YA2b / a) + b[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b] * f2b], "",
N[(L * YA2c / a) + b[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c] * f2c],
"", N[(L * YA3 / a) + b[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3] * f3}],
{"Capacidad", Q, "", Q, "", Q, "", Q, "", Q},
{"Tiempo", Tiempo1, "", Tiempo2a, "", Tiempo2b, "", Tiempo2c, "", Tiempo3},
{"Equivalencia auto-bus", b[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
b[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", b[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
"", b[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", b[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
{"Funcion e", e[f1], "", e[f2a], "", e[f2b], "", e[f2c], "", e[f3]},
{"CS Estrato 1", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[1]],
CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[1]] / Y[[1]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[1]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[1]] / Y[[1]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[1]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[1]] / Y[[1]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[1]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[1]] / Y[[1]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[1]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[1]] / Y[[1]]},
{"CS Estrato 2", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[2]],
CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[2]] / Y[[2]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[2]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[2]] / Y[[2]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[2]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[2]] / Y[[2]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[2]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[2]] / Y[[2]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[2]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[2]] / Y[[2]]},
{"CS Estrato 3", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[3]],
CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[3]] / Y[[3]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[3]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[3]] / Y[[3]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[3]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[3]] / Y[[3]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[3]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[3]] / Y[[3]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[3]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[3]] / Y[[3]]},
{"CS Estrato 4", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[4]],
CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[4]] / Y[[4]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[4]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[4]] / Y[[4]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[4]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[4]] / Y[[4]],

```

```

CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[4]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[4]] / Y[[4]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[4]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[4]] / Y[[4]]},
{"CS Estrato 5", CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[5]],
CSE[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[5]] / Y[[5]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[5]],
CSE[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[5]] / Y[[5]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[5]],
CSE[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[5]] / Y[[5]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[5]],
CSE[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[5]] / Y[[5]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[5]],
CSE[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[5]] / Y[[5]]},
{"Particion Auto Estrato 1", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[1]] * 100,
"%", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[1]] * 100,
"%", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[1]] * 100,
"%", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[1]] * 100,
"%", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[1]] * 100, "%"},
{"Particion Auto Estrato 2", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[2]] * 100,
"%", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[2]] * 100,
"%", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[2]] * 100,
"%", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[2]] * 100,
"%", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[2]] * 100, "%"},
{"Particion Auto Estrato 3", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[3]] * 100,
"%", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[3]] * 100,
"%", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[3]] * 100,
"%", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[3]] * 100,
"%", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[3]] * 100, "%"},
{"Particion Auto Estrato 4", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[4]] * 100,
"%", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[4]] * 100,
"%", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[4]] * 100,
"%", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[4]] * 100,
"%", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[4]] * 100, "%"},
{"Particion Auto Estrato 5", Pra[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[5]] * 100,
"%", Pra[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[5]] * 100,
"%", Pra[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[5]] * 100,
"%", Pra[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[5]] * 100,
"%", Pra[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[5]] * 100, "%"},
{"Tiempo Generalizado Auto", TGa[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "",
TGa[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "", TGa[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b],
"", TGa[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", TGa[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},
{"Tiempo Generalizado BUS", TGb[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1], "",
TGb[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a], "", TGb[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b],
"", TGb[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c], "", TGb[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3]},

```

```

{"Utilidad Auto Estrato 1", Ua[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[1]],
  "", Ua[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[1]],
  "", Ua[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[1]],
  "", Ua[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[1]],
  "", Ua[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[1]]},
{"Utilidad Auto Estrato 2", Ua[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[2]],
  "", Ua[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[2]],
  "", Ua[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[2]],
  "", Ua[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[2]],
  "", Ua[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[2]]},
{"Utilidad Auto Estrato 3", Ua[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[3]],
  "", Ua[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[3]],
  "", Ua[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[3]],
  "", Ua[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[3]],
  "", Ua[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[3]]},
{"Utilidad Auto Estrato 4", Ua[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[4]],
  "", Ua[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[4]],
  "", Ua[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[4]],
  "", Ua[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[4]],
  "", Ua[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[4]]},
{"Utilidad Auto Estrato 5", Ua[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[5]],
  "", Ua[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[5]],
  "", Ua[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[5]],
  "", Ua[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[5]],
  "", Ua[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[5]]},
{"Utilidad Bus Estrato 1", Ub[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[1]],
  "", Ub[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[1]],
  "", Ub[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[1]],
  "", Ub[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[1]],
  "", Ub[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[1]]},
{"Utilidad Bus Estrato 2", Ub[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[2]],
  "", Ub[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[2]],
  "", Ub[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[2]],
  "", Ub[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[2]],
  "", Ub[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[2]]},
{"Utilidad Bus Estrato 3", Ub[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[3]],
  "", Ub[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[3]],
  "", Ub[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[3]],
  "", Ub[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[3]],
  "", Ub[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[3]]},
{"Utilidad Bus Estrato 4", Ub[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[4]],
  "", Ub[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[4]],
  "", Ub[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[4]],
  "", Ub[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[4]],
  "", Ub[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[4]]},

```

```

{"Utilidad Bus Estrato 5", Ub[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1, n1][[5]],
  "", Ub[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a, n2a][[5]],
  "", Ub[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b, n2b][[5]],
  "", Ub[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c, n2c][[5]],
  "", Ub[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3, n3][[5]]},
{"Capacidad Paradero", QP[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
  QP[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", QP[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
  "", QP[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", QP[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]},
{"Grado de Saturacion Paradero", f1 / QP[f1, p1, Pa1, Pb1, YA1, YB1], "",
  f2a / QP[f2a, p2a, Pa2a, Pb2a, YA2a, YB2a], "", f2b / QP[f2b, p2b, Pa2b, Pb2b, YA2b, YB2b],
  "", f2c / QP[f2c, p2c, Pa2c, Pb2c, YA2c, YB2c], "", f3 / QP[f3, p3, Pa3, Pb3, YA3, YB3]}
};

```

```
TableForm[results]
```

## Apéndice E

### Tabla de resultados aplicación base



Escenario										
	BASE	SUB	TAR	SUB + TAR	SUBP	VE	SUB + VE	TAR + VE	SUB + TAR + VE	SUBP + VE
Bienestar Social [US\$/hr-km]	-257.6	-171.1	-171.1	-171.1	-220.0	-163.6	-75.4	-75.4	-75.4	-135.0
Excedente de los Consumidores [US\$/hr-km]	-257.6	314.0	-365.8	-171.1	-137.8	-163.6	440.4	-267.6	-75.4	-56.0
EC Estrato 1 [US\$/hr-km]	-94.4	4.2	-90.9	-63.7	-74.7	-75.0	18.4	-80.7	-53.8	-60.0
EC Estrato 2 [US\$/hr-km]	-247.7	-56.2	-246.5	-192.0	-208.0	-196.9	-18.3	-216.5	-162.7	-167.3
EC Estrato 3 [US\$/hr-km]	-207.8	-23.6	-241.2	-178.9	-169.7	-167.3	18.6	-208.0	-146.5	-135.1
EC Estrato 4 [US\$/hr-km]	-5.2	67.7	-47.9	-14.8	10.7	-0.3	89.1	-31.2	1.4	17.0
EC Estrato 5 [US\$/hr-km]	297.4	321.9	260.7	278.3	303.9	275.9	332.6	268.9	286.1	289.3
EC Estrato 1 [US\$/pax]	-0.6	0.0	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	0.1	-0.5	-0.3	-0.4
EC Estrato 2 [US\$/pax]	-0.7	-0.2	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.1	-0.6	-0.5	-0.5
EC Estrato 3 [US\$/pax]	-0.5	-0.1	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	0.0	-0.5	-0.4	-0.4
EC Estrato 4 [US\$/pax]	0.0	0.3	-0.2	-0.1	0.1	0.0	0.4	-0.2	0.0	0.1
EC Estrato 5 [US\$/pax]	2.8	3.0	2.4	2.6	2.8	2.6	3.1	2.5	2.6	2.7
Costo Operacional Buses [US\$/hr-km]	80.8	82.5	82.5	82.5	82.2	77.1	81.4	81.4	81.4	79.0
Recaudacion Buses [US\$/hr-km]	80.8	-402.6	82.7	-56.3	0.0	77.1	-434.4	81.4	-58.6	0.0
Resultado Financiero Buses [US\$/hr-km]	0.0	-485.1	0.2	-138.8	-82.2	0.0	-515.8	0.0	-140.0	-79.0
Recaudacion por Tarificacion Vial [US\$/hr-km]	0.0	0.0	194.5	138.8	0.0	0.0	0.0	192.2	140.0	0.0
Resultado Financiero Sector Público [US\$/hr-km]	0.0	-485.1	194.7	0.0	-82.2	0.0	-515.8	192.2	0.0	-79.0
Tarifa Bus [US\$]	0.109	-0.470	0.097	-0.066	0.000	0.094	-0.497	0.093	-0.067	0.000
Tarifa por congestion Auto [US\$/km]	0.000	0.000	0.085	0.061	0.000	0.000	0.000	0.088	0.064	0.000
Subsidio [US\$/pax]	0.000	0.566	0.000	0.162	0.107	0.000	0.590	0.000	0.160	0.096
Demanda Auto [pax/hr-km]	459.2	343.4	343.4	343.4	432.7	382.9	325.8	325.8	325.8	376.6
Demanda Bus [pax/hr-km]	740.8	856.6	856.6	856.6	767.3	817.1	874.2	874.2	874.2	823.4
Partición Modal Auto [%]	38%	29%	29%	29%	36%	32%	27%	27%	27%	31%
Partición Modal Bus [%]	62%	71%	71%	71%	64%	68%	73%	73%	73%	69%

	Escenario										
	BASE	SUB	TAR	SUB + TAR	SUBP	VE	SUB + VE	TAR + VE	SUB + TAR + VE	SUBP + VE	
Tiempo de viaje auto [minutos]	30.5	25.2	25.2	25.2	28.8	42.8	22.6	22.6	22.6	22.6	37.7
Tiempo de viaje bus [minutos]	38.4	33.3	33.3	33.3	36.5	27.6	28.4	28.4	28.4	28.4	27.7
Velocidad Auto [km/hr]	19.7	23.8	23.8	23.8	20.8	14.0	26.5	26.5	26.5	26.5	15.9
Velocidad Bus [km/hr]	15.6	18.0	18.0	18.0	16.4	21.7	21.1	21.1	21.1	21.1	21.6
Frecuencia [Buses/hr]	71.5	75.7	75.7	75.7	75.7	84.3	85.4	85.4	85.4	85.4	87.5
Capacidad Bus [pax]	103.6	113.2	113.2	113.2	101.3	96.9	102.3	102.3	102.3	102.3	94.1
Flota [veh/hr-km]	4.6	4.2	4.2	4.2	4.6	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
N° Paraderos por km.	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
Distanciamiento entre paraderos [m]	291.2	295.0	295.0	295.0	293.4	283.2	278.6	278.6	278.6	278.6	280.8
Pistas exclusivas para buses						1	1	1	1	1	1
Particion auto Estrato 1 [%]	12%	5%	5%	5%	10%	9%	4%	4%	4%	4%	8%
Particion auto Estrato 2 [%]	21%	12%	12%	12%	19%	15%	11%	11%	11%	11%	15%
Particion auto Estrato 3 [%]	39%	26%	26%	26%	36%	31%	24%	24%	24%	24%	30%
Particion auto Estrato 4 [%]	61%	50%	50%	50%	59%	53%	48%	48%	48%	48%	53%
Particion auto Estrato 5 [%]	88%	84%	84%	84%	87%	84%	83%	83%	83%	83%	84%
Grado de saturación de paraderos [%]	35%	39%	39%	39%	37%	39%	41%	41%	41%	41%	40%
Pasajeros que suben a un bus [pax/hr/bus]	3.0	3.3	3.3	3.3	3.0	2.7	2.9	2.9	2.9	2.9	2.6
Capacidad paradero [buses/hr]	205.0	195.3	195.3	195.3	206.4	214.0	210.4	210.4	210.4	210.4	217.6